

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Mapeamento Geotécnico dos principais condicionantes de ruptura  
de taludes de corte da duplicação da BR-116 entre São Lourenço  
do Sul e Barra do Ribeiro (RS)**

**Arthur Ziebell**

Porto Alegre  
2017

ARTHUR ZIEBELL

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DOS PRINCIPAIS  
CONDICIONANTES DE RUPTURA DE TALUDES DE CORTE  
DA DUPLICAÇÃO DA BR-116 ENTRE SÃO LOURENÇO DO  
SUL E BARRA DO RIBEIRO (RS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2017

**ARTHUR ZIEBELL**

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO DOS PRINCIPAIS  
CONDICIONANTES DE RUPTURA DE TALUDES DE CORTE  
DA DUPLICAÇÃO BR-116 ENTRE SÃO LOURENÇO DO SUL  
E BARRA DO RIBEIRO (RS)**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2017

Prof. Nilo Cesar Consoli  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof<sup>ª</sup>. Karla Salvagni Heineck**  
Dr<sup>ª</sup>. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Adelir José Strieder**  
Dr. pela Universidade de Brasília

**Prof<sup>ª</sup>. Paola Bruno Arab**  
Dr<sup>ª</sup>. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a minha família e, em especial, aos meus pais, Renato e Carla, meu irmão Roberto, minha tia Viviane e meu primo Guilherme, pelo auxílio durante o período de seu desenvolvimento.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à todos os Professores do PPGECC por tornar possível o projeto, por ensinarem e orientarem sobre o tema deste trabalho. Um agradecimento especial ao Professor Adelir Strieder, um amigo, e ao Coordenador do programa, Professor Nilo Consoli. Gostaria também de agradecer ao Prof. Luiz Antônio Bressani, por todo auxílio no trabalho, e ao Técnico do Laboratório do Lageotec, Jair, pela grande ajuda no desenvolvimento dos ensaios.

Agradeço a meus pais pela ajuda, apoio, dedicação, paciência e incentivo, desde o início da minha carreira acadêmica e profissional. Meu irmão por sempre estar ao meu lado, estimulando sempre com sábias palavras de apoio. A minha namorada Alessandra, por ter passado momentos de luta e dedicação comigo, apoiando, dando carinho e muito amor.

Agradeço a minha segunda família durante o mestrado, pois graças a eles, foi possível chegar até aqui. À minha tia Viviane por dar todo suporte que eu precisei durante estes dois anos de estudos, mas principalmente em 2015, me acolhendo em seu lar. Meu primo Guilherme, a primeira pessoa a me incentivar a fazer o mestrado acadêmico, sendo meu parceiro e um “irmão”. Minha prima Manoela, sempre muito carinhosa, me recebendo de braços abertos.

Aos queridos colegas, Adrian, Camila, Jéssica e Laura, que me ajudaram durante toda primeira etapa, sendo parceiros e amigos. Estes são para sempre!

É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.

*Theodore Roosevelt*

## RESUMO

**ZIEBELL, A. Mapeamento geotécnico dos principais condicionantes de ruptura de taludes de corte da duplicação da BR-116 entre São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro (RS).** 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A BR 116, no Rio Grande do Sul, perfaz uma extensão total de 653,8 quilômetros, iniciando na divisa entre SC e RS, na ponte sobre o Rio Pelotas, entre Lajes e Vacaria, prolongando-se até Jaguarão. A sua importância econômica no estado decorre do fato de ser um corredor que liga o norte do Rio Grande do Sul ao porto de Rio Grande (através da BR 392) e à fronteira com o Uruguai. A duplicação da BR-116 visa o escoamento da produção até o Porto de Rio Grande e a distribuição de produtos e bens que ingressam pelo Porto ou pela fronteira. Atualmente, as obras de duplicação encontram-se executadas em 50-60 % e parcialmente paralisadas (cada trecho/lote tem uma situação diferente). Este trabalho dedicou-se ao mapeamento geotécnico dos condicionantes de ruptura dos taludes de cortes rodoviários da BR-116, entre os municípios de São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro (RS). A investigação ocorreu por meio da análise dos taludes em campo, estudando as relações geológicas e pedológicas que condicionam as instabilidades situadas ao longo do trecho entre os quilômetros 332 e 477. O mapeamento geotécnico executado incluiu o levantamento da localização geográfica (coordenadas geográficas, e km da rodovia) de todos os cortes de estrada (taludes) existentes no trecho escolhido, bem como o levantamento fotográfico e a coleta de dados como altura, inclinação, extensão, cota altimétrica, medidas estruturais, medidas e descrição dos horizontes pedogenéticos, problemas geotécnicos, comportamento mecânico, fluxo de água superficial, nível do lençol freático, descrição geológica, descrição do nível de intemperismo e coleta de amostra para ensaios geotécnicos e difratometria de raios X. Após as descrições de campo, os taludes 8, 15 e 30 foram definidos como taludes representativos para análise mineralógica através de difração de raios X e caracterização dos argilo-minerais através de microscópio eletrônico de varredura. O talude 8 ainda contou com ensaios de cisalhamento direto para caracterização geomecânica do horizonte C. Esta análise permitiu definir que o principal condicionante para as rupturas de taludes na BR-116, trecho Sul, está na exposição do horizonte C, que induz diferentes tipos de processos erosivos sobre o mesmo. As investigações mostraram que a exposição do horizonte C faz com que a água da chuva aja na erosão direta do sopé do talude, ou na formação de canaletas e *piping* pela remoção de finos, os quais evoluem para bossorocas. As estruturas geológicas reliquias preenchidas por caulinita também

incrementam os processos erosivos, pela retirada da base estrutural de todo o corte. Assim, os horizontes A e B e a vegetação logo acima perdem sustentação e a gravidade determina o rompimento do talude em escorregamentos rotacionais. A continuidade dos eventos pluviométricos e, portanto, dos processos erosivos induzem novas rupturas em alguns taludes, ou na erosão direta do material escorregado para a base do talude, removendo material para as drenagens adjacentes.

**Palavras-chave:** *rodovia BR-116; mapeamento geológico-geotécnico; processos erosivos; ruptura de taludes.*

## ABSTRACT

ZIEBELL, A. **Mapping the geotechnical controlling factors for sliding road cuts during the BR-116 duplication between São Lourenço do Sul and Barra do Ribeiro (RS)**. 2017. Dissertation (Master in Geotechnics) – Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The BR-116 is one of the most important longitudinal highways in Rio Grande do Sul state (RS, Brazil). The highway has 653.8 kilometers, starting at the bridge over the Pelotas River, and extending to Jaguarão city. It is part of an important economic corridor, that connects the north of RS to the Rio Grande Harbor (through BR 392) and Uruguay border. Therefore, the importance of the highway to the economic outflow from the state. The BR-116 duplication effort is actually halfway to the end, each segment in a different situation, and is slowly going on. This work was focused on mapping the geotechnical controlling factor for road cuts slidings, that occurred between São Lourenço do Sul and Barra do Ribeiro municipalities (RS) along BR-116 highway. The geotechnical investigation was carried out through fieldworks road cut slopes analysis, which included geology and pedology slopes characterization along the 332 and 477 kilometer of the BR-116 highway. The geotechnical field mapping procedures include recording and analyzing the geographic location (geodetic coordinates, and altimeter), photographic survey, and mainly the height, inclination, extension, structural features measurements, measure and description of pedogenetic horizons, geotechnical problems, mechanical behavior, surface water flow, groundwater level, geological description, description of weathering level and sample collection for all road cut slopes that show sliding or erosional features. The slopes numbered 8, 15 and 30 were defined as representative slopes for mineralogical analysis (X-ray diffraction and scanning electronic microscope). This analyses allowed to define that the main controlling factor for the road cut sliding along BR-116 under duplication is the exposure of the pedogenetic C horizon, since this enables different erosional processes upon it. The investigation has shown that the rainwater can acts directly on the footwall erosion, or even in the formation of channels and piping, which evolve to ravines. The relict geological structures weathered to kaolinite additionally contribute to the erosion processes. In such a scenario, the decreasing structural support due to C horizon erosion enable gravity to act upon pedogenetic A and B horizons, as well as on the vegetation cover just above, and cause rotational slipping on the road cut slopes. The subsequent pluviometric events contribute to additional direct erosion on slope footwall, to material removal to adjacent drainage channels, and, consequently, to repeated slipping in some slopes.

**Key-words:** *road BR-116; geological-geotechnics mapping; erosional processes; slope instability.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave (PASTORE, 1995 apud OLIVEIRA 2006);.....	25
Figura 2: Perfil de alteração proposto por Deere e Patton (1971 apud OLIVEIRA, 2006); .....	27
Figura 3: Representação de um perfil de intemperismo para rochas graníticas (BASTOS, 1991)......	29
Figura 4: Precipitação média anual segundo a Secretaria de Meio Ambiente do Estado (STE, 2009)......	34
Figura 5: Normais Climatológicas – 1961/1990 – Chuva Acumulada (STE, 2009). .....	35
Figura 6: Compartimentação tectônica do Escudo Sul-Rio-Grandense. (Modificado de Soliani, 1986, in Wildner e Lopes, 2010)......	36
Figura 7: Localização do Cinturão Dom Feliciano e do Batólito Pelotas no contexto geotectônico do sul do Brasil e Uruguai (Modificado de Chemale Jr., 2000, in Philipp 2005). .....	37
Figura 8: Mapa geológico do Batólito Pelotas com detalhe da faixa de duplicação da BR-116 (vermelho), apresentando as principais unidades graníticas e zonas de cisalhamento dúcteis transcorrentes (Modificado de PHILIPP et al., 2007). .....	38
Figura 9: Mapa Geológico do trecho de interesse. (Modificado de CPRM, 2006). .....	42
Figura 10: Mapa pedológico do trecho de interesse. (Modificado de IBGE, 2012)......	46
Figura 11: Queda, desprendimento de fragmentos do terreno, de qualquer tamanho, que caem de certa altura, em queda livre ou com qualquer outra trajetória e tipo de movimento (Infraestrutura Urbana, 2017). .....	48
Figura 12: Tombamento, movimento de massa em forma de balsa com eixo na base (Infraestrutura Urbana, 2017). .....	49
Figura 13: Escorregamento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies (Infraestrutura Urbana, 2017). .....	50
Figura 14: Escoamento, movimento de massa com propriedade de fluido, lento ou rápido (corrida) (Infraestrutura Urbana, 2017). .....	51
Figura 15: Localização Geográfica e delimitação do trecho de duplicação da BR-116 (STE, 2009);.....	54
Figura 16: Mapa altimétrico da área de interesse. ....	55

Figura 17: Mapa de declividade da área de interesse. ....	56
Figura 18: Equipamento de Cisalhamento Direto.....	57
Figura 19: Representação da Lei de Bragg em duas dimensões (STOA USP, 2009 apud SILVA, 2013).....	58
Figura 20: Imagens do equipamento de difração de raios X Shimadzu Lab X XRD-6000. ....	59
Figura 21: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Shimadzu SSX-550 superscan. ....	60
Figura 22: Localização dos 32 taludes mapeados na análise geológica-geotécnica;.....	62
Figura 23: Talude 1;.....	63
Figura 24: a) foto frontal do talude com detalhe para a erosão acentuada, escorregamento e escoamento do horizonte B sobre a face inferior do talude e formação de leques compostos por sedimentos do tamanho areia na superfície inferior do piso. b) detalhe para o horizonte C ou R escavável erodido formando ravinas e os sedimentos tamanho areia na forma de leques. c) Contato gradacional entre os horizontes C, proveniente de monzogranito, e o horizonte B planossolo argiloso. d) marcas do horizonte R escavável erodido e movimentado. e) foto a 2 metros do topo, no centro superior do horizonte B com características de tombamento causado pela erosão e retirada do horizonte C. ....	64
Figura 25: Talude 2;.....	66
Figura 26: Talude 3;.....	67
Figura 27: Talude 4;.....	68
Figura 28: Talude 5;.....	69
Figura 29: Talude 6;.....	70
Figura 30: Talude 7;.....	71
Figura 31: a) Foto frontal do talude (lado oeste) marcado pelas intrusões de sienogranito nos gnaisses granítico/granodiorito do Complexo Pinheiro Machado. b) erosão por queda de pequenos blocos causada pelo intemperismo físico. c) foto de detalhe dos minerais porfirítico resistatos de quartzo e feldspato potássico em uma matriz fina intemperizada. d) erosão por ravinas do horizonte R escavável. e) Medidas estruturais principais que condicionam a formação de blocos.....	72
Figura 32: Talude 8;.....	74
Figura 33: A) Imagem de VANT ortogonal/planta do talude. B)Foto da face do talude e das bossorocas estreitas e profundas. C) Imagem de VANT com detalhe da profundidade das bossorocas. D) Imagem de detalhe das estruturas apresentadas em C). E) Imagem à 45° da face com erosão acentuada e marcas das bossorocas. F) Detalhe do contato da bossoroca profunda	



com o topo do talude. G) Trincas no topo do talude. H) Intemperismo nas fraturas do maciço – início da esfoliação esferoidal. I) Planos de fraturas J) Plano de fraturas com faces do maciço bem marcadas. L) Marcas de alteração nos contatos onde a água percola. M) Horizonte R escavável frágil. N) Planos de fratura associados à erosão. O) Estereograma das fraturas do talude. ....	76
Figura 34: Talude 9;.....	78
Figura 35: Talude 10;.....	79
Figura 36: Talude 11;.....	80
Figura 37: Talude 12;.....	81
Figura 38: Talude 13;.....	82
Figura 39: Talude 14;.....	83
Figura 40: Talude 15;.....	84
Figura 41: a) Foto aérea do talude. b) Foto aérea de detalhe da ruptura circular. c) Foto aérea das trincas da ruptura. d) Movimento de massa pela ruptura curva. e) Panorâmica frontal do talude rompido. f) e e) Detalhe da superfície de ruptura marcada pela formação de blocos e presença de eluviação no horizonte B. h) e i) Formação de estrutura tipo piping pela infiltração da água da chuva. j), l) e m) diques alterados formados por argila plástica. n) e o) túneis de percolação de água pelas cavernas sub superficiais. p) minerais resistentes de quartzo e k-feldspato centimétrico visíveis na ruptura. ....	86
Figura 42: Talude 16;.....	87
Figura 43: Talude 17;.....	88
Figura 44: Talude 18;.....	89
Figura 45: Talude 19;.....	90
Figura 46: Talude 20;.....	91
Figura 47: a) Foto frontal do talude. b) Detalhe dos processos de eluviação e iluviação/strips. c) detalhe das camadas pedológicas. d) Marcas dos veios. e) Presença do horizonte C/R. ....	92
Figura 48: Talude 21;.....	93
Figura 49: Talude 22;.....	94
Figura 50: Talude 23;.....	95
Figura 51: Talude 24;.....	96
Figura 52: Talude 25;.....	97
Figura 53: Talude 26;.....	98
Figura 54: a) presença de limo, vegetação rasteira e água na face do talude. b) horizonte B espesso e coeso; .....	99

Figura 55: Talude 27;.....	100
Figura 56: a) detalhe da ruptura. b) e c) horizonte C e R com cavernas formadas pelo processo de piping. d) Monzogranito grosseiro alterado. e) material carregado dos horizontes superiores.....	101
Figura 57: Talude 28;.....	102
Figura 58: Talude 29;.....	103
Figura 59: Talude 30;.....	104
Figura 60: a) erosão dos horizontes superficiais. b) perfil da ruptura. c) dique argiloso – plástico - no horizonte C friável. d) erosão dos horizontes no plano do escorregamento inserido no horizonte C com a ocorrência de dique argiloso. ....	105
Figura 61: Talude 31;.....	106
Figura 62: Talude 32;.....	107
Figura 64: A) Sistema de fraturas dos Taludes rochosos plotados no estereograma. B) Diagrama de rosetas das fraturas. ....	109
Figura 65: A) Foto frontal do Talude 8. B) Foto de detalhe do local de coleta das amostras (8A) para ensaio de Cisalhamento direto e de adensamento (coordenadas -30°43'13" e -51°36'30"). C) Difratoograma da amostra 8A. ....	111
Figura 66: A) e B) Amostra 8B, coleta nos planos de falha preferencial, onde ocorre acúmulo de argila proveniente da alteração do feldspato; C) Difratoograma da amostra 8B.....	112
Figura 67: A) Coleta da amostra 8C, B) Detalhe do local da coleta no horizonte R escavável alterado, e C) Difratoograma da amostra 8C.....	113
Figura 68: A) Foto do ponto de coleta da amostra do material do dique (15A), B) Foto de detalhe da amostra 15A; C) Difratoograma de raios X da amostra 15A.....	114
Figura 69: A) Foto detalhe do local de coleta da amostra 15C, horizonte C ou R escavável; B) Foto de detalhe da amostra 15C; C) Difratoograma da amostra 15C.....	115
Figura 70: A) Foto frontal do talude 30. B) foto frontal de detalhe do dique mais ao sul e sem rompimento ou erosão. C) e D) Fotos da amostra 30-A, dique fortemente alterado, prevalecendo argila na fácies e entre os minerais resistidos altamente intemperizados. E) Difratoograma da amostra 30 <sup>a</sup> .....	116
Figura 71: A) e B) Fotos de detalhe da coleta da amostra 30B, material granular fortemente alterado, com aspectos e estruturas reliquias da rocha fonte, mas com uma leve coesão e baixa resistência-friável; C) Difratoograma da amostra 30B;.....	117

Figura 72: Imagens do MEV da Amostra 8A; Q = quartzo, C = caulinita e Ag = argilominerais. A) Aumento de 100x; B) Aumento de 500x; C) Aumento de 1000x; D) Aumento de 2000x. ....	118
Figura 73: Imagens do MEV da amostra 8B; Q = quartzo, C = caulinita. A) Aumento de 200x; B) Aumento de 400x; C) Aumento de 600x; D) Aumento de 1000x.....	119
Figura 74: Imagens do MEV da Amostra 8C; Ag = argilominerais, I = illita e M = montmorilonita. A) Aumento de 45x; B) Aumento de 500x; C) Aumento de 1000x; D) Aumento de 2000x. ....	119
Figura 75: Imagens do MEV da Amostra 15A; Ag = argilominerais. A) Aumento de 100x; B) Aumento de 1000x; C) Aumento de 2000x; D) Aumento de 4000x.....	120
Figura 76: Imagens do MEV da amostra 15C; C = caulinita; M = montmorilonita. A) Aumento de 100x; B) Aumento de 500x; C) Aumento de 1000x; D) Aumento de 2000x....	121
Figura 77: Imagens do MEV da amostra 30A; C = caulinita. A) Aumento de 500x; B) Aumento de 1000x; C) Aumento de 2000x; D) Aumento de 4000x.....	121
Figura 78: Imagens do MEV da amostra 30B; C = caulinita; I = illita; M = montmorilonita. A) Aumento de 500x; B) Aumento de 1000x; C) Aumento de 2000x; D) Aumento de 4000x. ....	122
Figura 79: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante da amostra 8 com umidade natural. ....	124
Figura 80: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical da amostra 8 com umidade natural. ....	124
Figura 81: Envoltória ao Cisalhamento de Pico da amostra 8 com umidade natural. ....	125
Figura 82: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante da amostra 8 inundada. ....	126
Figura 83: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical da amostra 8 inundada. ....	126
Figura 84: Envoltória ao Cisalhamento de Pico da amostra 8 inundada. ....	127
Figura 85: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante da amostra 8 rompida inundado. ....	128
Figura 86: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical da amostra 8 rompida inundado. ....	128
Figura 87: Envoltória ao Cisalhamento de Pico da amostra 8 rompida inundada. ....	129

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Elementos do Intemperismo. Modificado de Bastos (1991); .....	24
Tabela 2: Características principais dos horizontes de um perfil de alteração de rochas ígneas e metamórficas e respectivas soluções típicas para taludes de corte (Modificado de DEERE; PATTON, 1971 apud FILHO; VIRGILI, 2013).....	27
Tabela 3: Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento. (BASTOS, 1991). .....	30
Tabela 4: Tabela com minerais e seus respectivos ângulos $2\theta$ . Em negrito o ângulo principal (Fonte: WebMineral, 2017); .....	110
Tabela 5: Amostras do ensaio de Cisalhamento Direto;.....	123

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>1.1 OBJETIVOS</b> .....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>2.1 INTEMPERISMO</b> .....	21
<b>2.1.1 Intemperismo físico</b> .....	22
<b>2.1.2 Intemperismo químico</b> .....	23
<b>2.1.3 Formação do perfil de intemperismo</b> .....	24
<b>2.2 EROSÃO E ERODIBILIDADE DOS SOLOS</b> .....	30
<b>2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO</b> .....	32
<b>2.4 CLIMA E PLUVIOMETRIA</b> .....	32
<b>2.5 GEOLOGIA</b> .....	35
<b>2.5.1 Geologia Regional</b> .....	35
<b>2.5.2 Geologia Local</b> .....	41
<b>2.6 PEDOLOGIA</b> .....	41
<b>2.7 TIPOS DE MOVIMENTOS</b> .....	47
<b>2.7.1 Quedas</b> .....	48
<b>2.7.2 Tombamento</b> .....	48
<b>2.7.3 Escorregamento</b> .....	49
<b>2.7.4 Escoamentos e corridas</b> .....	50
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	52
<b>3.1 ÁREA DE ESTUDO/OBJETO</b> .....	52
<b>3.1.1 Localização</b> .....	54
<b>3.1.2 Mapa altimétrico e de declividade</b> .....	55
<b>3.2 ENSAIO GEOTÉCNICO</b> .....	56
<b>3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X</b> .....	58

3.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	59
3.5	VANT .....	60
4.	ANÁLISE DO MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DOS TALUDES .....	61
4.1	GEOLOGIA ESTRUTURAL .....	108
5.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS X .....	109
5.1.1	Talude 8: talude-tipo .....	110
5.1.2	Talude 15 .....	113
5.1.3	Talude 30 .....	115
5.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA (MEV).....	117
5.3	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO – TALUDE TIPO.....	122
5.3.1	Ensaio de CD com umidade natural.....	123
5.3.2	Ensaio de CD inundado.....	125
5.3.3	Ensaio de CD rompido inundado .....	127
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	130
6.1	DESCRIÇÃO DOS EVENTOS CAUSADORES DOS PROBLEMAS DE ESTABILIDADE ENCONTRADOS NOS TALUDES DE CORTE DO TRECHO..	130
6.2	CORRELAÇÃO DE EVENTOS COM MATERIAIS DE ORIGEM.....	132
7.	CONCLUSÕES.....	135
8.	REFERÊNCIAS.....	137



## 1. INTRODUÇÃO

As condições precárias observadas em grande parte das estradas/rodovias do estado do Rio Grande do Sul fazem necessário e urgente que se dê atenção redobrada à questão. Frente aos investimentos reduzidos dos governos federal e estadual em rodovias ao longo dos próximos anos para reverter este quadro, é importante a realização de estudos e pesquisas sobre o tema, visando um melhor aproveitamento das verbas destinadas este fim. Segundo pesquisas realizadas pelos meios de comunicação, o Rio Grande do Sul tem o pior desempenho em conceito de qualidade das rodovias entre os estados da região Sul (CNT, 2016). Com a possibilidade de retomada do crescimento da economia, existe a expectativa de retorno/continuação da execução das obras e duplicações para melhorar a infraestrutura rodoviária. Muitas BRs não sustentam mais a demanda do tráfego, tornando-se extremamente perigosas e causando prejuízos aos que dependem estrategicamente do transporte terrestre. Ademais, diante da grande importância das rodovias para o desenvolvimento da nação – estima-se que mais de 60% da produção nacional seja escoada através de rodovias –, é fundamental que estas obras sejam bem projetadas e executadas, já que problemas de engenharia impactam em desperdício financeiro e risco de vida.

Este trabalho será focado na análise da estabilidade de taludes de cortes rodoviários da BR-116, entre os municípios de São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro. A pesquisa inicia por uma análise dos taludes em campo, com base na geologia e na pedologia ao longo do trecho entre os quilômetros 332 e 477 da duplicação da BR-116, procurando as relações e as condicionantes que controlam as instabilidades dos taludes. Devido ao papel fundamental no escoamento da produção não só do Rio Grande do Sul, mas também de outros estados do Brasil que enviam sua produção para o Porto de Rio Grande, é importante que as obras atendam a demanda, se mantenham estabilizadas e em condições de uso e de segurança.

O presente trabalho fez uma avaliação geológico-geotécnica, por inspeção, de 32 taludes de corte existentes ao longo do trecho de duplicação da pista de rodagem da rodovia BR116/RS entre os municípios de São Lourenço do Sul e Barra do Ribeiro. O levantamento geológico-pedológico mostrou que a geologia dos materiais e as suas estruturas reliquias presentes condicionam o comportamento dos cortes, tendo sido identificados cerca de 3 tipos gerais de comportamento relacionados ao diferentes complexos geológicos e pedológicos.



Os principais problemas encontrados foram: i) erosão hídrica superficial acentuada dos materiais expostos, levando a ravinações sérias e rupturas superficiais, chegando por vezes a estruturas do tipo bossoroca; ii) variabilidade acentuada de intemperismo ao longo dos cortes em materiais saprolíticos, com presença marcante de estruturas reliquias e tombamentos de blocos e cunhas; iii) transições verticais (estratos) marcadas com níveis de solo muito alterado sobre materiais menos intemperizados, criando níveis de água suspensos transitórios e rupturas rasas rotacionais.

Em função de tal avaliação por inspeção local, realizada de forma sistemática, foi escolhido um talude considerado representativo dos eventos de erosão hídrica e física, envolvendo processos avançados e complexos que tendem a ocorrer ao longo do tempo nos demais taludes de corte devido aos eventos naturais de pluviometria. Este talude denominado/numerado de Talude 8 é objeto de um estudo mais detalhado, envolvendo ensaios de caracterização mineralógica (DRX e microscopia eletrônica) e geotécnica (caracterização física com ensaios de laboratório do tipo cisalhamento direto de umidade natural e inundado) para determinação dos parâmetros de resistência dos materiais. Demais taludes foram foco de ensaios por MEV e DRX por representarem eventos-tipo clássicos da região/trecho. Os resultados mostram que há uma correlação importante entre o comportamento dos materiais/taludes e a origem dos materiais, principalmente a granulometria e suas estruturas reliquias causadoras dos eventos mais críticos, sendo enfatizada a variabilidade lateral dos materiais, a influência da pedogênese em alguns materiais devido ao clima, especialmente os provenientes dos metagranitóides do Complexo Granítico Pinheiro Machado.

## **1.1 OBJETIVOS**

O principal objetivo do presente trabalho é a descrição e caracterização dos fatores condicionantes para a ruptura de taludes de corte do trecho Sul (São Lourenço do Sul a Barra do Ribeiro, RS, Brasil) da BR-116.

O objetivo principal foi suportado por dois (2) objetivos específicos: i) as investigações de campo, e ii) as investigações de laboratório (cisalhamento direto). Tais objetivos secundários foram definidos de modo a permitir o entendimento das relações geológico-

pedológicas com os processos geotécnicos que levam à ruptura de um grande número de taludes no trecho sul da BR-116, entre Barra do Ribeiro e São Lourenço do Sul (RS, Brasil).

A investigação de campo ocorreu por meio da análise dos taludes, do estudo das relações geológicas e pedológicas que condicionam as instabilidades situadas ao longo do trecho entre os quilômetros 332 e 477. O mapeamento geotécnico executado incluiu o levantamento da localização geográfica (coordenadas geográficas, e km da rodovia) de todos os cortes de estrada (taludes) existentes no trecho escolhido, bem como o levantamento fotográfico e a coleta de dados como altura, inclinação, extensão, cota altimétrica, medidas estruturais, medidas e descrição dos horizontes pedogenéticos, problemas geotécnicos, comportamento mecânico, fluxo de água superficial, nível do lençol freático, descrição geológica, descrição do nível de intemperismo e coleta de amostra para ensaios laboratoriais.

As investigações laboratoriais incluíram ensaios geotécnicos (geomecânica), difratometria de raios X e MEV. As descrições de campo permitiram selecionar os talude 8, 15 e 30 como taludes representativos para análise mineralógica através de difração de raios X e caracterização dos argilo-minerais por meio de microscópio eletrônico de varredura. O talude 8 ainda contou com ensaios de cisalhamento direto para caracterização geomecânica do horizonte C.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A pesquisa de estabilidade de taludes e encostas naturais envolve diferentes áreas de conhecimento e formação, como Engenharia Civil e de Minas, Geografia, Geologia, Geologia de Engenharia, Geomorfologia, Mecânica dos Solos e das Rochas (FILHO; VIRGILI, 2013), Agronomia e Hidráulica (BASTOS, 1991), assim acumulando extenso desenvolvimento técnico-científico, cada qual com seu enfoque. O entendimento de todas estas áreas são fundamentais para análise e desenvolvimento dos estudos, fazendo com que as equipes e/ou profissionais tenham noções e estudem uma gama de informações multidisciplinares.

Os Taludes são, em teoria, massas ou fragmentos de solo ou rocha, sob influência de três campos de força distintos: forças devidas ao peso dos materiais; forças devidas ao

escoamento de fluídos; e forças relativas à resistência ao cisalhamento. As duas primeiras atuam como forças que tendem a movimentar a massa de material geológico na direção da força de gravidade. A resistência ao cisalhamento, por sua vez, atua como um elemento estabilizante dos movimentos. Explica-se, diante disso, a necessidade de que estas três forças estejam em harmonia entre si (FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Geralmente utiliza-se o termo encosta para taludes naturais (encostas de morros e vales) e taludes para inclinações em que o homem teve alguma participação importante (cortes ou aterros). A denominação de ruptura ou instabilidade de taludes envolve muitos fenômenos em diversos materiais, em diferentes tipos de clima e geologia. Os movimentos apresentam variação nas velocidades e extensão lateral e longitudinal (BRESSANI, 2008). Outro ponto importante é a interferência da geomorfologia, podendo exercer um realce das rupturas conforme for.

Neste capítulo os temas principais abordados serão a geologia regional, pedologia, intemperismo e erosão, o intemperismo atuante em rochas graníticas e gnaisses até a formação dos perfis de alteração, o clima regional e a erodibilidade dos solos. A revisão tem como objetivo abordar as áreas e seus eventos causadores de erosão através dos estudos de trabalhos consolidados na literatura. Os aspectos de granulometria, composição de argila/plasticidade e estruturas reliquias tem um enfoque mais específico por condicionarem os problemas ocorridos na área alvo do presente trabalho.

## **2.1 INTEMPERISMO**

Bastos (1991) comenta que, para entender melhor o comportamento geotécnico dos solos é necessário conhecer a origem e os processos envolvidos na formação destes, no caso de solos residuais, formados pelo intemperismo das rochas sem que ocorra transporte dos materiais inconsolidados, os aspectos relacionados a gênese destes materiais são determinantes nas “suas propriedades de engenharia”. Para a geologia, o intemperismo é o conjunto de modificações de ordem física (desagregação) e química (decomposição) que as rochas sofrem ao aflorar na superfície da Terra, sendo os produtos do intemperismo, a rocha alterada/saprolito e o solo, sujeitos aos outros processos do ciclo supérgeno – erosão, transporte e sedimentação – os quais acabam levando à denudação continental, com o consequente aplainamento do relevo (TEIXEIRA et. al, 2009). Na agronomia, o

intemperismo é o processo natural de formação dos solos, classificado como “horizontes pedogenéticos” formados pela ação dos processos de formação do solo em uma sequência vertical de camadas mais ou menos paralelas à superfície. Para a geologia de engenharia o intemperismo é a alteração das rochas, seguida pelo transporte e/ou sedimentação dos materiais intemperizados, causada pela exposição destas à superfície da Terra onde são submetidas a condições ambientais bem diferentes daquelas onde se formam, entrando em contato com novos processos, em relação as condições originais.

As rochas graníticas são formadas geralmente e/ou predominantemente por sílica ( $\text{SiO}_2 > 66\%$ ). Os minerais principais são quartzo, feldspato potássico e mica muscovita. Podem apresentar também como minerais comuns plagioclásio e mica biotita. Os Gnaisses também são formados preferencialmente por feldspato e quartzo, e em menos percentagem composicional por biotita, anfibólios, granada, piroxênio e cordierita. O intemperismo é o evento onde estes minerais se ajustam as novas condições da superfície do planeta (BASTOS, 1991).

### **2.1.1 Intemperismo físico**

Intemperismo físico é o processo que causa a desintegração física e mecânica das rochas, fragmentando-as, separando os grãos minerais com coesão (cimentação) sem, ou quase sem, a interferência de processos químicos, assim aumentando a superfície específicas das partículas minerais, sem modificar a sua estrutura cristalina. Este tipo de processo transforma rochas coesas e duras em rochas/saprolitos friáveis e frágeis. As variações de temperatura durante os dias e noites e estações do ano, a mudança de umidade e intensidade de pluviometria modificam as rochas através da expansão e contração dos minerais.

O intemperismo físico fragmenta a rocha e expõe partes antes inacessíveis à água e ao ar, facilitando o intemperismo químico. Os diferentes minerais possuem coeficientes de expansão distintos, variando a intensidade do intemperismo físico com a composição das rochas e a variação do clima da região. Salomão e Antunes (2013) comentam que a diferença de condutividade calórica observada nas superfícies das rochas em relação à sua massa interna mais protegida tendem a causar tensões laterais que podem contribuir para o fenômeno do desprendimento das camadas superficiais da rocha, fenômeno conhecido

como “esfoliação esferoidal”. Este processo é muito comum em rochas graníticas e gnaisses da região sul por causa do clima subtropical.

### 2.1.2 Intemperismo químico

O intemperismo químico é o conjunto de processos de decomposição das rochas por *reações químicas* de superfície entre a rocha, a atmosfera e a água. Predominante nas regiões de clima úmido e quente, onde estas reações são aceleradas e atingem profundidades bem maiores, como em clima tropical e subtropical, é por este processo que se formam os solos (BASTOS, 1999). Dentre os vários processos químicos como hidrólise, hidratação, redução, oxidação, ácidos e intemperismo biológico, o primeiro é o mais importante em regiões de clima tropical e subtropical (SALOMÃO; ANTUNES, 2013). Um dos principais processos de alteração química em rochas graníticas e gnaisses é a “hidrólise parcial”. No feldspato potássico, em presença de água e ácido carbônico, ocorre a entrada de cátion hidrogênio substituindo o cátion potássio – totalmente eliminado, a sílica não lixiviada recombina-se com o alumínio, formando uma fase secundária, a *caulinita*. Este processo é chamado de alitização (processo de intemperismo específico das regiões tropicais e subtropicais úmidas, que resulta na lixiviação de silicatos e de sílica, formando-se hidratos de alumina).

Bastos (1999) explica os processos químicos ocorridos no intemperismo de rochas graníticas. O autor cita a oxidação como um dos processos mais comuns e um dos primeiros a ocorrer na zona de intemperismo, onde é caracterizado pela passagem do ferro bivalente dos compostos das rochas para ferro trivalente. Este processo é facilmente perceptível, pois é caracterizado pela coloração avermelhada nos perfis de solos dos horizontes em processo de intemperismo. Em terrenos bem drenados, a coloração avermelhada está associada na formação do mineral hematita por oxidação. Como a oxidação, nos processos de intemperismo químico de minerais metálicos, é comum o processo de alteração por redução. Estes dois processos estão principalmente vinculados aos elementos químicos *ferro* e *manganês*. A hidratação ocorre combinando água com outros elementos químicos por adsorção, ficando ligada a superfície mineral. A hidrólise age após a hidratação, quebrando a estrutura cristalina pela reação dos íons  $H^+$  e  $OH^-$  dissociados na água com os íons dos minerais. A hidrólise é influenciada principalmente pelo clima e se caracteriza nas rochas

de composição granítica em climas subtropicais tropicais pela transformação do feldspato potássico (ortoclásio) em argilominerías – primeiramente em illita e posteriormente em caulinita. A ação biológica tende a aumentar o gás carbônico dissolvido na água, aumentando sua acidez e acelerando o processo de intemperismo. A investigação do grau de intemperismo e alteração dos minerais que compõem as rochas intemperizadas e solos residuais pode ser feita por petrografia, difração de raios X e microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Ainda segundo Bastos (1999), os principais elementos resultantes do intemperismo podem ser divididos em minerais resistatos e precipitados da solução aquosa. Os minerais resistatos são resistentes ao intemperismo com pouca ou nenhuma movimentação e alteração no perfil de intemperismo. Já os elementos precipitados são de fácil movimentação em solução.

*Tabela 1: Elementos do Intemperismo. Modificado de Bastos (1991);*

Elementos Residuais	Elementos Precipitados
- minerais resistentes ao intemperismo: quartzo, magnetita, ilmenita, hematita e até mesmo mica muscovita; - Produtos do intemperismo: argilominerais, óxidos de ferro e alumínio e sílica em meio ácido.	- óxidos - sais - sílica coloidal

As reações do intemperismo químico acontecem primeiramente dentro das descontinuidades das rochas, sendo as arestas e os vértices dos blocos mais expostos mais susceptíveis a ação do intemperismo químico que as faces. Por este motivo se formam matações pelo processo de “esfoliação esferoidal”. Na região do Batólito Pelotas é comum a formação destes matações em profundidade, sendo expostos em cortes de estrada ou através da erosão superficial dos horizontes A e B dos solos.

### 2.1.3 Formação do perfil de intemperismo

A sequência de camadas resultantes da decomposição das rochas começou a ser estudada no Brasil no século passado, e desde então, tem sido objeto de estudo de muitos

autores devido à grande importância que estes materiais exercem nas atividades do homem, como por exemplo, na engenharia (PASTORE; FORTES, 2013). Muitos destes autores propuseram sua própria terminologia para designar as diferentes camadas de um perfil de alteração, gerando, com isto, uma ampla variedade de termos, os quais, ainda hoje, não foram padronizados. Esta padronização é fundamental para haver uma linguagem comum na Geologia de Engenharia que possibilite correlações entre as camadas e as propriedades de modo mais preciso (PASTORE; FORTES, 2013).

Há duas décadas, Pastore (1995 apud OLIVEIRA, 2006) propôs uma padronização de terminologia para descrição de perfis de alteração baseada, sobretudo, na análise das várias proposições existentes sobre o assunto e nos conceitos adotados em 1985 pelo Comitê de Solos Tropicais da ISSMGE (International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering). Esta proposição tem por objetivo padronizar as descrições de sondagens, escavações e afloramentos. Na Geotecnia, ou Geologia de Engenharia, o autor caracteriza sete horizontes num perfil de alteração completo.

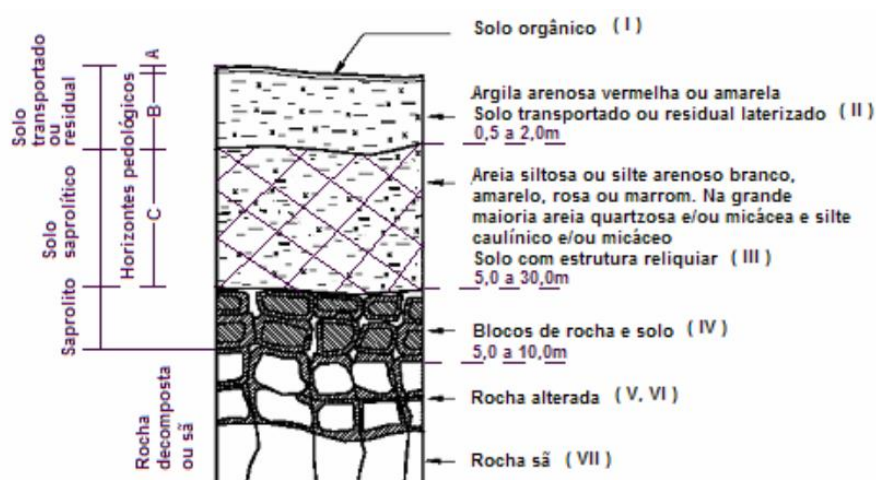


Figura 1: Perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de relevo suave (PASTORE, 1995 apud OLIVEIRA 2006);

O clima tropical também induz uma série de processos de intemperismo nos materiais, acelerando outros processos de evolução pedogenética que alteram gradativamente as características dos solos. Assim, temos solos bem evoluídos, com mineralogia e agregação bem evoluídas (solos eluviais) e solos intemperizados a partir de uma rocha-mãe (solos saprolíticos). Além disso, nas condições brasileiras muitas vezes

existe uma transição gradual entre os solos saprolíticos (ou solos residuais jovens), a rocha intemperizada e a rocha sã. Isto pode causar problemas de descrição e de avaliação de estabilidade. O comportamento mecânico nestes casos passa a ser mais importante, e este comportamento em geral é função da resistência do material, do nível de tensões e do intemperismo da massa e das fraturas/descontinuidades (BRESSANI, 2008).

A formação do perfil de intemperismo, ou horizontes de alteração, são desenvolvidos pelo intemperismo químico e físico, comentados anteriormente. Para a geotecnia, a camada superficial, constituída essencialmente por minerais secundários ou transformados, como os argilominerais, óxidos e hidróxidos de ferro, manganês, titânio, e alguns casos de alumínio, recebe o nome de solo maduro. A camada superficial, que ainda guarda características herdadas da rocha de origem, é denominada solo residual jovem ou solo saprolítico. Este solo fica localizado acima da rocha alterada, ou também chamada de regolito, onde os minerais exibem sinais evidentes de alteração com perdas de brilho e cor. Esta seção vertical é chamada de perfil de intemperismo (SALOMÃO; ANTUNES, 2013).

Deere e Patton (1971, apud PASTORE; FORTES, 2013) definem perfil de alteração como a sequência de camadas com diferentes propriedades físicas, formadas *in situ* por processos de alteração física e química, e que permanecem recobrando o maciço rochoso. Pastore e Fortes (2013) comentam que a terminologia para perfis de intemperismo proposta por estes autores tem sido a mais utilizada na Geologia de Engenharia. Seguem figura e tabela com as características dos principais horizontes de solos residuais graníticos e de sua correspondente metamórfica:



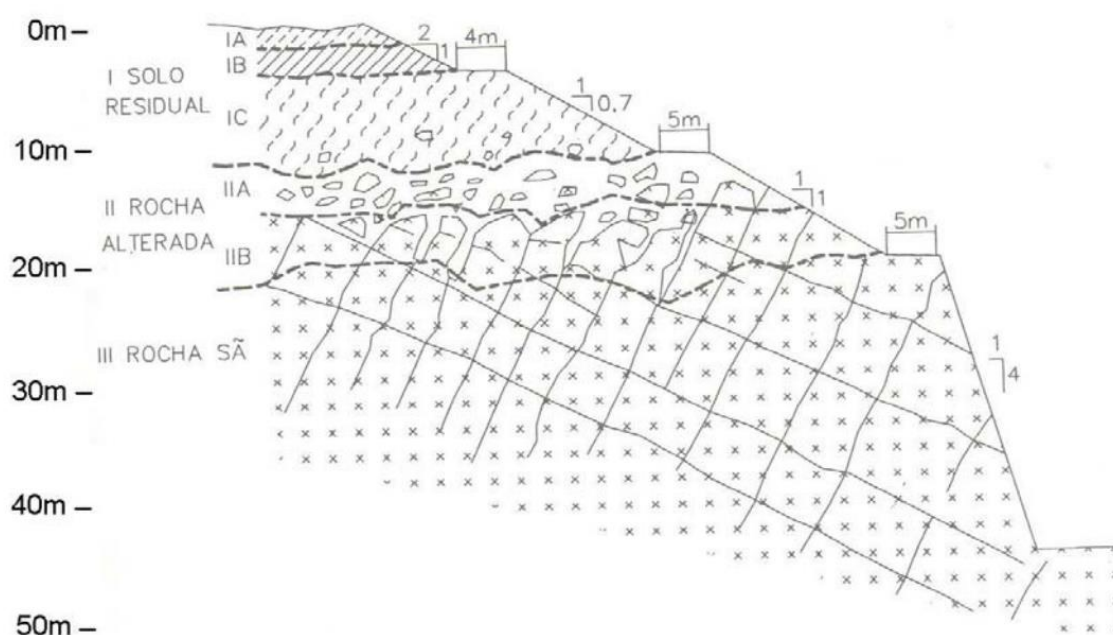


Figura 2: Perfil de alteração proposto por Deere e Patton (1971 apud OLIVEIRA, 2006);

Tabela 2: Características principais dos horizontes de um perfil de alteração de rochas ígneas e metamórficas e respectivas soluções típicas para taludes de corte (Modificado de DEERE; PATTON, 1971 apud FILHO; VIRGILI, 2013).

	Zonas	Descrição	RQD (%)	Recuperação (%)	Permeabilidade Relativa	Resistência Relativa
I- SOLO RESIDUAL	IA- HORIZ. A	Solo superficial, com raízes e matéria orgânica; zona de lixiviação e eluviação; pode ser porosa	-	0	Média a alta	Baixa a média
	IB-HORIZONTE B	Zona tipicamente rica em argila; concentrações de Fe, Al e Si, possibilidade de cimentação; ausência de estruturas relíquias.	-	0	Baixa	Baixa (alta se cimentando)
	IC-HORIZONTE C	Presença de estruturas relíquias; graduação para materiais siltosos e arenosos; menos de 10% de matações; frequentemente micáceo.	0 ou não aplicável	0 a 10	Média	Baixa a média (influência das estruturas relíquias)
II- ROCHA ALTERADA	IIA- TRANSIÇÃO	Altamente diversificada, desde materiais terrosos a rochosos; areia comumente fina a grossa; 10 a 95% de matações; alteração esferoidal presente.	Variável, em geral 0 a 50	Variável, 10 a 90%	Alta (perdas d'água comuns)	Média a baixa (se as estruturas relíquias forem de baixa resistência)
	IIB- ROCHA PARCIALMENTE ALTERADA	Material rochoso, rocha branda a dura; descontinuidades em diversos graus de alteração; feldspatos e micas parcialmente alterados.	50 a 75	>90	Média a alta	Média a alta
	III-ROCHA SÃ	Descontinuidades sem alteração e películas de óxidos de ferro; feldspatos e micas inalteradas	>75 ou >90	Em geral, 100	Baixa a média	Muito alta

BASTOS (1999), baseado no exemplo de AZAMBUJA (1970), descreve que, quando as rochas graníticas são submetidas aos processos de intemperismo físico, a rocha aumenta seu diaclasamento, ocorrendo uma possível desagregação granular nas paredes das fendas que facilita a penetração de água de infiltração, responsável pelos processos químicos do intemperismo tanto na superfície da rocha, como nas paredes das fendas, evidenciado pela perda de brilho na superfície intempérica. Esse processo tende a formar matacões junto ao solo saprolítico. Com a intensificação do intemperismo, estes matacões desaparecem, ficando somente uma massa areno-argilosa, que ainda mantém as feições das rochas. Devido a isto, o horizonte C se torna formado predominantemente por quartzo e feldspato potássico ainda pouco decompostos. Assim, ficam existindo duas camadas sobrepostas à rocha inalterada, uma formada por matacões e blocos de rocha e uma superior, composta por um solo areno-argiloso.

O autor explica que depois, o intemperismo é somente químico e chega a um estágio em que todo o feldspato decompõe-se em argila, óxidos e cátions, permanecendo inalterados os grãos de quartzo. Esta camada é chamada de horizonte B na pedologia. Em sua parte superior, a camada pode ser formada por um manto de matéria orgânica, proveniente dos processos biológicos, sendo classificado como horizonte A. É caracterizado por sua cor escura (preto acinzentado) e pequena espessura em comparação aos outros horizontes do solo (fig. 3).

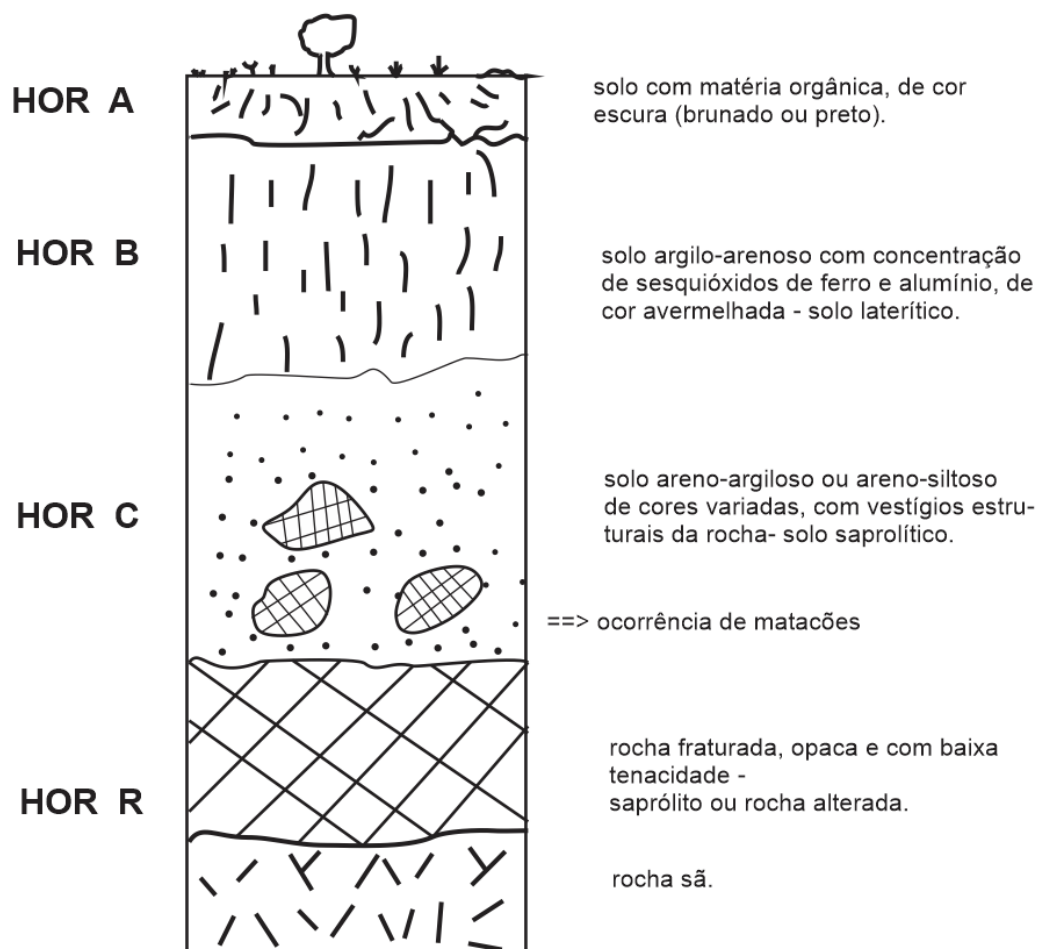


Figura 3: Representação de um perfil de intemperismo para rochas graníticas (BASTOS, 1991).

BASTOS (1991) faz uma descrição simples e concisa sobre os processos de perfil de alteração típicos em solos residuais de granitos em áreas de mesmo clima da área de estudo do presente trabalho:

*“É destacado nos solos formados de granitos, gnaisses e migmatitos do sul do Brasil, o processo pedológico de podzolização. Deste, resulta, entre outros, o perfil pedologicamente classificado como PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO. O processo é caracterizado pela eluviação de óxidos, sais, colóides e principalmente argilas pelo horizonte B, que o torna nitidamente mais argiloso que o horizonte A.*

*Outro perfil pedológico formado destas rochas, de ocorrência significativa na região do Escudo Cristalino Sul-Riograndense, é o perfil LITOLICO. Neste, condições desfavoráveis de formação do horizonte subsuperficial (B), resultam em perfis de intemperismo com sequencias de horizontes A, C e R ou até mesmo A e R”.*

## 2.2 EROÇÃO E ERODIBILIDADE DOS SOLOS

A erosão do solo é um fenômeno de degradação ambiental, que começa com pequenos eventos, e caso não seja interrompida de início com manutenção ou intervenção, agrava-se naturalmente com o tempo. O efeito erosivo das águas sobre o taludes de corte e aterro pode ser condicionado pela ausência ou deficiência de revestimento, por um sistema de drenagem superficial não eficiente ou por uma compactação inadequada da superfície do talude de aterro (RODRIGUES, 1995 apud RODRIGUES; LOPES, 2013). Bastos (1999) defende que a erodibilidade, particularizada como a susceptibilidade a erosão hídrica por fluxo superficial concentrado, é uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade pelo grande número de variáveis intervenientes.

Um dos maiores problemas de engenharia envolvendo cortes de estradas está relacionado com a erosão dos materiais que compõem as camadas geológicas e os horizontes pedológicos dos taludes e encostas. A erodibilidade é somente um fator entre os demais que influenciam no grau de erosão dos solos e rochas. A erosão dos solos é abordada pelas grandes áreas do conhecimento que estudam os solos, a engenharia envolvida com materiais geológicos, fluxo hidráulico e geologia. Bastos (1999) apresenta o enfoque de cada área no estudo da erosão na tabela abaixo.

*Tabela 3: Enfoque de estudos sobre erosão por diferentes áreas do conhecimento. (BASTOS, 1991).*

ÁREA DO CONHECIMENTO		ENFOQUE
AGRONOMIA	Física dos solos	Estudo de características físicas, químicas e mineralógicas que influenciam a erodibilidade dos solos dos horizontes superficiais e estudo de modelos de previsão de perda de solo;
	Manejo e conservação dos solos	Estudo do impacto de técnicas de cultivo e manejo no processo erosivo;
HIDRÁULICA	Hidráulica de Canais	Estudo da erosão localizada dos solos pelo fluxo d'água em estruturas hidráulicas (p.ex. canais em terra);

GEOLOGIA	Geologia de Engenharia	Estudos concentrados no diagnóstico ambiental da erosão, nas condicionantes geológicas e geomorfológicas à erosão regional e no relato de obras para controle da erosão
ENGENHARIA	Engenharia Geotécnica	Ainda limitada abordagem ao problema da erosão. Poucos trabalhos na modelagem dos mecanismos de erosão e em critérios de avaliação da erodibilidade de solos.

Caso a erosão ocorra por influência não somente das águas superficiais, mas também dos fluxos d'água subsuperficiais, em que se inclui o lençol freático, tende a gerar o processo de erosão interna ou piping, levando a eventos conhecidos por voçoroca ou boçoroca. O termo boçoroca provém do tupi *mboso 'roka*, gerúndio de *mboso 'roz*, romper ou rasgar (INFANTI; FORNASARI, 2013).

Rodrigues e Lopes (2013) explicam que o processo começa com a erosão laminar, lavando a superfície do solo de forma difusa, sem formar canais persistentes. Sua evolução da origem a erosão em sulcos aproximadamente paralelos. O alargamento e aprofundamento de tais sulcos, com o tempo, pode propiciar o desenvolvimento de reentrâncias, cavidades ou pequenas cavernas, que podem provocar escorregamentos, aumentando a gravidade do problema. Os autores ainda comentam que os taludes de corte, constituídos por diferentes camadas de solos, rochas alteradas ou por rochas sedimentares, com diferentes suscetibilidades à erosão propiciam o desenvolvimento da erosão diferenciada. E concluem dizendo que o avanço da erosão nas camadas inferiores menos resistentes, favorece a instabilização de blocos das camadas superiores”.

O estudo da erodibilidade leva em consideração a inclinação dos taludes, podendo tal medida influenciar no comportamento geotécnico da obra. Bastos (1999) comenta que a erosão superficial será nula em duas ocasiões extremas, horizontal – onde não há fluxo - e vertical – onde a precipitação do talude é quase nula. O autor explica que, para inclinações maiores do que 30° e 45° (ângulo de erosão máxima em taludes do Estado de São Paulo), a infiltrabilidade do solo supera o fluxo da chuva com rara formação de escoamento

superficial, entretanto a capacidade de destacamento das partículas é maior, e o inverso ocorre para baixas inclinações, onde o fluxo superficial aumenta, porém a capacidade de deslocamento das partículas pelo salpicamento e fluxo concentrado é maior.

## **2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

Conforme Bastos (1999), a Resistência ao Cisalhamento é o nível mais alto de investigação indireta da erodibilidade. O autor explica que a resistência ao cisalhamento, em particular a coesão na parte superficial do talude,<sup>0</sup> é a propriedade dos solos que melhor explica física e mecanicamente a resistência à erosão por fluxo d'água superficial dos solos residuais não saturados. Ainda indica, para a avaliação de erodibilidade, a realização de ensaios de cisalhamento direto, mais simples e mais adequados à obtenção dos parâmetros de resistência necessários – como é feito no presente trabalho.

Inicialmente, nos estágios primários do intemperismo, a resistência ao cisalhamento é controlada principalmente pela resistência das descontinuidades presentes na rocha. Com o avanço do intemperismo, a resistência ao cisalhamento dos solos saprolíticos passa a condicionar o comportamento mecânico do perfil, entretanto, as descontinuidades reliquiárias presentes na massa de solo ainda exercem grande influência (IRFAN & WOODS, 1988; SOWERS, 1963; BLIGHT, 1989, SANDRONI, 1985 e DEARMAN *et. al.*, 1978 apud BASTOS, 1991). Já os solos pertencentes aos horizontes superficiais possuem propriedades de resistência muito ligadas aos processos pedológicos de formação, como laterização, gleização, plintização e outros (BASTOS, 1991).

## **2.4 CLIMA E PLUVIOMETRIA**

Guidicini e Iwasa (1976) estabeleceram uma correlação entre chuva e escorregamentos em nível nacional. Eles propuseram faixas de periculosidade para deflagração dos escorregamentos a partir dos coeficientes do ciclo e do episódio, utilizando o registro pluviométrico acumulado até a data do episódio de chuva intensa, o registro pluviométrico do próprio episódio e a média anual de pluviosidade da região. Com as análises feitas por esses autores, foi possível concluir que eventos pluviométricos superiores a 20% da

pluviosidade média anual são indicativos de alta possibilidade de deflagração de escorregamentos significativos (FILHO; VIRGILE, 2013) demonstrando a importância do estudo da pluviometria para o dimensionamento de taludes.

Schuster (1996) também comenta que os movimentos de taludes parecem estar aumentando devido ao desmatamento, crescente urbanização e crescente precipitação pluviométrica em certas áreas causadas por mudanças climáticas. A geologia tem um papel muito importante nos movimentos de taludes, entretanto, os movimentos de taludes são respostas do material (solo ou rocha) às trocas de geometria, condições de contorno, poro-pressões ou parâmetros de resistência ao cisalhamento ao longo do tempo (LEROUEIL, 2001 apud BRESSANI, 2008).

O clima do estado do Rio Grande do Sul é definido com temperado, ou subtropical úmido, conforme o IBGE (2002). O ano é definido por quatro estações bem definidas, com invernos de moderados frios a frios e verões quentes. Inverno, primavera, verão e outono são separados por estações intermediárias com aproximadamente três meses de duração. As chuvas bem distribuídas ao longo do ano e das estações, com concentrações em meses específicos. Devido às diferenças altimétricas, o clima do estado divide-se ainda, segundo a classificação climática de Köppen, nos tipos Cfa (temperatura média do mês mais quente ultrapassa os 22 °C, característico de regiões mais baixas) e Cfb (clima subtropical úmido com verões amenos, característico das serras sudeste e nordeste) (STE, 2009).

Com relação às precipitações, o Estado apresenta uma distribuição relativamente equilibrada das chuvas ao longo de todo o ano, em decorrência das massas de ar oceânicas que penetram no Estado. Entretanto, o volume das chuvas é diferenciado nas regiões. Ao sul, a precipitação média situa-se entre 1.299 e 1.500 mm. Ao norte, a média está entre 1.500 e 1.800 mm, com intensidade maior de chuvas a nordeste do Estado, especialmente na encosta do planalto, local com maior precipitação no Estado devido aos processos orográficos de formação de chuvas (STE, 2009). Na figura abaixo pode-se observar que a precipitação média anual na área de influência varia entre 1500 a 1600 mm.

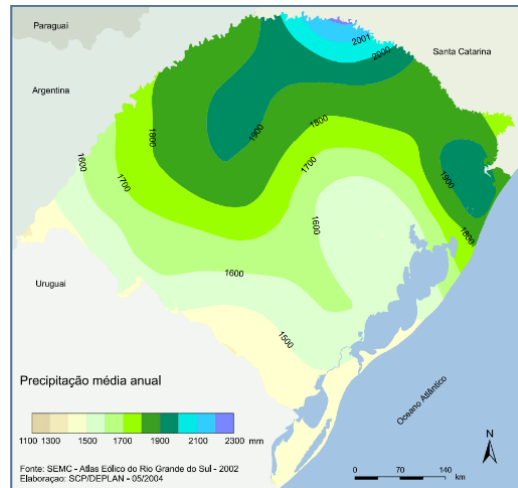
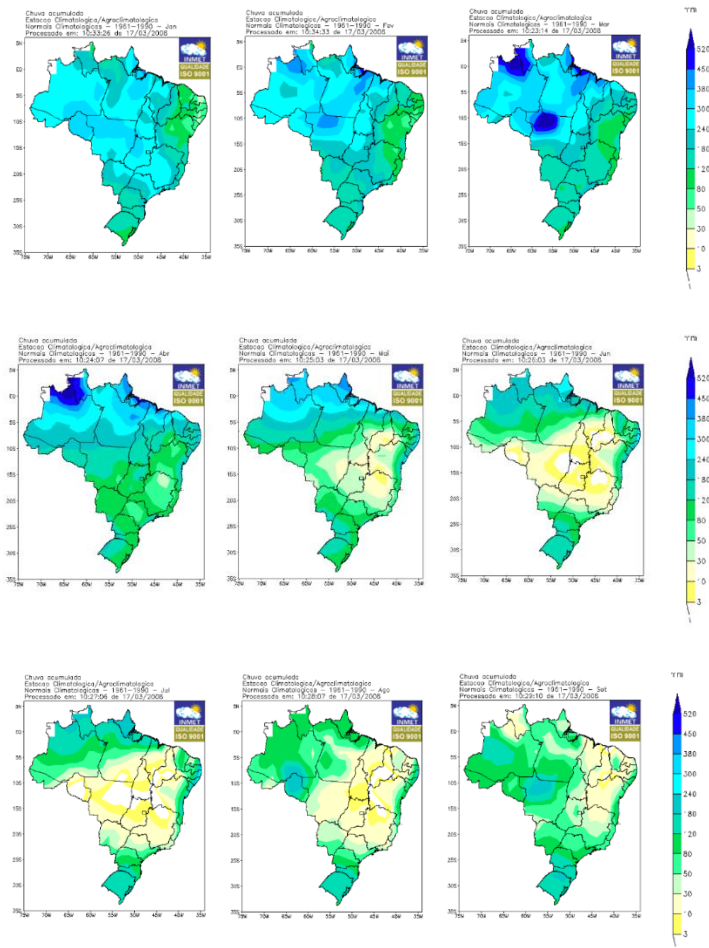


Figura 4: Precipitação média anual segundo a Secretaria de Meio Ambiente do Estado (STE, 2009).





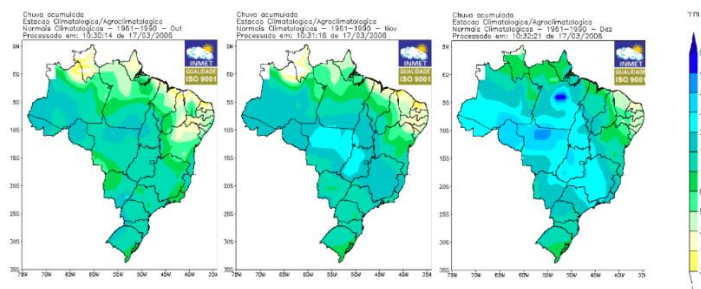


Figura 5: Normais Climatológicas – 1961/1990 – Chuva Acumulada (STE, 2009).

Analisando as figuras acima, o Estado do Rio Grande do Sul possui uma variação da chuva acumulada em torno de 180 e 80 mm em cada mês do ano. Os meses de abril, maio, novembro e dezembro são os que registram menor quantidade de chuva acumulada na área de influência da obra da duplicação, estando dentro de uma média de 80 mm acumulados durante o mês. Os meses de fevereiro, junho, julho, agosto e setembro representam os meses com maior média de chuva acumulada, em torno de 180 mm mensais.

## 2.5 GEOLOGIA

### 2.5.1 Geologia Regional

A evolução geológica do Rio Grande do Sul faz parte do registro geológico das rochas que compõem a superfície do nosso estado, o qual registra uma longa história de colisões entre continentes, assoalhos oceânicos, arcos de ilhas, vulcões e bacias sedimentares (WILDNER; LOPES, 2010). As rochas mais antigas do estado são da era Paleoproterozóica e estas abrangem os registros geológicos que remontam as idades que variam entre 2,5 a 1,6 bilhões de anos e estão arranjadas geologicamente junto com rochas do Neoproterozóico, com idades entre 1,0 a 542 milhões de anos e distribuídas por toda a região central e oriental do estado gaúcho (WILDNER; LOPES, 2010).

Ainda conforme os autores Wildner e Lopes (2010), o Estado do Rio Grande do Sul está constituído por uma porção central, onde predominam rochas cristalinas designadas como Escudo Sul-Riograndense (ESRG), este último representado por um conjunto de rochas graníticas, gnaisses de várias composições, rochas metamórficas e associações de

sedimentos e rochas vulcânicas antiga sendo esta região designada como Província Mantiqueira, originalmente descrita por Almeida et al., (1977, apud WILDNER; LOPES, 2010), onde o Rio Grande do Sul representa o seu segmento extremo sul.

Segundo os autores acima citados, a Província Mantiqueira se estende do NE do Uruguai até o sul da Bahia ou a Serra do Mar, entre Santa Catarina, Paraná, Rio de Janeiro e Espírito Santo, até ser truncada pelo Cráton do São Francisco. A província é limitada com os sedimentos da Planície Costeira, a leste, correspondentes à porção aflorante da Bacia de Pelotas e a norte e a oeste com os sedimentos e derrames basálticos da Bacia do Paraná (fig. 6).

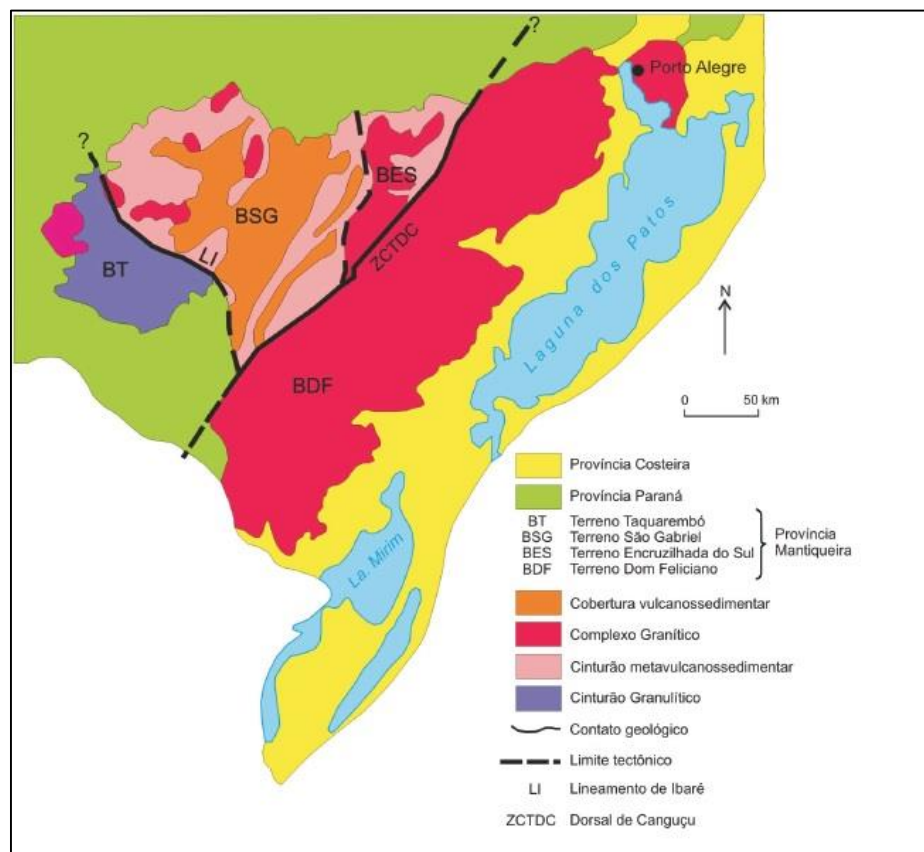


Figura 6: Compartimentação tectônica do Escudo Sul-Rio-Grandense. (Modificado de Soliani, 1986, in Wildner e Lopes, 2010).

Chemale Jr. et al. (1995b), menciona que são caracterizadas três grandes unidades geotectônicas brasileiras que compõem a parte meridional da província (fig. 7), sendo elas: Cinturão Vila Nova, Cinturão Tijucas, e Cinturão Dom Feliciano, além de sequências vulcâno-sedimentares com plutonismo associado (WILDNER; RAMGRAB, 1999).

O cinturão Vila Nova, é constituído por gnaisses tonalíticos e granodioríticos, rochas meta-vulcano-sedimentares da fácies xisto-verde a anfibolito, unidades máfico-ultramáficas e granitos foliados (CHEMALE Jr.et al., 1994b). O cinturão Tijucas é situado entre os cinturões Vila Nova e Dom Feliciano, compreende rochas supra-crustais da fácies xisto-verde a anfibolito além de exposições de rochas gnáissicas do Proterozóico Inferior (WILDNER; RAMGRAB, 1999). O cinturão Dom Feliciano corresponde a um típico terreno granito-gnaiss-migmatito, que foi deformado durante o evento Dom Feliciano (CHEMALE JR.et al., 1994b), onde está inserido o Batólito Pelotas.

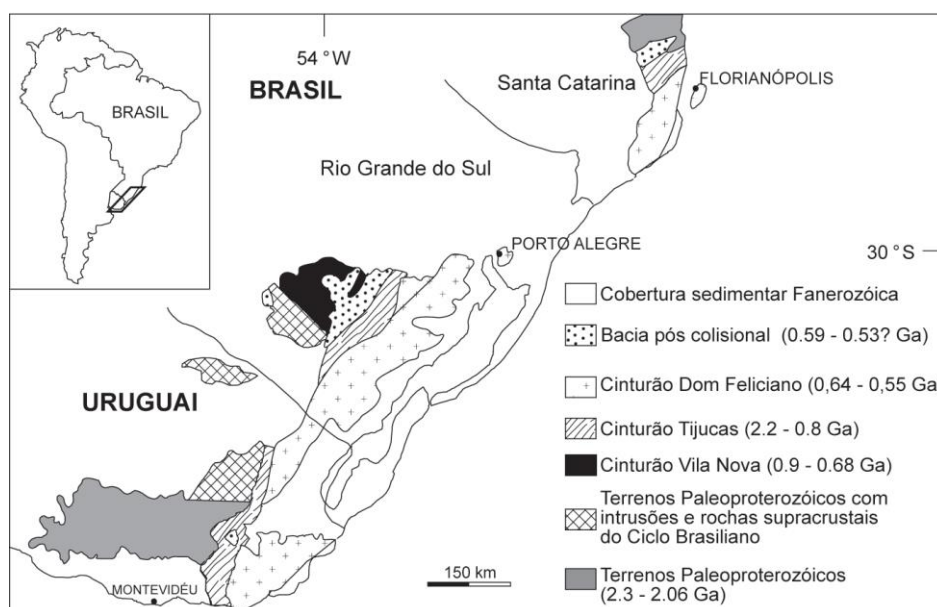


Figura 7: Localização do Cinturão Dom Feliciano e do Batólito Pelotas no contexto geotectônico do sul do Brasil e Uruguai (Modificado de Chemale Jr., 2000, in Philipp 2005).

Conforme Philipp et al. (2002), o Batólito Pelotas é um complexo plutônico composto de várias suítes, cujo magmatismo teve duração de cerca de 70 Ma (entre 630 Ma e 570 Ma), resultado da adição de distintos processos tectônicos durante o Ciclo Brasileiro/Pan-africano e se postulam para os mesmos modelos que envolvem a subducção de litosfera oceânica em margem continental espessa (Figueiredo et al. 1990, Philipp 1990, Fragozo Cesar 1991, Philipp et al. 1993, Philipp 1998, Chemale Jr. 2000, apud PHILIPP et al., 2002), colisão continental (HARTMANN et al. 2000, PHILIPP; MACHADO, 2001) e reativação de fontes mantélicas modificadas em períodos tardi a pós-colisional. Está situado na porção leste do Escudo Sul-Rio-Grandense, possui cerca de 370 km de extensão e 80 a

120 km de largura, e em 2006, Philipp, Machado e Chemale o definiram como um complexo granítico-gnáissico e sete suítes, seis graníticas e uma sienítica. Mais de 130 corpos estão expostos nesta unidade que ocupa uma área aproximada de 37.000 km<sup>2</sup> (fig 8).

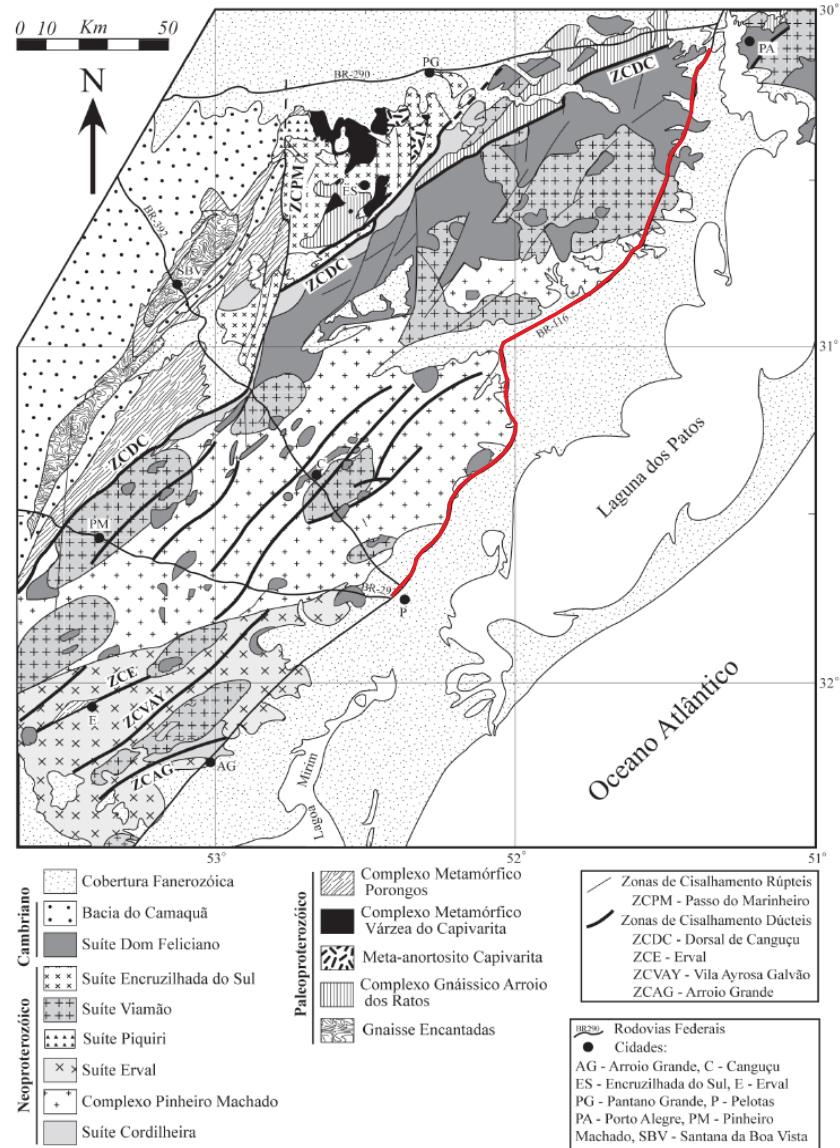


Figura 8: Mapa geológico do Batólito Pelotas com detalhe da faixa de duplicação da BR-116 (vermelha), apresentando as principais unidades graníticas e zonas de cisalhamento dúcteis transcorrentes (Modificado de PHILIPP et al., 2007).

Philipp e Machado (2001 e 2007) descrevem o complexo e as suítes como:

Complexo Pinheiro Machado (CPM): “Ocupa a porção central do batólito, sendo constituído por biotita granodioritos a biotita monzogranitos, de afinidade cálcico alcalina alto-K, com ocorrência subordinada de tonalitos e dioritos. Esta suíte ocupa uma faixa

*alongada na direção NE-SW na porção central do Batólito Pelotas e perfaz cerca de 30% de sua área. Corresponde a unidade mais antiga do Batólito e é a única que apresenta uma foliação de baixo ângulo. Os granitoides da CPM têm composição expandida, granodiorítica a monzogranítica, com tonalitos, dioritos e quartzo-dioritos subordinados. São rochas de cor cinza, textura equigranular hipidiomórfica média a grossa, localmente inequigranular grossa, com megacristais tabulares de feldspato potássico (1 e 3 cm), que perfazem de 1% a 3% da rocha. O plagioclásio é euédrico, de cor branca, com quartzo anédrico e biotita euédrica, esta última ocorrendo como agregados intersticiais. O feldspato potássico, subordinado, é intersticial. Os acessórios são zircão, allanita, apatita, titanita e minerais opacos.”*

*Suíte Intrusiva Erval (SIE): “Esta suíte perfaz cerca de 20% da área do Batólito Pelotas e estende-se até o Uruguai, apresentando forma alongada na direção NE-SW. As rochas desta suíte são homogêneas, textural e composicionalmente, com predomínio de biotita monzogranitos e sienogranitos subordinados. São granitos cinza claro, com plagioclásio prismático acinzentado, feldspato potássico subédrico branco a rosado, quartzo anédrico e biotita em lamelas euédricas intersticiais. Próximo do município de Arroio Grande ocorre, no contato com mármores, zonas métricas de rochas sieníticas e quartzo-sieníticas com anfibólio e clinopiroxênio.”*

*Suíte Intrusiva Viamão (SIV): “As rochas graníticas da Suíte Viamão ocorrem em várias áreas do batólito e estão caracterizadas por corpos de formas alongadas, segundo a direção N40-60°E. Normalmente com foliação magmática concordante e zonas de alta deformação nas porções de bordo. Os biotita monzogranitos e granodioritos apresentam uma afinidade cálcio-alcalina alto-K e uma típica textura porfírica marcada pelo elevado percentual de megacristais de K-feldspato envoltos por matriz equigranular hipidiomórfica. Estes granitos mostram estruturas de mistura física (mingling) e química (mixing) com rochas máficas.’*

*Suíte Piquiri (SP): “A Suíte Piquiri ocorre na região de Encruzilhada do Sul e é constituída pelo Sienitos Piquiri e Arroio do Silva. Estas rochas representam um evento magmático de natureza alcalina potássica saturada com afinidade shoshonítica.”*

*Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul (SIES): “Os corpos graníticos desta suíte se dispõem em uma faixa alongada na direção NE-SW, limitada a leste pela Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu e a oeste pelo Complexo Cerro da Árvore. A Zona de*

*Cisalhamento Passo do Marinheiro, com direção próxima de N-S, afeta os granitos desta suíte e exibe um deslocamento horizontal superior a 15 km. A composição da suíte varia de monzogranítica a álcali-feldspato granítica, com megacristais tabulares de feldspato potássico em uma matriz com cristais prismáticos e euédricos de plagioclásio branco, biotita euédrica em agregados tipo "ninhos" e quartzo globular e euédrico, ocorrendo ainda anfibólio, zircão, apatita e opacos como minerais acessórios."*

*Suíte Granítica Cordilheira (SGC): "São corpos alongados na direção N45°E, tabulares, concordantes com a Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu e posicionados sintectonicamente em relação à mesma. A composição da SGC varia de sienogranítica a granodiorítica, com muscovita, biotita, turmalina, granada, monazita, zircão e minerais opacos. Os corpos da suíte afloram extensamente desde a região de São Jerônimo-Quitéria até Pinheiro Machado. São granitos brancos a cinzentos, com pontuações escuras de biotita. A estrutura é foliada, marcada nas zonas de baixa deformação pela orientação de muscovita primária e biotita. A foliação possui duas orientações: uma subhorizontal, magmática, com muscovita orientada, e outra subvertical, tectônica, sobretudo em regiões de alta deformação, nas bordas dos corpos, sendo associada às zonas de Cisalhamento dúcteis. Os milonitos e protomilonitos contêm porfiroclastos assimétricos de feldspato potássico, plagioclásio e muscovita."*

*Suíte Granítica Dom Feliciano (SGDF): "Esta suíte é a mais jovem identificada no Batólito Pelotas. A SGDF caracteriza-se por uma grande homogeneidade composicional, estrutural e petrográfica, e presença restrita de enclaves, microgranulares e submicáceos. Sua principal ocorrência é um corpo lenticular orientado na direção N50°E, com cerca de 180 km de extensão e 15 a 45 km de largura. Os granitos da suíte são rosados a castanho claro e esbranquiçados, com predomínio de composição sienogranítica. Os minerais essenciais são microclínio subédrico e quartzo anédrico, com biotita intersticial subeuédrica, entre 1 e 4%. Os acessórios são allanita, zircão, titanita, apatita e minerais opacos, ocorrendo ainda fluorita, molibdenita e galena."*

## 2.5.2 Geologia Local

A utilização da classificação geológica em Geologia de Engenharia é fundamental, pois sem esta, não é possível estabelecer a correlação entre os diversos horizontes ou camadas de solos que ocorrem em uma determinada região (PASTORE; FORTES, 2013). Conforme o Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul (CPRM, 2006), no trecho de interesse ocorrem principalmente rochas da Suíte Granítica Dom Feliciano e do Complexo Granítico-Gnáissico Pinheiro Machado e sedimentos da cobertura Fanerozóica, com depósitos colúvio-aluviais e de planície laguna (fig. 9).

Os taludes mapeados estão inseridos nos corpos alongados da Suíte Dom Feliciano, nas Fácies Serra do Herval (2 corpos) – formados predominantemente por sienogranitos constituindo stocks grosseiramente alinhados a NE-SW - e Fácies Cerro Grande (2 corpos) – formados por monzogranitos variando entre porfirítico grosso a granular homogêneo, englobando enclaves granodioríticos a tonalíticos, e do Complexo Pinheiro Machado, formado por metagranitóides porfiríticos (2 corpos) – gnaisse granítico a granodiorítico, foliação marcante e deformação de alta temperatura, e com presença frequente de septos de paragnaisses.

## 2.6 PEDOLOGIA

Na Engenharia de Geologia, os solos são classificados em dois tipos básico, solos residuais e solos transportados. Assim como os solos residuais, a maioria dos solos transportados, inconsolidados, se formam a partir do Cenozóico, podendo estar, ainda, em processo de formação (PASTORE; FORTES, 2013). A pedogênese ocorre quando as modificações químicas e mineralógicas do intemperismo dão lugar a modificações estruturais, com reorganização dos minerais formadores do solo – principalmente argilominerais e óxi-hidróxidos de ferro e de alumínio – nos níveis superiores do manto de alteração (TEIXEIRA et. al., 2009).



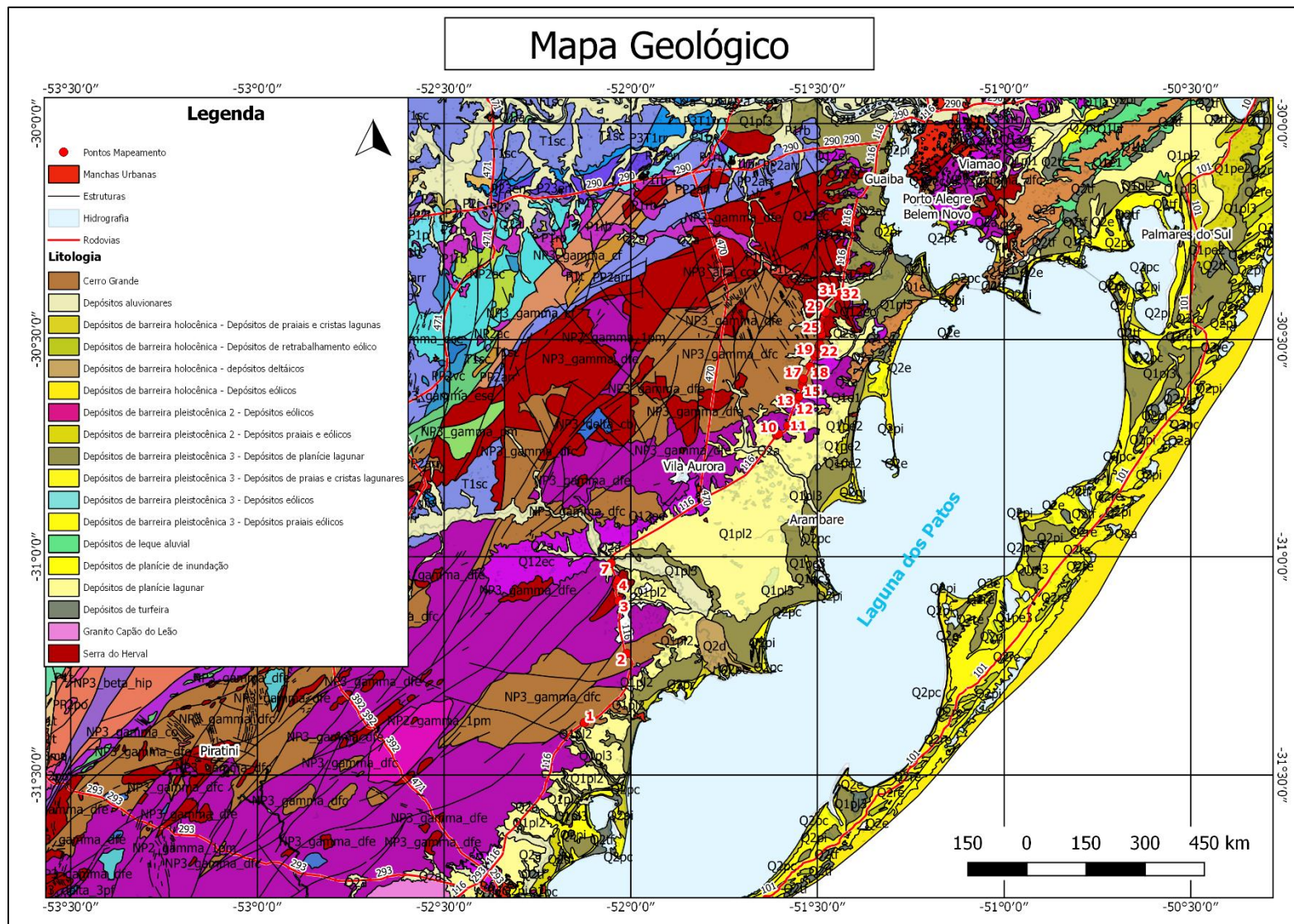


Figura 9: Mapa Geológico do trecho de interesse. (Modificado de CPRM, 2006).



*“A utilização da classificação pedológica em Geologia de Engenharia tem grande importância pela riqueza de conteúdo e informações, que podem ser obtidos através de sua interpretação. Uma das aplicações de mapas pedológicos seria, por exemplo, auxiliar na compreensão de processos de dinâmica superficial, como a erosão”* (PASTORE; FORTES, 2013).

Geralmente, só a caracterização geológica não fornece as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos, assim, existe a necessidade de utilizar em conjunto a definição pedológica tornando as classificações em unidades geotécnicas de modo a poder agrupar os diversos estratos. A utilização da classificação pedológica em Geotecnia tem grande importância pela riqueza de conteúdo e de informações, que podem ser obtidas através de sua interpretação. Um fato que deve ser levado em consideração é que grupos pedológicos distintos podem apresentar o mesmo comportamento geotécnico, e também que, de um mesmo grupo pedológico, podem existir materiais com diferentes propriedades geotécnicas (PASTORE; FORTES, 2013).

Conforme a classificação de solos da EMBRAPA (2006) e o mapa pedológico EMATER/UFRGS de Streck et. al. (2008), os taludes mapeados são formados por Argilossos, Gleissolos e Planossolos. São definidos como - Argissolos: deriva da presença de um horizonte subsuperficial mais argiloso no perfil, são solos geralmente profundos a muito profundos, variando de bem drenados a imperfeitamente drenados, apresentando um perfil com sequência de horizontes A-Bt-C ou A-E-Bt-C, onde o horizonte Bt é o do tipo B textural. Estes solos apresentam tipicamente um perfil com gradiente textural, onde o horizonte B é significativamente mais argiloso do que os horizontes A e E. Os argilosos podem ser originados de diversos tipos de materiais, tais como basaltos, granitos, arenitos, argilitos e siltitos (STRECK et al., 2008). Gleissolos: remete ao processo de gleização (dissolução do ferro) atuante em ambientes alagadiços, são solos pouco profundos a profundos, muito mal drenados, de cor acizentada ou preta, apresentando no perfil uma sequência de horizontes A-Cg, ou A-Bg-Cg ou H-Cg, onde os horizontes Bg e Cg são horizontes glei (STRECK, et al., 2008). Este tipo de solo aparece no trecho, mas não representa nenhum talude. Planossolos: o termo plano lembra áreas planas de várzeas. Os planossolos são solos imperfeitamente ou mal drenados. São encontrados em áreas de várzea, com relevo plano a suave ondulado, apresentando perfis com sequência A-E-Bt-C, com horizonte A geralmente de cor escura e o horizonte E de cor clara (tipo E alvísculo). Ambas as texturas mais arenosas, com passagem abrupta para o horizonte Bt bem mais

argiloso e adensado, de cor acizetada com ou sem mosqueados vermelho e/ou amarelos. Essa mudança abrupta de textura dos horizontes mais próximos da superfície (A+E) para o horizonte Bt define uma mudança textural abrupta pela qual se distinguem os Planossolos dos Gleissolos (STRECK et al., 2008).

Conforme o banco de dados do IBGE (2012) utilizado para elaboração do Mapa Pedológico do presente trabalho, o trecho de interesse intercepta solos classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVad3, PVad 4 e PVad6), Planossolo Háptico Eutrófico (Sxe 1, 4 e 5), Neossolo Flúvico Ta Eutrófico (RYve 2), Gleissolo Melânico Ta Eutrófico (GMve 2) e Plintossolo Háptico Distrófico (Fxd). Abaixo segue a descrição de cada unidade conforme dados do IBGE (2012):

- *Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVad3)*: Predominante na porção sul e porção norte da área de estudo do presente trabalho, esta unidade é descrita como um Argissolo de cor vermelho amarelado, distrófico abrupto e típica composição média/argilosa e média/argilosa cascalhenta com relevo moderado ondulado e suave ondulado. Ocorrem inclusões de Argissolo Vermelho-Amarelo Alítico Plíntico, de textura média/argilosa, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Úmbrico, Planossolo Háptico Eutrófico e Cambissolo Háptico.

- *Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVad4)*: Concentrado na porção centro-norte da área, são caracterizados por Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plíntico e típico, textura média/argilosa, com horizonte A moderado e relevo suave ondulado e ondulado. Apresentam como inclusões Planossolo Háptico Eutrófico típico, com textura arenosa/média.

- *Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (PVad6)*: Solo representativo da parte central da área de estudos, é descrito como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico plíntico de textura média/argilosa, com horizonte A moderado, relevo suave ondulado. Também ocorre na área Planossolo Háptico Eutrófico típico, de textura arenosa/média, horizonte A moderado e relevo plano. As inclusão são compostas por Gleissolo Háptico Eutrófico argiloso em regiões planas, características de áreas alagadiças/encharcadas.

- *Planossolo Háptico Eutrófico (Sxe 1)*: Solo predominante ao sul e leste da BR-116 na área de estudo. São caracterizados e descritos como Planossolo Háptico Eutrófico típico, textura arenosa/média e média/argilosa, horizonte A moderado e relevo plano. Ocorre

inclusões de Planossolo Háptico Eutrófico associados e Gleissolo Háptico Eutrófico típico de textura argilosa.

- *Planossolo Háptico Eutrófico (Sxe 4)*: Solo encontrado no contorno da área de interesse, à nordeste, no município de Barra do Ribeiro. É classificado como Planossolo Háptico Eutrófico típico e úmbrico, textura arenosa/média e média/argilosa, horizonte A moderado e A proeminente, com relevo plano. São compostos também por Gleissolo Háptico Eutrófico típico. Apresentam inclusões de Neossolo Flúvico Eutrófico argiloso, Gleissolo Melânico Eutrófico típico e Gleissolo Háptico Distrófico.

- *Planossolo Háptico Eutrófico (Sxe 5)*: Solo predominante ao sul e leste da área, descritos como Planossolo Háptico Eutrófico solódico, de textura arenosa/média e média/argilosa, horizonte A moderado e relevo plano. Ocorrem também Planossolo Háptico Eutrófico arênico e típico de mesma textura e Gleissolo Háptico Eutrófico. São caracterizados também por relevos planos e apresentam inclusões de Gleissolo Melânico Eutrófico devido a posição espacial de zonas baixas (úmidas).

- *Neossolo Flúvico Ta Eutrófico (GMve 2)*: Inseridos na área de planície de inundação ou maior cheia do Rio Camaquã, são caracterizados como Neossolo Flúvico Ta Eutrófico típico e NEossolo Flúvico Tb Distrófico típico, ambos com horizonte A moderado e relevo plano. Ocorrem inclusões de Planossolo Háptico Eutrófico de textura média/argilosa.

- *Gleissolo Melânico Ta Eutrófico (GMve 2)*: São solos que ocorrem somente em cotas baixas e áreas úmidas, descritos como Gleissolo Melânico Ta Eutrófico solódico, textura argilosa e média, horizonte A moderado e relevo plano. Associado, Planossolo Nátrico Órtico solódico de textura média/argilosa. Ocorrem inclusões de Planossolo Háptico Eutrófico.

- *Plintossolo Háptico Distrófico (Fxd)*: Solos de ocorrência na área de estudo somente no Município de Camaquã, onde não ocorre a presente de taludes de corte de estrada. Os solos são classificados como Plintossolo Háptico Distrófico típico, com textura média, horizonte A moderado e relevo plano associados a Plintossolo Pétrico Litoplúntico típico de textura média/média cascalhenta.

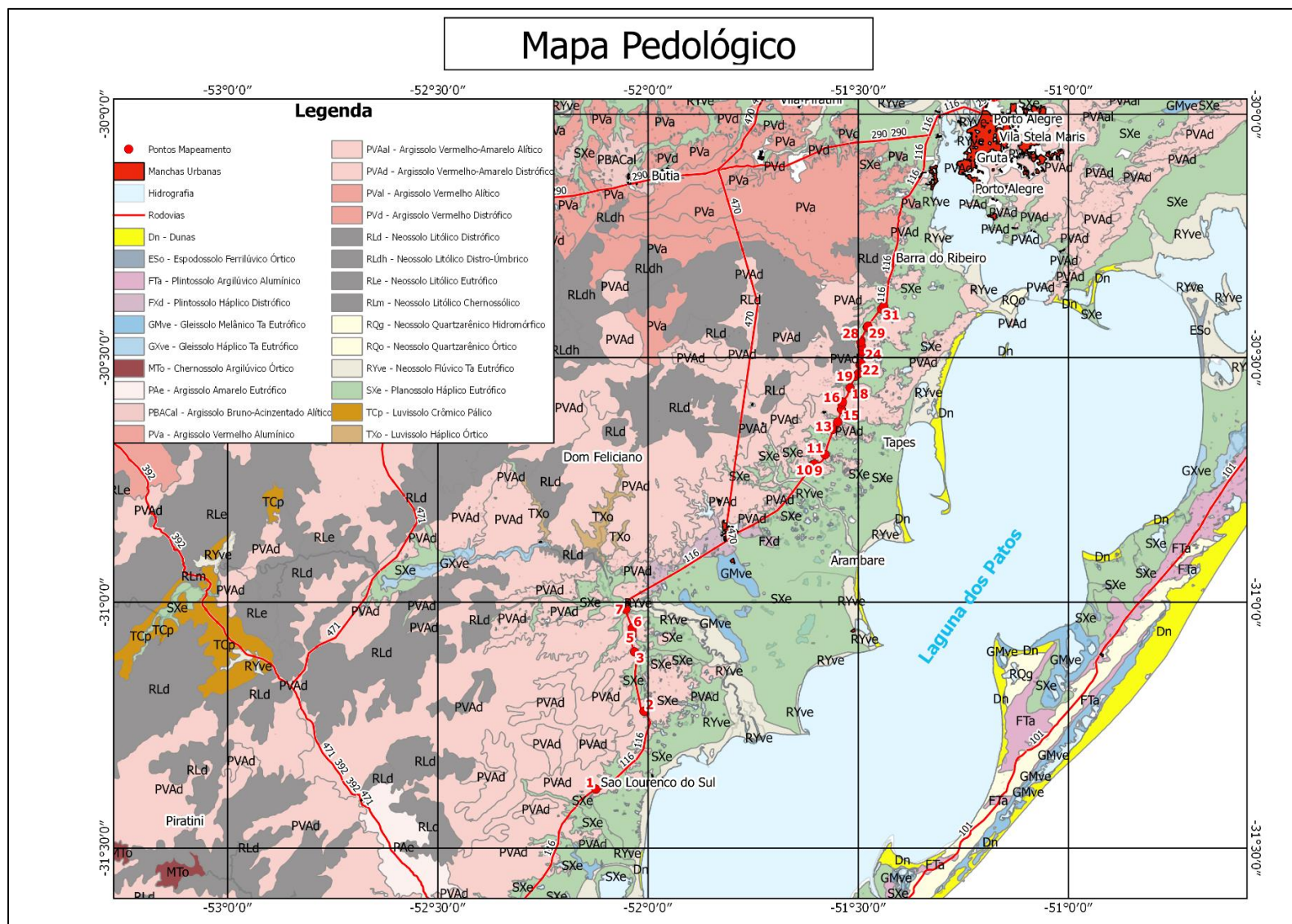


Figura 10: Mapa pedológico do trecho de interesse. (Modificado de IBGE, 2012).

## 2.7 TIPOS DE MOVIMENTOS

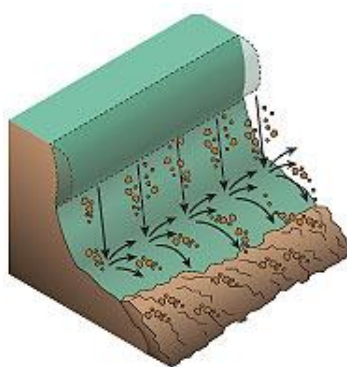
Existem muitas classificações de taludes propostas na literatura, sendo a de Varnes (1978), posteriormente um pouco modificada, a mais difundida. Para descrever de forma clara os diversos fenômenos encontrados, Varnes (1978) definiu diversos termos descritivos, com ênfase na descrição do tipo de movimento e do tipo de material. Todos os fenômenos podem ser descritos por duas palavras: uma que descreve o material e outra que descreve o tipo de movimento (CRUDEN; VARNES, 1996). Assim, segundo estes autores, os principais tipos de instabilidade são (a) quedas, (b) tombamentos, (c) escorregamentos, (d) escoamentos e corridas. Estes tipos de ruptura podem ocorrer em rocha, detritos ou terra. Embora os mecanismos descritos por Cruden e Varnes (1996) ocorram de maneira quase universal, esta classificação é baseada numa experiência tipicamente americana/europeia, que é correta mas que não considera outros tipos de materiais. Ainda, algumas instabilidades são denominadas de 'complexas' para descrever diversas composições de movimentos e se os fenômenos estão em plena operação (ativos) ou estão de alguma forma inertes (BRESSANI, 2008).

A cinemática do movimento, isto é, como o movimento se distribui através da massa rompida, não é apenas um dos principais critérios de classificação, mas também ajuda a definir a intervenção adequada para a estabilização. Bressani (2008) exemplifica: quedas ocasionais de pequenos blocos superficiais de rocha ao longo de uma estrada podem ser contidos com uma cerca de proteção ou grades. Por outro lado, o tombamento de blocos da face de uma escavação pode indicar que há descontinuidades desfavoráveis na rocha, podendo indicar possíveis movimentações de grande porte e requerendo a estabilização com tirantes ou estruturas de contrafortes.

Abaixo são descritos os movimentos difundidos na bibliografia geotécnica. As instabilidades são divididas em 4, baseadas nas modificações de Varnes (1978) e descritas em Bressani (2008):

### 2.7.1 Quedas

Uma queda inicia-se com o desprendimento de um bloco de solo ou rocha da face de um talude com pouca ou nenhuma deformação cisalhante. O movimento é muito rápido e em grande parte pelo ar. Se a inclinação do talude é maior do que  $76^\circ$  (0,25:1), em geral a queda é direta. Se o ângulo do talude é menor pode haver um ricocheteamento dos blocos ('bouncing') antes de tocar o solo.



*Figura 11: Queda, desprendimento de fragmentos do terreno, de qualquer tamanho, que caem de certa altura, em queda livre ou com qualquer outra trajetória e tipo de movimento (Infraestrutura Urbana, 2017).*

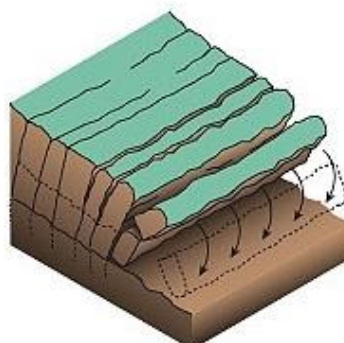
Em áreas rochosas sem cobertura de solo tem sido comum a existência de avalanches de rochas e/ou detritos. Estes movimentos conhecidos por 'Sturzstroms' são extremamente rápidos e podem atingir velocidades de até 180km/h. Existem relatos europeus de movimentos com volume total de  $109 \text{ m}^3$  (HSU, 1975 apud BRESSANI, 2008).

Quedas são tipos de regiões rochosas com planos de falhas ortogonais em taludes angulosos ou negativos, onde o desprendimento de blocos é recorrente. Minerações com planos de lavra sem o estudo prévio da geologia estrutural podem formar estes eventos. Outros fatores geológicos podem evoluir para a ocorrência de tombamentos, como por exemplo a esfoliação esferoidal em rochas sã em matriz de intemperismo.

### 2.7.2 Tombamento

O tombamento é o giro para fora do talude de uma massa de solo ou rocha sobre um ponto na base. O tombamento pode ser devido ao empuxo de material situado acima da

massa rompida ou por empuxo hidrostático ou de gelo em trincas. A velocidade é variável, de extremamente lenta a extremamente rápida.



*Figura 12: Tombamento, movimento de massa em forma de bscula com eixo na base (Infraestrutura Urbana, 2017).*

O tombamento pode ser por flexo ('flexural') ou por dobra ('chevron') dependendo da geometria e da resistncia dos materiais envolvidos. Existe tambm casos de tombamento de detritos quando a taxa de eroso no p da massa   muito alta.

### **2.7.3 Escorregamento**

Um escorregamento (ou deslizamento)   um movimento de uma massa de solo ou rocha ocorrendo predominantemente em superfcias de ruptura ou em superfcias relativamente finas de concentrao de deformaes cisalhantes. Muitas vezes o movimento aumenta a partir de uma pequena ruptura local. O material rompido pode deslizar alm do p da superfcia de ruptura cobrindo a superfcia original do terreno.

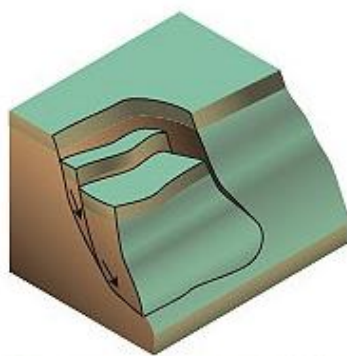


Figura 13: Escorregamento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies (Infraestrutura Urbana, 2017).

Os deslizamentos **rotacionais** são um tipo bastante comum em que a superfície de ruptura é curva ou côncava. São muito comuns em materiais homogêneos, o que é característico da maioria dos aterros, por exemplo.

Deslizamentos **translacionais** são movimentos em que a massa se desloca sobre uma superfície plana ou ligeiramente ondulada, deslizando para fora do terreno natural. Eles são relativamente mais rasos do que os deslizamentos rotacionais. A relação profundidade sobre comprimento ( $D_r / L_r$ ) para deslizamentos em solos é tipicamente menor do que 0,1. Enquanto a ruptura rotacional tende a se estabilizar após a ruptura, se a superfície plana é inclinada, o deslizamento translacional continua a mover.

Deslizamentos **compostos** são aqueles que tem uma condição intermediária. A formação de 'grabens' é típica (blocos que afundam próximo da escarpa de ruptura). Um deslizamento composto em geral indica a presença de uma camada de baixa resistência em certa profundidade.

#### 2.7.4 Escoamentos e corridas

O termo spread foi introduzido por Terzaghi e Peck (1948, apud BRESSANI, 2008) para descrever movimentos repentinos em níveis aquíferos de areia ou silte sobrepostos por camadas homogêneas de argila ou carregadas por aterros. O termo é utilizado por Cruden e Varnes (1996) para descrever a extensão lateral de uma massa de solo ou rocha combinada com um movimento geral de subsidência dentro de um material inferior mais mole. Os



spreads podem resultar de liquefação ou fluxo (e extrusão) dos materiais moles (BRESSANI, 2008).

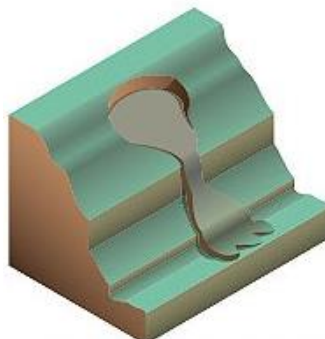


Figura 14: Escoamento, movimento de massa com propriedade de fluido, lento ou rápido (corrida) (Infraestrutura Urbana, 2017).

Existe um movimento chamado de 'mudslide' que se refere a um colapso repentino de material que se liquefaz e então se move a consideráveis distâncias com velocidades muito ou extremamente rápidas (50 a 5000mm/s ou 0.2 a 18km/h). Embora os casos mais conhecidos estejam relacionados ao material denominado loess, que é um material fino depositado em extensas áreas pelo vento, já houve uma ruptura semelhante em solo residual de arenito em Estância Velha, RS, em 1993 (BRESSANI, 2008).

Uma corrida é um movimento espacialmente contínuo no qual as superfícies de cisalhamento normalmente não são preservadas e são bastante próximas. A distribuição de velocidades na massa deslocada lembra a de um fluido viscoso. Há uma gradação de escorregamentos para corridas dependendo de quantidade de água, mobilidade e evolução do movimento (BRESSANI, 2008).

Movimentos do tipo escoamento de detritos podem se tornar corridas rápidas ou avalanches dependendo do material perder resistência, absorver água ou encontrar taludes mais íngremes. Avalanches de detritos são movimentos extremamente rápidos, de grande extensão lateral. Em 1970 houve uma avalanche no Peru envolvendo entre 50 e 100 milhões de m<sup>3</sup> de rocha, neve, gelo e solo que se deslocou com velocidades de até 100 m/s (BRESSANI, 2008).

### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho, baseado na bibliografia consultada, foi dividido em 4 (quatro) etapas. São elas; pré-campo, revisão bibliográfica, estudo de campo sobre a geologia, geomorfologia, pedologia e hidrografia/pluviometria, e por último, ensaios de laboratório e análise geotécnica. A etapa de pré-campo se constitui no mapeamento preliminar dos taludes da BR-116 no trecho de interesse, do Km 453 até o Km 333 - direção norte. O mapeamento de levantamento serve para localização geográfica de todos os cortes de estrada/taludes existentes no intervalo do trecho escolhido - principalmente contidos na pista em fase de duplicação -, levantamento fotográfico e coleta de dados como altura, inclinação, extensão, coordenadas, km da rodovia, cota altimétrica, medidas estruturais, medidas e descrição dos horizontes pedogenéticos, problemas geotécnicos, comportamento mecânico, fluxo de água superficial, nível do lençol freático, descrição geológica e descrição do nível de intemperismo. Após etapa de campo, a plotagem dos pontos em ferramenta SIG (QGS 2.18) associadas com layers - disponíveis em sites públicos - de geologia (CPRM), pedologia (IBGE) e hidrografia (CPRM) auxiliam na revisão bibliográfica sobre estes temas.

Após as descrições de campo, são definidos taludes representativos para análise da mineralógica e caracterização dos argilominerais por difração de raios-X. Os taludes/pontos selecionados são o 8, 15 e 29. Estas análises permitem descrever a causa dos processos de erosão e movimentos de massa dos taludes e sua relação com o material de origem.

#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO/OBJETO**

A BR 116, uma das mais importantes rodovias longitudinais do Plano Nacional de Viação, nasce no município de Fortaleza, capital do Estado do Ceará e percorre o Brasil de norte a sul até a fronteira com o Uruguai. Com uma extensão total de 4.534km, corta os seguintes Estados: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Ceará (STE, 2009).

No Rio Grande do Sul, a rodovia perfaz uma extensão total de 653,8 quilômetros, iniciando na divisa entre Santa Catarina/RS, na ponte sobre o rio Pelotas, Passo do Socorro,

entre Lajes e Vacaria, indo até Jaguarão. Na região sul, a BR-116 faz parte do corredor que liga o norte do Rio Grande do Sul à fronteira com o Uruguai e ao porto de Rio Grande (através da BR 392). Por isso, a importância da rodovia para o escoamento econômico no estado. No trajeto para a fronteira Sul, partindo da capital Porto Alegre, a rodovia percorre ou tangencia áreas dos municípios de Eldorado do Sul, Guaíba, Barra do Ribeiro, Mariana Pimentel, Sertão Santana, Tapes, Sentinela do Sul, Camaquã, Cristal, São Lourenço do Sul, Turucu, Pelotas, Pedro Osório, Arroio Grande e Jaguarão.

A implantação pioneira do trecho da BR-116, entroncamento BR-290 – Rio Araçá, e os serviços iniciais de pavimentação estiveram sob a jurisdição do DAER/RS até o fim do ano de 1960 e, somente em 1961 o trecho passou à administração federal (DNIT). As obras de pavimentação da pista simples existente foram executadas entre os anos de 1958 e 1959, pela empreiteira Stersul S.A. Devido a sua importância estratégica (corredor Norte-Sul), e ao fato de constituir-se na menor ligação terrestre pavimentada entre a capital Porto Alegre e a região sul (super-porto de Rio Grande), verifica-se que a rodovia está submetida à ação de intenso tráfego há mais de 40 anos (STE, 2009).

O trecho à ser duplicado está subdividido em 9 lotes independentes. As empresas responsáveis pela duplicação são: Constran (Lotes 1 e 2), Ivaí (Lote 3) Consórcio Pelotense e CC (Lotes 4 e 6), Consórcio Brasília Guaíba e Ribas (Lote 5), Sultepa (Lote 7), SBS Engenharia (Lote 8) e Consórcio Mac e Tardelli (Lote 9).



Figura 15: Localização Geográfica e delimitação do trecho de duplicação da BR-116 (STE, 2009);

### 3.1.1 Localização

A área de estudo do presente trabalho leva em consideração os taludes da BR-116 no trecho entre São Lourenço e Barra do Ribeiro. O trecho escolhido se deve pelos nítidos problemas geotécnicos ocorridos durante a fase de implantação das pistas de rodagem duplicadas pela rodovia entre Guaíba e Pelotas. A crise econômica do Brasil e o constante aumento da inflação e do dólar faz com que as obras sofram paradas de execução repentinas não programadas, prejudicando as etapas do projeto. Estas paradas impactam em toda economia em geral, afetando nos trabalhadores, prestadoras de serviço, empreendimentos que dependem do fluxo de pessoas nas obras e etc. Mas materialmente, os taludes e encostas estão entre as tipos de obras mais prejudicadas, por necessitarem de acompanhamento e execução que não podem ser interferidas antes de serem terminadas/estabilizadas.

### 3.1.2 Mapa altimétrico e de declividade

Através de ferramentas de SIG gratuitas, é possível obter informações como dados de altimetria, curvas de nível, geologia, pedologia, recursos hídricos e etc. através de bancos de dados públicos. Dados estes importantes no estudo de geotecnologias e na investigação preliminar/indireta de áreas em escala regional.

O mapa altimétrico ou hipsométrico (por cores) permite observar que a faixa de interesse de estudos da rodovia BR-116 está localizada no limite da área de maior elevação e a área da planície costeira com altitudes menores que 30 metros de elevação em relação ao nível do mar. O desenvolvimento da BR ao longo deste trecho é explicada pela facilidade da metodologia construtiva e a necessidade de menores investimentos. Somente alguns trechos a altitude do trecho é pouco mais elevada que 100 metros, principalmente nos municípios de Tapes e Barra do Ribeiro.

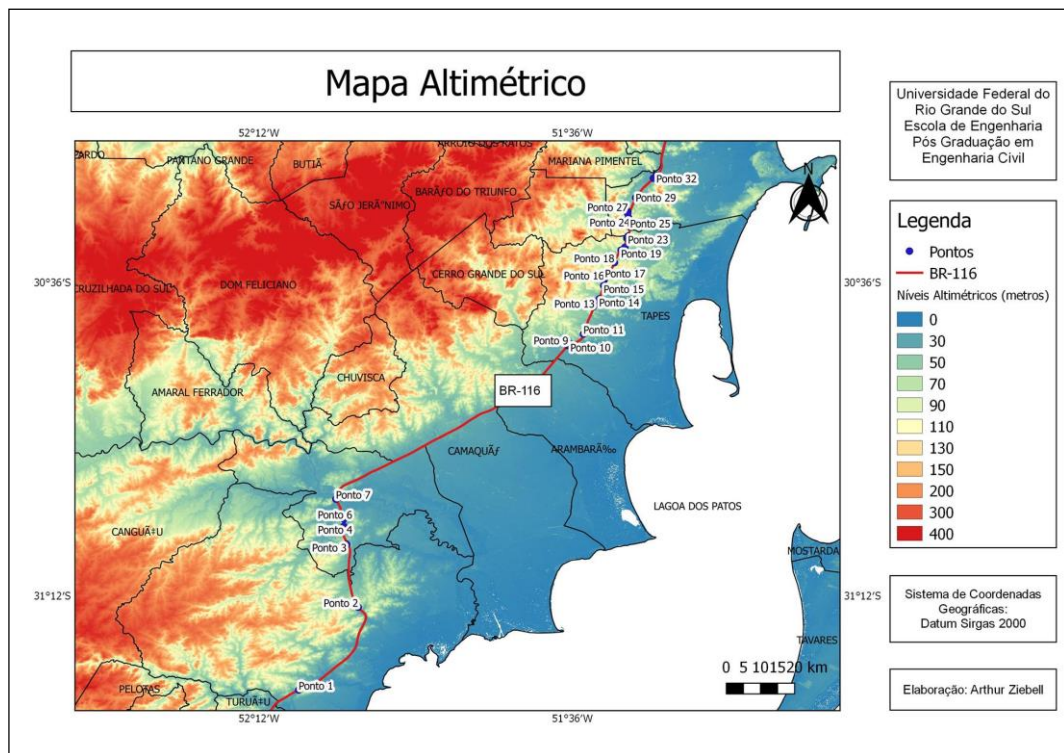


Figura 16: Mapa altimétrico da área de interesse.

A declividade da área está exposta no mapa abaixo, onde demonstra que os taludes mapeados estão distribuídos por declividades plana a forte-ondulada. Os taludes da porção sul variam de declividades plana a ondulado, e os taludes ao norte, de ondulado a forte-

ondulado. As informações de declividade auxiliam na etapa de pré-mapeamento, onde pode-se ter uma ideia sobre a geometria, dimensões dos taludes e suas condições.

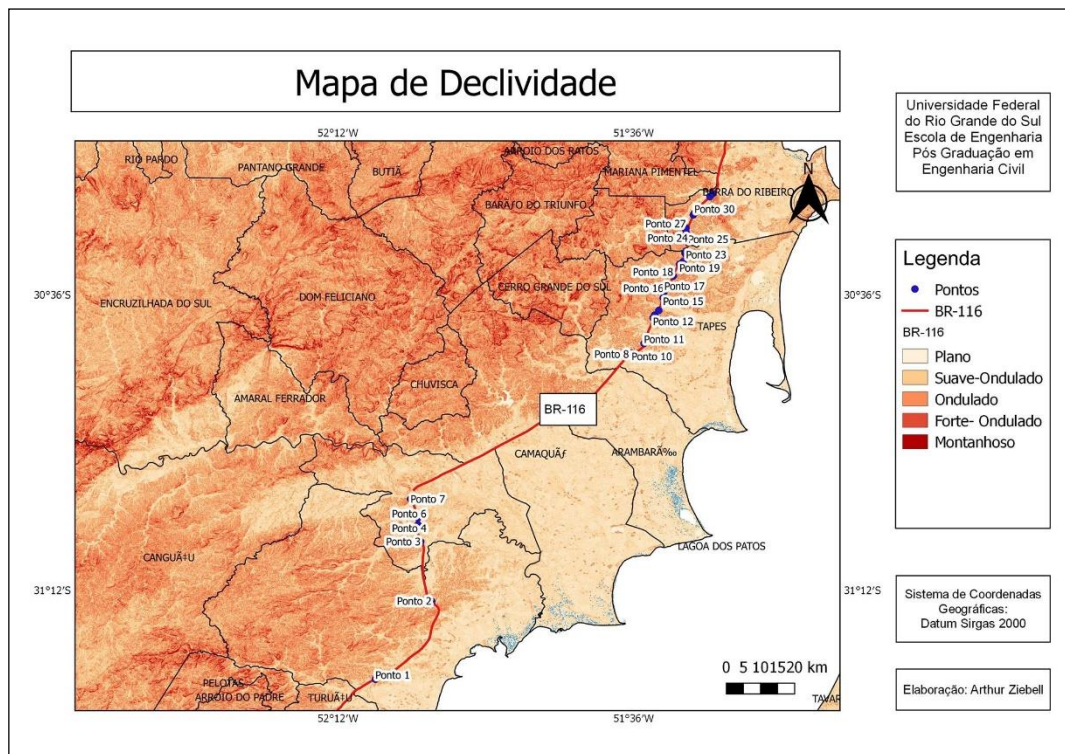


Figura 17: Mapa de declividade da área de interesse.

### 3.2 ENSAIO GEOTÉCNICO

Conforme Pinto (2006), os solos residuais caracterizam-se, inicialmente, pela sua heterogeneidade, que reproduz a heterogeneidade da rocha mãe. Esta peculiaridade, em certos casos, torna difícil a determinação de suas características por meio de ensaios de laboratório, pois corpos de prova moldados de uma única amostra podem apresentar características bem distintas. Ao se analisar grandes massas desses solos, entretanto, nota-se que a probabilidade de encontrar porções semelhantes a pequenas ou grandes distâncias é praticamente igual, de forma que grandes massas de solos residuais foram caracterizadas pelo Prof. Milton Vargas, da Escola Politécnica da USP como solos heterogeneamente homogêneos, ou homogeneamente heterogêneos, aos quais podem ser associados parâmetros médios de comportamento, como os parâmetros de resistência, por exemplo, adequadamente obtidos por meio de retroanálises de rupturas registradas. Outra



característica marcante dos solos residuais é sua anisotropia, resultante da anisotropia da rocha-mãe (PINTO, 2006).

Pela complexidade de determinação dos parâmetros mecânicos de solos residuais, são definidos dois taludes representativos para um estudo detalhado. São executados ensaios de caracterização mineralógica (DRX e microscopia eletrônica) e geotécnica (caracterização básica e ensaios de cisalhamento).

Bastos (1991) comenta que, os ensaios de Cisalhamento são eficientes mas não representativos do todo, tendo que levar em consideração outros fatores como o geológico, geométrico, pedológico, ambiental e clima. Assim, foram realizados ensaios de Cisalhamento Direto com umidade natural, umidade natural rompido e inundados. Os ensaios foram baseados nas normas BS 1377 e ASTM D 3089-9. Foram ensaiadas amostras com tensões verticais que variaram de 25 até 100 kPa para cada situação.

Apesar dos ensaios geotécnicos de cisalhamento direto não representarem diretamente a resistência à erodibilidade dos solos, a coesão e ângulo de atrito indicam uma associação com este padrão. Estes ensaios são indicados por terem resultados satisfatórios, serem simples e poderem ser ensaiados um grande número de amostras em pouco tempo.

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios de Cisalhamento Direto é um Wykehan Farrence Int pertencente ao LAGEOtec-LAPAV da Engenharia Civil da UFRGS. O equipamento consiste em uma prensa de cisalhamento direto de deformação controlada.



*Figura 18: Equipamento de Cisalhamento Direto.*

### 3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X resulta de um processo em que os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos componentes de um material, sem mudança de comprimento de onda, sendo obedecidas certas condições geométricas. Ao atingirem um material, os raios X podem ser espalhados sem perda de energia pelos elétrons dos átomos (dispersão coerente ou de Bragg). Após colidirem com o material, os raios X mudam a sua direção de propagação, porém, mantêm o comprimento de onda da radiação incidente (KAPLAN, 1978; JENKINS e SNYDER, 1996 apud SILVA, 2013). São ondas eletromagnéticas acompanhadas por um campo elétrico flutuante, assim um elétron de um átomo, influenciado pelos raios X, é excitado pelo campo elétrico tornando-se uma fonte de ondas eletromagnéticas, se dispersa o feixe incidente sobre um conjunto de planos cristalinos cuja distância interplanar é “ $d$ ” e as ondas dispersas pelos elétrons do átomo combinam-se. A combinação coerente dessas ondas, segundo Formoso (1984), chama-se difração.

O feixe difratado sem mudança do comprimento de onda, resultante da dispersão dos raios X pelos elétrons dos átomos do cristal, só é reproduzido se for satisfeita a equação de Bragg ( $n\lambda = 2d\sin\theta$ ). Deste modo, cada substância tem um padrão de difração único e próprio (KLUG E ALEXANDER, 1966 E CULLITY, 1978 apud SILVA, 2013).

$\lambda$ : comprimento de onda dos raios atômicos no retículo difratados

$d$ : distância dos átomos ou da rede de planos cristalino (distância interplanar),

$n$ : é um número inteiro correspondente à ordem de difração

$\theta$ : é o ângulo oblíquo ou ângulo de Bragg que é o complemento do ângulo de incidência da óptica geométrica.

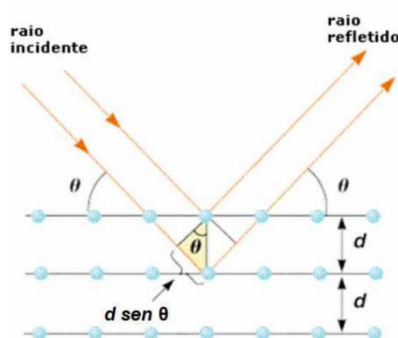


Figura 19: Representação da Lei de Bragg em duas dimensões (STOA USP, 2009 apud SILVA, 2013).



O equipamento utilizado neste trabalho é um Shimadzu Lab X XRD-6000 X-RAY DIFFRACTOMETER da Universidade Federal de Pelotas (fig. 20). O equipamento pertence ao Laboratório de Mecânica dos Materiais da UFPEL, localizado no Campus Anglo, no bairro Porto. As amostras foram analisadas no intervalo de ângulos 2 theta de 2° a 56°. Esse intervalo foi utilizado visando a não interferência de ângulos próximo a 0 (zero), e até 56° visando difratar minerais (altos ângulos) e argilominerais (baixos ângulos).



Figura 20: Imagens do equipamento de difração de raios X Shimadzu Lab X XRD-6000.

### 3.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300.000 x) e alta resolução, com imagens de caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados. O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV, essa variação de voltagem permite a variação da aceleração dos elétrons e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada. (DEGEO, 2017).

O MEV utilizado no presente trabalho pertence ao laboratório do Curso de Engenharia de Materiais da UFPEL, ligada ao CDTEC, localizado no Campus Anglo. O equipamento é um Shimadzu SSX-550 superscan (fig. 21)



Figura 21: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Shimadzu SSX-550 superscan.

### 3.5 VANT

VANT significa Veículo Aéreo Não Tripulados e serve como uma ótima ferramenta para mapear, analisar, fotografar e até mesmo fazer medidas de distância através de fotos georreferenciadas e medidas de topografia através de sensores extras. No presente trabalho, o equipamento utilizado foi o VANT Phantom 4, fabricado pela DJI. As especificações da câmera do equipamento estão listadas abaixo:

- Sensor da câmera: 12 MP (1/2.3")
- Lente: 20 mm com f/2.8 e campo de visão de 94°
- Velocidade do obturador: 8s - 1/8000s
- Tamanho máximo de imagem: 4000×3000 pixels

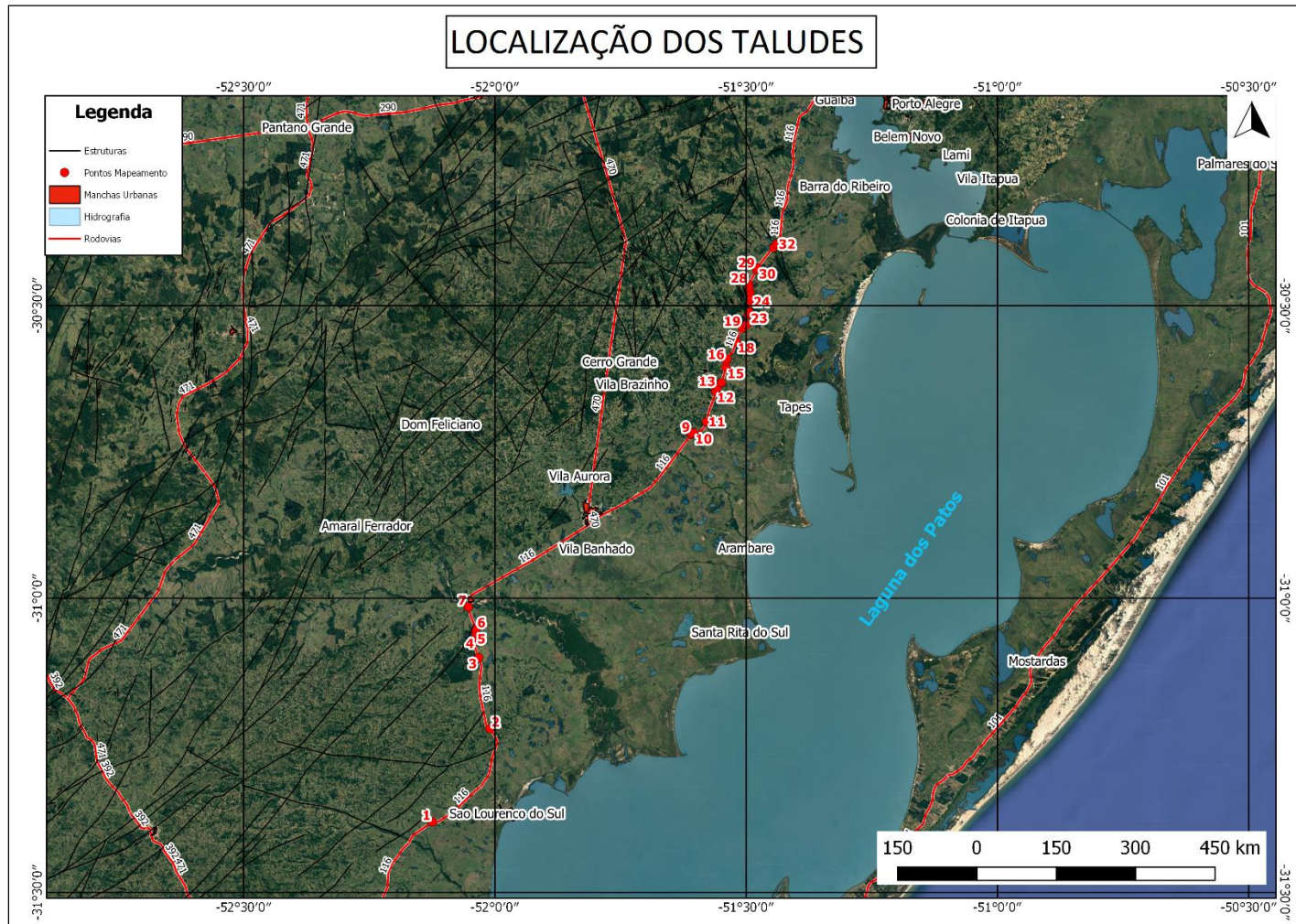
O equipamento auxiliou na captura de imagens aéreas ortogonais e perpendiculares sobre processos de intemperismo e estruturas de ruptura pós escorregamento. As imagens aéreas foram feitas em dois taludes, os quais foram escolhidos pela intensidade dos eventos dos problemas geotécnicos. Através das fotografias é possível analisar as medidas geométricas das rupturas e bossorocas, quantidade de pipping's e ter noção do contexto em que os eventos se relacionam com o talude e com o entorno.

#### **4. ANÁLISE DO MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DOS TALUDES**

Conforme a referência bibliográfica utilizada e o mapeamento preliminar feito, é possível associar os tipos de movimentos baseado na geometria dos taludes, na geologia local, pedologia e processos pedogenéticos, erosão e condições climáticas in-situ. A pesquisa inicial de referência serviu como embasamento para entendimento do comportamento mecânico, movimento de massa, erosão e erodibilidade. Assim como a geologia traz informações sobre a formação destes maciços de geomateriais, a pedologia e o clima informam como o tempo de influência nestes. As informações condensadas permitem ter um entendimento do padrão dos taludes e do seu comportamento.

A análise do mapeamento visa descrever cada talude individualmente, utilizando um padrão de informações, como por exemplo a altura, inclinação, comprimento, coordenadas geográficas, altitude, quilômetro na rodovia, geologia e pedologia. O objetivo do capítulo é ter a visão e a descrição do todo, até mesmo as suas peculiaridades, para após isto, relacionar com as causas/eventos característicos da área.

Os taludes são numerados de 1 a 32, começando pelo sul e indo em direção ao norte. O primeiro talude descrito encontra-se no município de São Lourenço do Sul e o último, em Barra do Ribeiro. Neste capítulo, é descrita a geologia local individualmente, aproveitando a descrição detalhada de cada ponto. A seguir, é apresentada a descrição de cada talude.



*Figura 22: Localização dos 32 taludes mapeados na análise geológica-geotécnica;*





Figura 23: Talude 1;

Ponto 1: Coordenadas: -31°22'49"; -52°07'26", altitude 40 m (km 476 +500m).

$l = 100 \text{ m}$	$h = 7 \text{ m}$	$\alpha = 45^\circ$
---------------------	-------------------	---------------------

O primeiro talude do levantamento está localizado no município de São Lourenço do Sul, próximo à divisa com o município de Turuçu. Conforme o levantamento da CPRM (2010), o corte está inserido nos Monzogranitos da Fácies Cerro Grande, no limite destes com os depósitos de planície lagunar da Planície Costeira. Em campo o horizonte C, com cerca de 2 metros, foi descrito como o regolito de Monzogranito com ortoclásio e pórfiros de feldspato potássico. O horizonte C está exposto somente na parte leste do talude, na porção ainda vegetada. No centro e a oeste, o horizonte C já foi erodido no sopé, sendo recoberto pelos sedimentos/solo rompido e erodido dos horizontes A e B sobrepostos. Os sedimentos que sobrepõem o horizonte C superficialmente erodido formam feições parecidas com leques aluviais compostos praticamente por sedimentos do tamanho areia. Essa feições estão distribuídas por toda superfície do terreno no sopé do talude, demonstrando um fluxo hídrico bem distribuído e uniforme pela face do corte. O material escoado do horizonte B, preenche pequenos vales/ravina escavados do material escoado previamente do horizonte C.

O contato entre os horizontes C e B é gradacional, sendo B um argissolo laranja avermelhado. O C é o horizonte R escalável sobre monzogranito porfírico com pórfiros de K feldspato menor que 1cm (fino).

Ocorrem fraturas trativas verticais no horizonte B que marcam a ruptura devido à retirada do horizonte C por erosão, causado pelo escoamento prévio desse último horizonte. O contato entre A e B também é gradacional, ou por vezes observado o perfil AEB com mais contatos com a ruptura trativa. As fratura trativas seccionam ambos os horizontes.

O processo de erosão é recente, evidenciado pela imagem panorâmica registrada em 2015, e as fotos da figura abaixo (fig. 24), feitas no ano 2016. A experiência de campo demonstra que a erosão tende a acentuar; formar ravinação no topo até virar bossorocas que acabam por solapar as áreas com vegetação e até mesmo matacões.

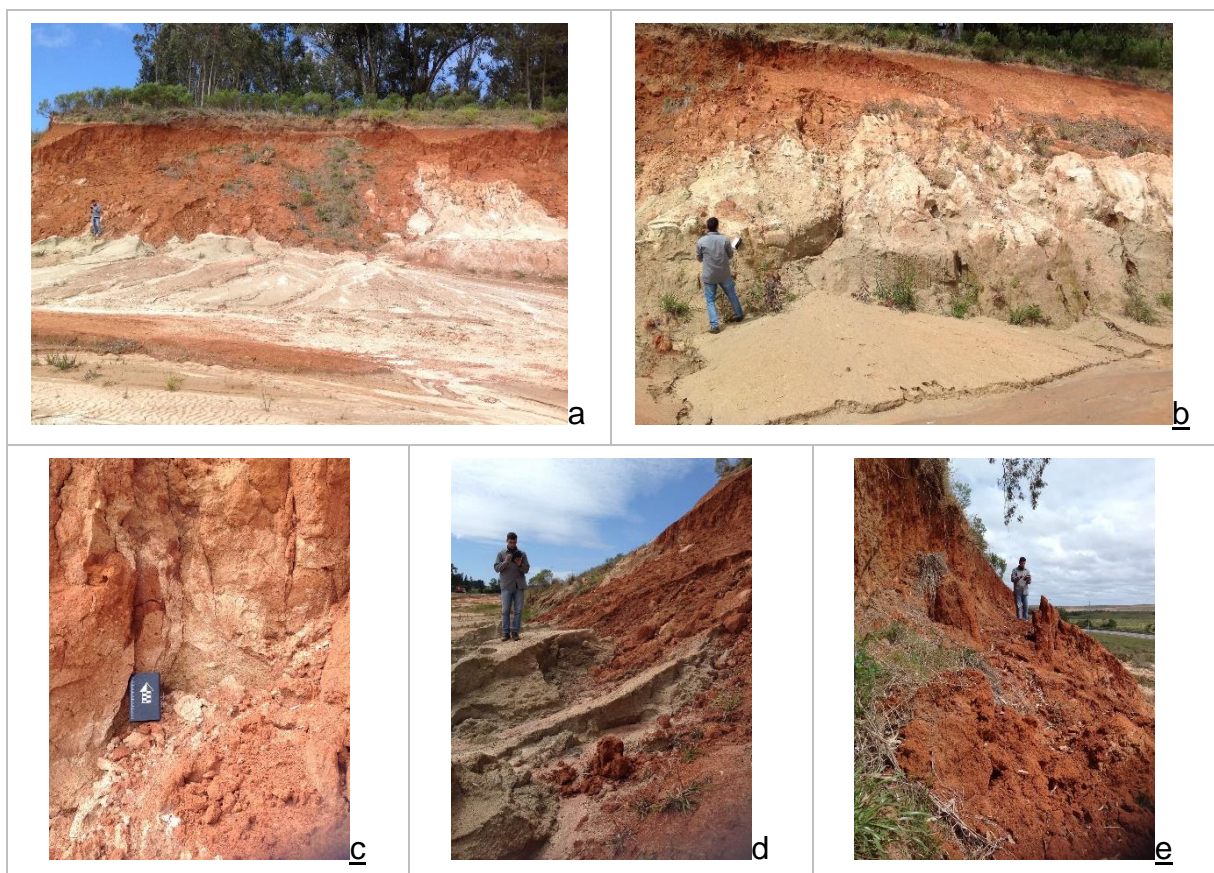


Figura 24: a) foto frontal do talude com detalhe para a erosão acentuada, escorregamento e escoamento do horizonte B sobre a face inferior do talude e formação de leques compostos por sedimentos do tamanho areia na superfície inferior do piso. b) detalhe para o horizonte C ou R escavável erodido formando ravinas e os sedimentos tamanho areia na forma de leques. c) Contato gradacional entre os horizontes C, proveniente de monzogranito, e o horizonte B planossolo argiloso. d) marcas do horizonte R escavável erodido e movimentado. e) foto a 2 metros do topo, no centro superior do horizonte B com características de tombamento causado pela erosão e retirada do horizonte C.

Ocorre ruptura em B bem marcada no topo da face do talude. Com a chuva, o horizonte B também é escoado para os leques. O material argiloso carregado para os leques se transforma em caulim. O processo de iluviação é nítido na parte da ruptura por “tombamento” – causada pela erosão – do horizonte B.

O lençol freático satura o sopé do talude acentuando a erosão com os regimes de chuva recorrentes em certas estações do ano. Esses eventos aumentam a erosão do sopé no horizonte C friável, mesmo este tendo características de material coeso.





*Figura 25: Talude 2;*

Ponto 2: Coordenadas:  $-31^{\circ}13'18,5''$ ;  $-52^{\circ}0'36''$ , altitude 60 m (km 453).

$l = 120 \text{ m}$	$h = 4 \text{ m}$	$\alpha = 30-40^{\circ}$
---------------------	-------------------	--------------------------

Talude rochoso fraturado com fragmentos de rocha rolados oriundos do intemperismo físico e químico atuantes nos planos de fraqueza. A rocha é um monzogranito fraturado com face do talude alterada pela exposição ao intemperismo. Formação de ravinas sobre a capa de alteração da rocha fraturada é causada pelo escoamento preferencial da água superficial. Em períodos de chuva torrenciais a água não consegue infiltrar na rocha e nas fraturas, gerando uma lâmina d'água com energia suficiente para deslocar os blocos centimétrico formados entre as fraturas quase paralelas de orientações preferenciais de ângulo e mergulho de  $50^{\circ}/85^{\circ}$  e  $199^{\circ}/81^{\circ}$ . É possível observar água vertendo na face do talude por períodos prolongados – dias, semanas.





*Figura 26: Talude 3;*

Ponto 3: Coordenadas: -31°06'04,5"; -52°01'56", altitude 50 m (km 439).

$l = 150 \text{ m}$	$h = 4 \text{ m}$	$\alpha = 53^\circ$
---------------------	-------------------	---------------------

Talude de solo proveniente dos sienogranitos da Fácies Serro do Herval. Apresenta vegetação com raízes expostas devido ao intenso intemperismo e erosão de solo da face e topo. Não ocorre ravinamento, pois as erosões tendem a ser largas e de profundidade média. Ao longo do talude ocorreram 8 escorregamentos, onde é possível perceber água vertendo nestes pontos. As erosões e rupturas demonstram que os pontos de fraqueza são no meio da face do talude, onde a água aflora/verte. Estes fatos evidenciam haver água suspensa entre a transição dos horizontes C e B. A parte com vegetação com raízes mais profundas não contém a erosão acentuada e o solapamento. Há a formação de gretas de contração em pontos específicos e ocorre escoamento da drenagem no pé do talude.

O horizonte C é característico, com cor bruno amarelada opaca, com marcas de sulcos do plano vertical de escoamento da água do fluxo superficial. O horizonte B é praticamente inexistente, tendo poucos centímetros, seguido pelo horizonte A de cerca de 40 centímetros e rico em matéria orgânica. É caracterizado como um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico da unidade Pelotas.



*Figura 27: Talude 4;*

Ponto 4: Coordenadas: -31°04'0,5"; -52°2'16", altitude 62 m (km 435).

$l = 145 \text{ m}$	$h = 8 \text{ m}$	$\alpha = 40^\circ$
---------------------	-------------------	---------------------

Talude de topo de morro, de material argiloso e com problemas de escorregamento e marcas de infiltração d'água perto das áreas de solapamento. O corte é formado por um extenso horizonte C, de aproximadamente 7 metros, sendo o horizonte B centimétrico ou inexistente. O horizonte A é centimétrico e está coberto pela vegetação. O horizonte C apresenta marcas características do fluxo hídrico superficial vertical. As marcas do fluxo hídrico tentem a formar ravinamentos profundos, ocorrendo erosão pela concentração de água ao passo que os ravinamentos se transformam em bossorocas. Este talude apresenta ravinamento moderado, mas onde a água aflora a erosão é acentuada e a formação de pequenas bossorocas é acelerada. Também é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, plúntico, característico da alteração dos sienogranitos. Apresenta cor opaca alaranjada, escondendo o limite de transição entre os horizontes C e os horizontes superiores. O terreno por ser em caída, auxilia a água a erodir o sopé. A tendência do talude é formar bossorocas de maior magnitude e ocorrer a erosão do sopé, tirando a sustentação do talude. Apesar do talude ter vegetação no topo, a inclinação de  $40^\circ$  facilita a erosão por gravidade e ao mesmo tempo deixa a fície exposta a chuva com gotas diretas e favorece o fluxo hídrico.



*Figura 28: Talude 5;*

Ponto 5: Coordenadas: -31°3'32,5"; -52°2'16", 50 m (Km 434).

$l = 170 \text{ m}$	$h = 3,5 \text{ m}$	$\alpha = 49^\circ$
---------------------	---------------------	---------------------

Talude argiloso (regolítico) composto predominantemente pelos horizontes C ou R escavável. O horizonte B é inexistente, característico dos horizontes provenientes de sienogranitos em clima sub-tropical. O horizonte A centimétrico está recoberto pela vegetação do topo do talude. Apresenta- transição do horizonte C com o horizonte R escavável recoberto pela vegetação de gramíneas. O corte está vegetado e com uma malha perpendicular de bambus para contenção de erosão na tentativa de permitir o tempo necessário para o crescimento das mudas e fixação das raízes. Sistema de plantio e contenção (bambus) não é suficiente, pois ocorrem tanto escorregamentos leves superficiais como solapamentos rasos causados pelo erosão do solo. A inclinação do talude ajuda a acentuar a erosão da face do talude em períodos chuvosos. Os horizontes C e R são arenosos compostos por minerais resistatos característicos de granitos, com plagioclásio e minerais de quartzo com cerca de 4 centímetros. O intemperismo físico é caracterizado pela trincas no horizonte C transicional expostas pela erosão de partes métricas da camada superficial da face.





Figura 29: Talude 6;

Ponto 6: Coordenadas: -31°3'10"; -52°2'16", altitude 50 m (Km 433+500m).

$l = 330 \text{ m}$	$h = 3,5 \text{ m}$	$\alpha = 40^\circ$
---------------------	---------------------	---------------------

Talude com altura relativamente baixa – em relação aos outros pontos - com marcas de ravinamentos rasos, característicos do fluxo superficial lento. Talude vegetado, mas com a retirada da vegetação pela erosão superficial. A erosão pelo fluxo hídrico é acentuada, mesmo a exposição da face parecer recente, e se caracteriza na forma de sulcos e que tendem a progredir para ravinas. Onde o processo de ravinamento é intensificado pela maior exposição em relação ao tempo, ocorrem escorregamento/ retirada de massas de solo nas partes centrais do corte, podendo estar ligados à elevação do lençol freático até estes pontos/cotas do talude. Apesar das marcas de fluxo d'água no sopé do talude, não existem evidências de erosão e/ou retiradas de massas de solo na base. Os problemas estruturais estão vinculados às partes centrais do talude. Pedologicamente é classificado como um Gleissolo Háptico Eutrófico, conforme STRECK *et. al*, (2008) são solos característicos de ambientes mal drenados, com dissolução de ferro e associados a Planossolos. É um solo com características de formação de solos dos horizontes A e C gleizados proveniente de granitos. Geológicamente está inserido próximo do contato entre os sienogranitos Serro do Herval e os metagranitóides do Complexo Pinheiro Machado.



*Figura 30: Talude 7;*

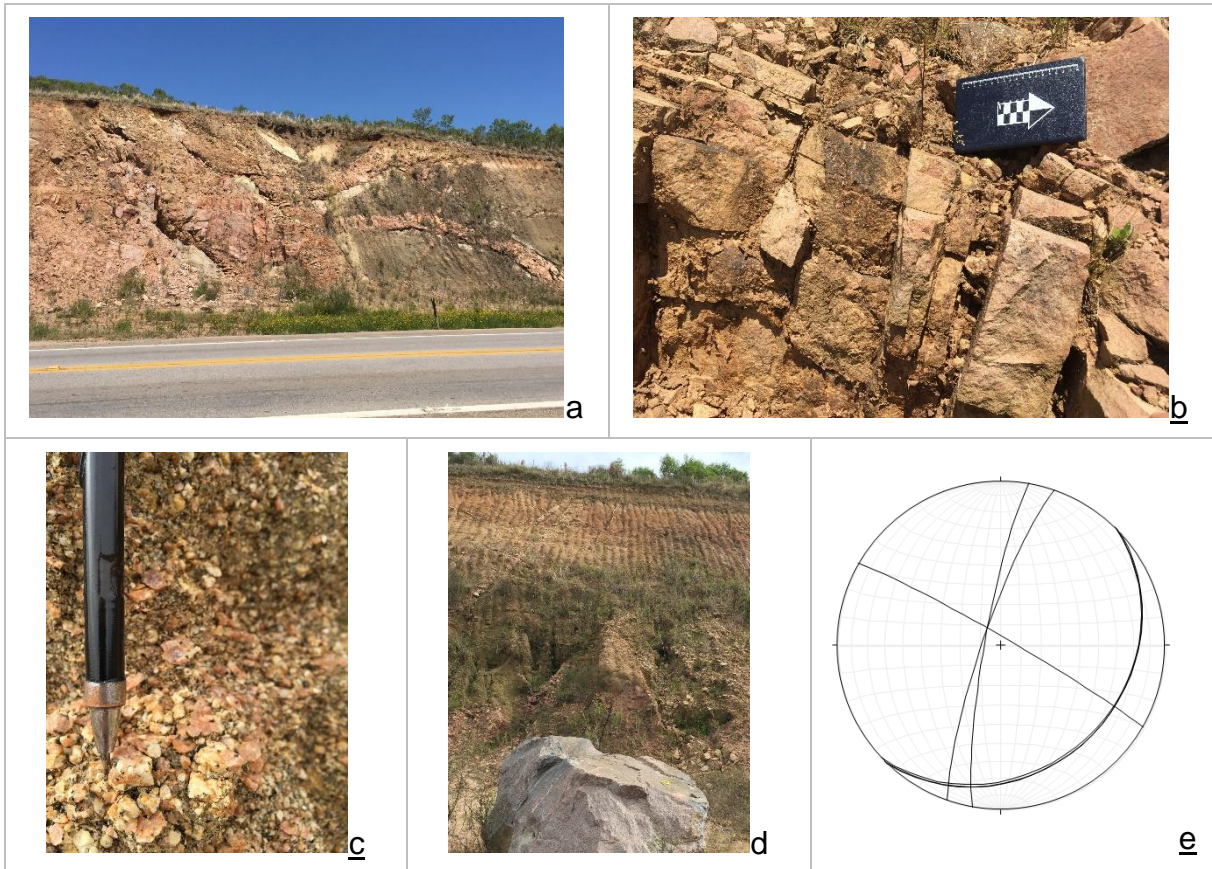
Ponto 7: Coordenadas:  $-30^{\circ}43'14''$ ;  $-51^{\circ}36'33''$ , altitude 30 m (Km 374).

$l = 18 \text{ m}$	$h = 250 \text{ m}$	$\alpha = 32^{\circ}$
--------------------	---------------------	-----------------------

Talude rochoso fraturado inserido no Complexo Granítico-Gnáissico Pinheiro Machado, com altura de aproximadamente 18 metros, 250 metros de comprimento e ângulos que variam de  $32^{\circ}$  a  $70^{\circ}$  - ângulos verticalizados nas porções superiores/topo. O corte da rodovia consolidada (lado oeste) e da atual duplicação (lado leste) cortam o alto topográfico em seu centro, ocorrendo taludes nos dois acostamentos até a ponte, onde existe uma queda abrupta de altura, cruzando perpendicularmente o Rio Camaquã (Baixo Camaquã). Do topo do talude à cota do Rio Camaquã existe uma diferença topográfica de 35 metros (em uma distância de apenas 250 m).

É composto predominantemente pelos horizontes horizonte R não escavável e horizonte R escavável, sendo os horizontes A e B formados por camadas de cerca de 30 centímetros cada. Geologicamente formado por diques e intrusões sienograníticas nos Gnaisses graníticos a granodioríticos com foliação marcante e deformação de alta temperatura.





*Figura 31: a) Foto frontal do talude (lado oeste) marcado pelas intrusões de sienogranito nos gnaisses granítico/granodiorito do Complexo Pinheiro Machado. b) erosão por queda de pequenos blocos causada pelo intemperismo físico. c) foto de detalhe dos minerais porfírico resistentes de quartzo e feldspato potássico em uma matriz fina intemperizada. d) erosão por ravinas do horizonte R escavável. e) Medidas estruturais principais que condicionam a formação de blocos.*

O intemperismo altera as rochas do talude de maneira diferente. As intrusões de sienogranito estão altamente fraturas em dois planos principais,  $199^{\circ}/81^{\circ}$  e  $44^{\circ}/23^{\circ}$ . O primeiro representa uma falha sinistral de grande porte descrita pela CPRM (2006), provavelmente associada a Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal de Canguçu. Associados, o segundo plano principal acaba formando blocos de fraturas pelo intemperismo físico sendo a erosão marcada pela queda destes pequenos blocos.

O perfil de erosão é caracterizado pelo intemperismo físico das rochas. Minerais porfíricos resistentes de quartzo e k-feldspato possuem cerca de 2 centímetros e estão inseridos em uma matriz fina milimétrica alterada formada por estes minerais e minerais acessórios. O perfil alterado é influenciado pelo fluxo hídrico na porção inferior do corte (fig. 31d) formando ravinas e movimento de massas de solo.

Corte estável apesar da erosão de pequenos blocos e da perda de solo pela chuva. Porém, pode haver um acidente geotécnico através de um plano de fraqueza associado as estruturas reliquiares ou ocorrer erosão do sopé por chuvas de grande intensidade e de grande duração.

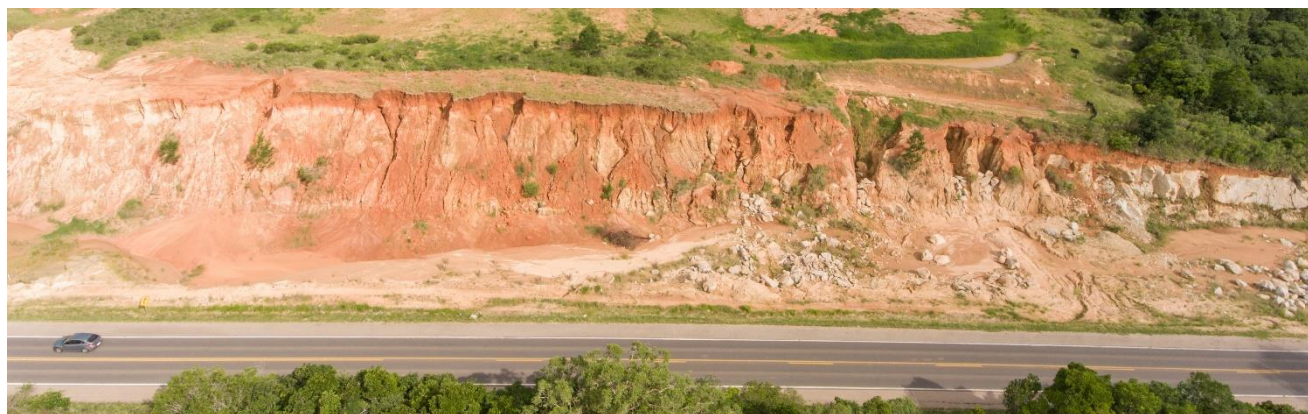


Figura 32: Talude 8;

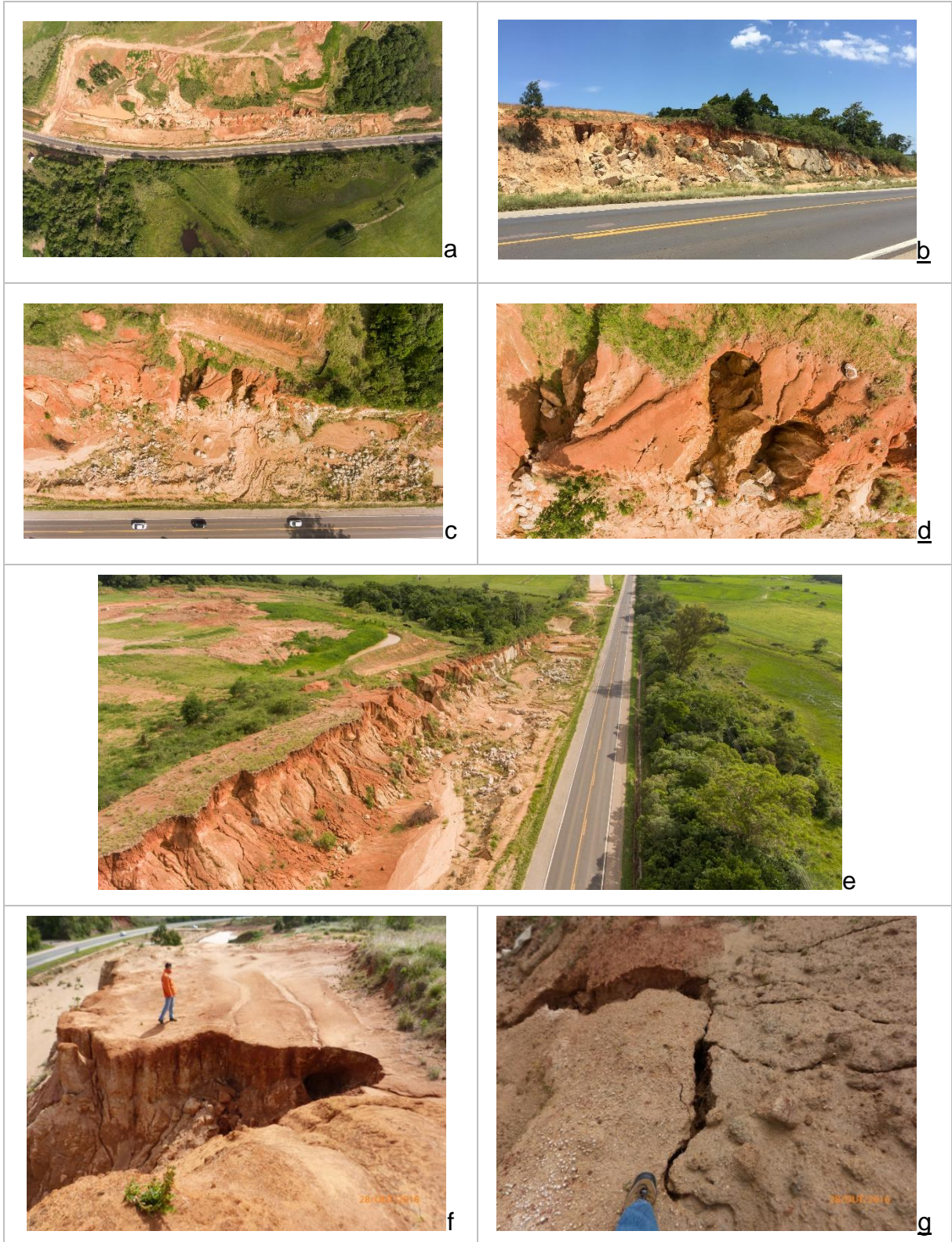
Ponto 8: Coordenadas:  $-30^{\circ}43'14,5''$ ;  $-51^{\circ}36'33''$ , altitude 30 m (Km 374).

$l = 380 \text{ m}$	$h = 13 \text{ m}$	$\alpha = 32^{\circ}$
---------------------	--------------------	-----------------------

Talude pertencente aos gnaisses-graníticos do Complexo Granítico-Gnáissico Pinheiro Machado e composto por rocha sã, horizontes R, C, B e A gradacionais. Processo de ravinamento acentuado marcam toda a face do talude ao longo dos seus 380 metros. Em pontos específicos, a formação de ravina já evoluiu para bossorocas estreitas e profundas. É possível visualizar os pontos de escoamento de material pela erosão do horizonte C ou R escavável que sustenta os horizontes superiores. As camadas dos horizontes C e R perfazem quase todo perfil, tendo B cerca de 2 metros e A 50 centímetros. O contato com o horizonte R não escalável não está visível. Com a retirada da base (horizontes R e C) por erosão hídrica, ocorre o solapamento do horizonte B argiloso e de A pouco orgânico. A falta de vegetação e suas raízes facilitam o processo de erosão e solapamento do topo do corte.

As rochas metamórficas afloram na porção sudoeste do corte, onde a rocha sã apresenta fraturas bem marcadas nos planos principais da geologia estrutural da região. O perfil de intemperismo nesta porção sudoeste, da rocha ao horizonte A, possui 2 metros. Esta feição demonstra a ação do intemperismo pelas estruturas geológicas reliquias, no processo de esfoliação esferoidal (Fig. 33 h).







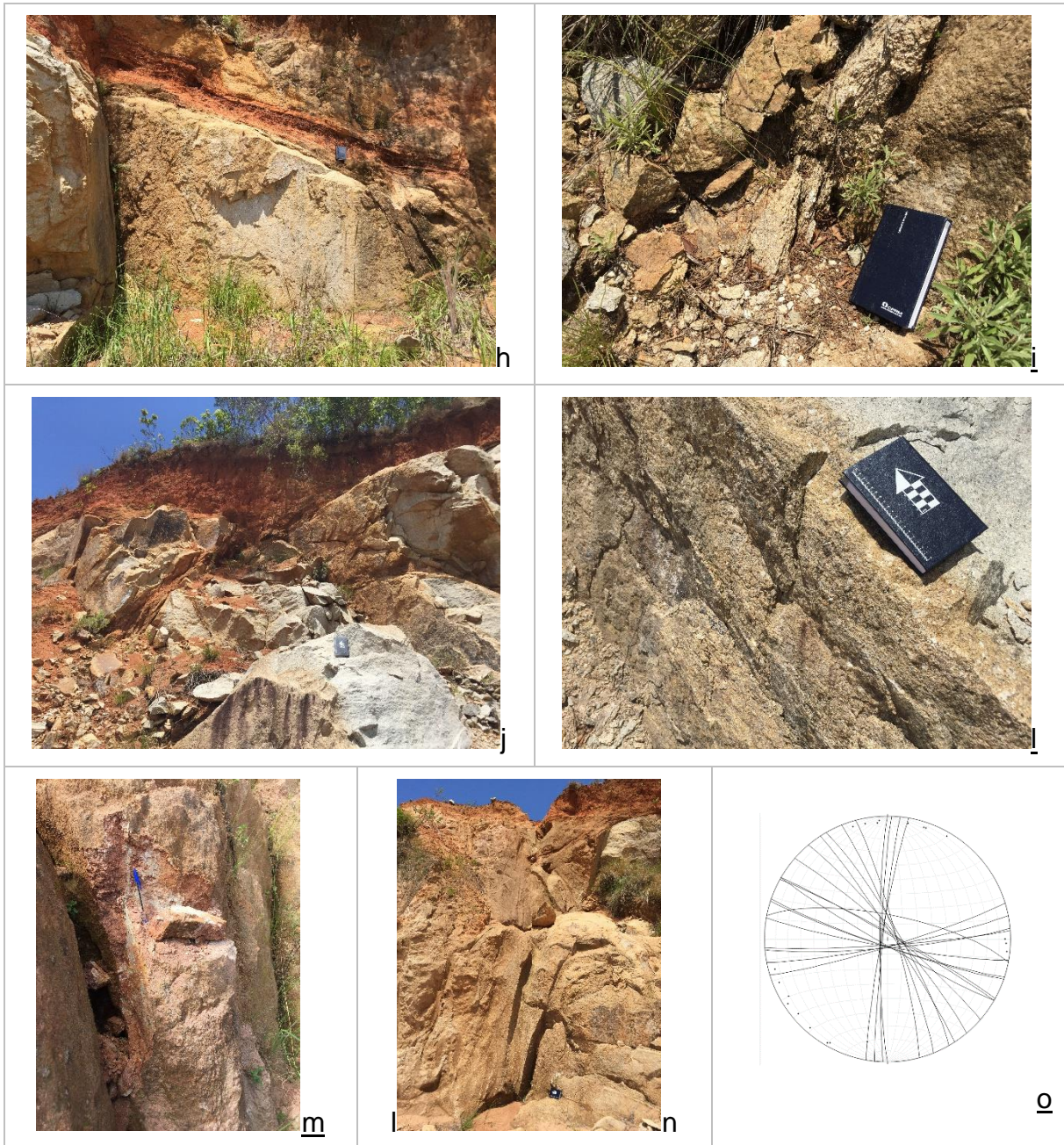


Figura 33: A) Imagem de VANT ortogonal/planta do talude. B)Foto da face do talude e das bossorocas estreitas e profundas. C) Imagem de VANT com detalhe da profundidade das bossorocas. D) Imagem de detalhe das estruturas apresentadas em C). E) Imagem à 45° da face com erosão acentuada e marcas das bossorocas. F) Detalhe do contato da bossoroca profunda com o topo do talude. G) Trincas no topo do talude. H) Intemperismo nas fraturas do maciço – início da esfoliação esferoidal. I) Planos de fraturas J) Plano de fraturas com faces do maciço bem marcadas. L) Marcas de alteração nos contatos onde a água percola. M) Horizonte R escavável frágil. N) Planos de fratura associados à erosão. O) Estereograma das fraturas do talude.

O efeito da esfoliação esferoidal acaba por intemperizar e alterar os minerais nas fraturas, formando matacões e blocos de rocha. A exposição dos blocos pelo corte do talude acelera o processo de intemperismo da argila formada entre estes blocos, sem ter efeito imediato na rocha. Com as chuvas e retirada do material do embasamento, os blocos se desprendem quando atingem os planos de fraqueza que os sustentam e rolam corte abaixo.

Este processo de blocos com arestas ainda bem definidas e rocha sã é exclusivo da porção sudoeste do talude. A rocha sã é monzogranito com pórfiros de feldspato potássico.

As porções centro e norte do talude são marcadas pela erosão e retirada de material dos horizontes C e R escavável do sopé, levando ao solapamento do material sobreposto formado por parte do horizonte C em transição para o horizonte B, o próprio horizonte B gradual e o horizonte A. As zonas onde se formam as bossorocas (figs. 24 c, d e f) são formadas por planos de fraqueza preenchidos nas paredes destas por argila, gerando um plano de fraqueza plástico. O fluxo hídrico infiltra com facilidade nestes planos milonitizados (fig. 33 n), alterando os minerais para caulinita (fig. 33 m) formando linhas verticais de solo facilmente erodível. A evolução da retirada de solo pelos pingos de chuva e fluxo da água na superfície do talude forma pequenas cavernas nestes pontos, onde há acumulação de água da chuva e erosão das paredes do talude. Com o tempo e chuvas recorrentes, as bossorocas vão erodindo o corte e causando a deposição do solo nas porções mais baixas do relevo. Esse processo forma leques de sedimento tamanho areia e argila sobrepostos por blocos rochas angulosos e matacões. A retirada dos matacões pela perda de sustentação ou efeito da gravidade fazem com que os horizontes do topo solapem, dando início as crateras. Este processo gera trincas no topo do talude, facilitando a infiltração de água e erodibilidade do solo (fig. 33 g).

A alteração das fraturas fica evidenciada pela presença de perfis paralelos de ferro e manganês nos blocos de rocha erodidos (fig. 33 l) causados pela percolação de água, formando uma camada de alteração e clivagem nos planos. Nas porções ao norte, não é possível perceber este processo por causa elevado grau de intemperismo dos matacões em relação à rocha sã.





*Figura 34: Talude 9;*

Ponto 9: Coordenadas:  $-30^{\circ}43'9''$ ;  $-51^{\circ}36'28''$ , altitude 30 m (Km 374).

$l = 90$ m	$h = 8$ m	$\alpha = 40^{\circ}$
------------	-----------	-----------------------

Talude com erosão acentuada, expondo as raízes das árvores/vegetação do topo. É composto predominantemente por argila e saibro dos perfil gradual de evolução do horizonte C para o B - característicos dos argissolos. O horizonte A orgânico possui 60 centímetros. No topo com marcas de erosão ambiental, o ângulo de inclinação muda dos  $40^{\circ}$  da base e chega a ter aproximadamente  $75^{\circ}$  próximo ao topo. A vegetação predomina a parte superior e as partes laterais externas da face do talude. As partes de argila exposta, demonstram erosões recentes, que não permitem a permanência de vegetação. As raízes expostas minimizam o processo de erosão, mas não o contêm. A evolução da erosão do topo do corte tende a derrubar as árvores trazendo grande risco ao fluxo da rodovia.

É possível visualizar o processo de iluviação no talude, onde o horizonte B pouco exposto é rico em argilominerais, tornando o horizonte C frágil ao intemperismo. Este processo é menos evidente do que os outros taludes, mas é perceptível o problema. A evolução do processo tende a acelerar a erosão e possível escorregamento dos horizontes superficiais.



*Figura 35: Talude 10;*

Ponto 10: Coordenadas:  $-30^{\circ}43'4''$ ,  $-52^{\circ}36'14''$ , altitude 55m (km 373,5).

$l = 140 \text{ m}$	$h = 10 \text{ m}$	$\alpha = 60^{\circ}$
---------------------	--------------------	-----------------------

Talude com processos geológicos, pedológicos e geotécnicos semelhantes ao talude 8 (distante 700 metros) descrito anteriormente. A exposição de blocos de rocha granítica é mais discreta devido a cota mais elevada, mas também ocorre. A deposição de areia em forma de leques é marcante. A quantidade de ravinas e bossorocas é menor, mas tão evoluídas quanto. A falta de vegetação no topo facilita o solapamento do topo. O horizonte R escavável C predominam o corte com cerca de 8,5 metros de altura. O horizonte B possui 1,5 metros e está erodido em mais de 50% da extensão do talude. O horizonte A é inexistente.



*Figura 36: Talude 11;*

Ponto 11: Coordenadas:  $-30^{\circ}41'55''$ ,  $-52^{\circ}34'44''$ , altitude 55 m (km 372).

$l = 50 \text{ m}$	$h = 4 \text{ m}$	$\alpha = 30^{\circ}$
--------------------	-------------------	-----------------------

Talude com 50 metros de comprimento,  $30^{\circ}$  de inclinação e 4 metros de altura. Composto somente pelos horizontes B e A, apresenta estabilidade pela coesão do solo argiloso e estágio avançado de crescimento de gramíneas. Não há indícios do horizonte C exposto. A vegetação do talude, a coesão e baixa permeabilidade dos argissolos contribuem para a estabilidade do corte. A construção de canaleta de concreto no sopé do talude auxiliam na preservação da geometria e sustentação do talude.



Figura 37: Talude 12;

Ponto 12: Coordenadas:  $-30^{\circ}39'48''$ ,  $-51^{\circ}33'38''$ , altitude 60 m (km 364).

$l = 160 \text{ m}$	$h = 12 \text{ m}$	$\alpha = 28^{\circ}$
---------------------	--------------------	-----------------------

Talude com 150 metros de comprimento, 15 metros de altura e inclinação de  $28^{\circ}$ . Corte aparentemente estável com marcas de retaludamento do sopé na porção sul, provavelmente por escorregamento e erosão do horizonte C pouco exposto. As marcas e impressões de problemas geotécnicos só são visíveis à poucos metros da face do talude. A erosão por infiltração de água retira material sólido do interior do maciço em linha transversais bem definidas, processo conhecido como “*piping*”. Na superfície as marcas são discretas, com pequenos furos no meio da face vegetada por gramíneas. Porém, os “*pipings*” são formados por buracos que crescem com o regime de chuva e concentração de água, erodindo as paredes da “caverna” por causa o fluxo turbulento em forma de redemoinhos enquanto somente uma parte é escoada por pequenas galerias até outros furos, até então, chegar ao sopé do talude. A vegetação ajuda a mascarar o evento através da contenção da camada superficial pela sustentação das raízes. A inclinação do corte contribui para o tempo de residência e maior exposição do fluxo pelo regime de chuvas. Com a evolução dos processos e união das galerias e crateras, a formação de bossorocas é a consequência.





*Figura 38: Talude 13;*

Ponto 13: Coordenadas:  $-30^{\circ}38'27''$ ,  $-51^{\circ}33'26''$ , altitude 70 m (km 363,5).

$l = 300 \text{ m}$	$h = 12 \text{ m}$	$\alpha = 43^{\circ}$
---------------------	--------------------	-----------------------

Talude formado por duas bancadas e com problemas de erosão evidentes na porção inferior e sopé. Inserido no contato entre os Monzogranitos Cerro Grande e os Gnaisses do Complexo Pinheiro Machado, é composto pelos horizontes C, B e A. O limite entre os dois primeiros horizontes é imperceptível por ser gradual e pelo grau de crescimento das leivas. Ocorre processo intenso de erosão causado pelo acúmulo de água no sopé do talude. A construção das camadas da pavimentação da rodovia formaram um canal de cerca de 1 metro de largura entre esta e o início do corte/sopé. Em períodos intensos de chuva a água percola com energia na direção sul – baixo topográfico - carregando os sedimentos do sopé do talude e fragmentos das camadas de base e sub-base já construídas da duplicação da rodovia. Com a retirada gradual de solo da face do talude, a erosão causa a ruptura por “tombamento” de camadas de sedimento dos horizontes C e B na forma de rupturas curvas angulosas. O processo é controlado pelo regime de chuvas e consequente fluxo do canal formado entre o pavimento e sopé do talude.





Figura 39: Talude 14;

Ponto 14: Coordenadas:  $-30^{\circ}37'53''$ ,  $-51^{\circ}32'56''$ , altitude 65 m (km 362).

$l = 300 \text{ m}$	$h = 12 \text{ m}$	$\alpha = 44^{\circ}$
---------------------	--------------------	-----------------------

Talude próximo ao trevo de Tapes. Possui 300 metros de comprimento, 12 metros de altura e  $44^{\circ}$  de inclinação. Predominantemente composto pelo horizonte B argiloso, totalmente vegetado mas com sua porção nordeste reconstituída com uma estrutura de enrocamento no sopé do talude. Pelas características semelhantes ao Talude/Ponto 12, a parte escorregada/erodida foi ocasionada pela evolução do processo de piping e suas galerias entre os horizontes C (sopé) e B gradacional. O ângulo de  $44^{\circ}$  do talude diminui o tempo de residência da água no fluxo superficial, também contida pela vegetação, mas não evita o processo. O terreno de base é plano e não apresenta problemas de drenagem e erosão no sopé do talude. O solo característico dos argissolos é proveniente dos monzogranitos da Fácies Cerro Grande. A probabilidade de ocorrências de piping com o passar do tempo é grande, devido à altura e inclinação do talude sem a formação de bermas e de canaletas de drenagem.



*Figura 40: Talude 15;*

Ponto 15: Coordenadas:  $-30^{\circ}37'20''$ ,  $-51^{\circ}32'24''$ , altitude 65 m (km 359).

$l = 250 \text{ m}$	$h = 13 \text{ m}$	$\alpha = 35^{\circ}$
---------------------	--------------------	-----------------------

Talude pertencente as rochas da Suíte Granítica Dom Feliciano (Fácies Cerro Grande – Monzogranitos), com 250 metros de comprimento, aproximadamente 10 a 13 metros de altura e inclinação de  $36^{\circ}$  na porção estável e  $22^{\circ}$  de ângulo de repouso pós ruptura/escorregamento rotacional. Presença de argila nos horizontes B e C que tendem a definir as erosões e os pipings. Influência do rompimento e da vegetação dificultam a inspeção in situ. Geologicamente classificado como Monzogranito cinza claro Porfírico, com pórfiros de quartzo e k-feldspato menores que 2cm. Horizonte C muito friável, com presença de eluviação de argila branca do horizonte B superior para o inferior e horizonte C formando um padrão "stripping" horizontal e vertical. Iluviação de óxidos de Fe do horizonte B superior também são evidentes, se concentrando no contato entre os horizontes B's. O Horizonte B é formado por argissolo vermelho com espessura maior do que 2-3 metros. A Iluviação de argila e de hidróxidos de Fe do B superior para o B inferior torna a parte superior de cor Bruno avermelhado e aspecto manchado. O horizonte B inferior fica manchado em branco cinza claro e avermelhado.









Figura 41: a) Foto aérea do talude. b) Foto aérea de detalhe da ruptura circular. c) Foto aérea das trincas da ruptura. d) Movimento de massa pela ruptura curva. e) Panorâmica frontal do talude rompido. f) e g) Detalhe da superfície de ruptura marcada pela formação de blocos e presença de iluviação no horizonte B. h) e i) Formação de estrutura tipo piping pela infiltração da água da chuva. j), l) e m) diques alterados formados por argila plástica. n) e o) túneis de percolação de água pelas cavernas sub superficiais. p) minerais resistatos de quartzo e k-feldspato centimétrico visíveis na ruptura.

Formação de ravinas pelo turbilhonamento de água da chuva nas crateras/cavernas, com erosão abaixo da camada superficial forma túneis até o sopé do talude (piping). Nas crateras e nas paredes da ruptura é possível visualizar intrusões graníticas em forma de veios alterados para argila plástica (figs. 41 h, j, m e o).



Figura 42: Talude 16;

Ponto 16: Coordenadas:  $-30^{\circ}35'41''$ ,  $-51^{\circ}32'21''$ , altitude 93 m (km 358).

$l = 200 \text{ m}$	$h = 7 \text{ m}$	$\alpha = 41^{\circ}$
---------------------	-------------------	-----------------------

Talude com 270 metros, 7 metros de altura e  $41^{\circ}$  de inclinação. Composto predominantemente pelos horizontes A e B, sendo o sopé do talude composto por transição do horizonte B com aparte inferior caracterizada pelo início do horizonte C friável. Talude pouco vegetado e sem marcas de erosão e ruptura, apenas feições de sulcos pelo movimento de água da chuva na face do corte. Pedologicamente classificado como argissolo, apresenta coesão com baixa permeabilidade sem a existência de estruturas reliquiares, impedindo a infiltração da água da chuva. A geometria e posição geográfica do talude evitam a concentração de água, mesmo não existindo canaletas de drenagem. Geologicamente está inserido nos Monzogranitos Cerro Grande.

Eluviação bem marcada desde o topo até o sopé do talude. Argissolo vermelho amarelado com intenso processo de eluviação e iluvia formando no topo um aspecto reticulado e no sopé tipo striping horizontal. Espessura de 5 metros do horizonte B, sem ver transição para C. Horizonte A cinza acastanhado transicional com o B mais cinza no topo, mais acastanhada na base e 50cm de horizonte A.





*Figura 43: Talude 17;*

Ponto 17: Coordenadas:  $-30^{\circ}35'26''$ ,  $-51^{\circ}32'15''$ , altitude 100 m (km 357).

$l = 450$ m	$h = 11$ m	$\alpha = 40^{\circ}$
-------------	------------	-----------------------

Talude com 270 metros de comprimento, 9,5 metros de altura e  $40^{\circ}$  de inclinação. Apresenta canaletas de escoamento superficial ao lado da estrada ainda não pavimentada, localizada paralelamente na parte superior, que drenam para o centro do talude – escada de acesso e escada hidráulica. Ocorre erosão do sopé, marcada pelo enrocamento construído na base da parte central do talude. A erosão do sopé é marcada pela transição do horizonte B com o horizonte C aparente neste talude. Em relação ao talude anterior, com características semelhantes, este possui altura mais elevada fazendo com que o horizonte C fique exposto, tornando o sopé friável. Canaletas não construídas na parte do sopé do talude minimizariam o problema. A ocorrência de ruptura na porção centro-norte do talude está provavelmente ligada a existência de um açude construído atrás do topo (cota 108 metros), com área de 1 hectare. Apesar do horizonte B ter baixa permeabilidade, estruturas reliquias em C podem ter planos preferencias de percolação de água, assim, rompendo o talude.



*Figura 44: Talude 18;*

Ponto 18: Coordenadas:  $-30^{\circ}33'42''$ ,  $-51^{\circ}31'10''$ , altitude 73 m (km 354).

$l = 145 \text{ m}$	$h = 7,5 \text{ m}$	$\alpha = 42^{\circ}$
---------------------	---------------------	-----------------------

Talude com 145 metros de extensão, 7,5 metros de altura e  $40^{\circ}$  de inclinação. O horizonte C está exposto e perfaz 70% do talude, provavelmente influenciado pela cota mais baixa em relação aos 2 taludes/pontos anteriores. O horizonte B possui 1 metros de espessura, seguido por um horizonte A centimétrico. Ocorre erosão acentuada no horizonte C, do centro para as laterais. O processo é progressivo e aparente. Com a erosão, a sustentação do horizonte B é nula, ocorrendo o escoamento deste último horizonte nas porções mais avançadas do processo geológico.



*Figura 45: Talude 19;*

Ponto 19: Coordenadas:  $-30^{\circ}32'41''$ ,  $-51^{\circ}30'28''$ , altitude 68 m (km 351).

$l = 210 \text{ m}$	$h = 14 \text{ m}$	$\alpha = 35-47^{\circ}$
---------------------	--------------------	--------------------------

Talude com 200 metros de extensão, 4 bancadas formando um grande banquetamento, cada talude possui em torno de 6 metros de altura e ângulos que variam de 35 a 45°. Composto por solo saprolítico proveniente do horizonte C no talude inferior e pelos horizontes B nos demais e horizonte A no topo. No sopé e em todas as bermas do banquetamento existem canaletas de drenagem - aparentemente eficientes. Ocorrem erosões de pequenos centímetros sem retirada significativa de massa de solo. O extremo sul é composto por um material saprolítico cinza proveniente da alteração de granito, estável, seguido por uma área abatida onde houve remoção de material.





Figura 46: Talude 20;

Ponto 20: Coordenadas:  $-30^{\circ}31'58''$ ,  $-51^{\circ}29'59''$ , altitude 75 m (km 350).

$l = 215 \text{ m}$	$h = 7 \text{ m}$	$\alpha = 78^{\circ}$
---------------------	-------------------	-----------------------

Talude composto por horizonte A pouco espesso 80cm. Já o horizonte B é muito espesso, com cerca de 4 a 5 metros. O horizonte C só aparece em alguns locais na base do talude, não tendo influência mecânica. O horizonte B é diferenciado pelo processo de iluviação e eluviação no topo, B1 é cinza claro e tem 1,20 metros de espessura, B2 é alaranjado e apresenta veios de argila iluviada e tem mais ou menos 1 metro de espessura. B3 é avermelhado e tem praticamente 2 metros de espessura com uma estrutura variegada a reticulada fornecida pelos veios inclinados e verticais de argila esbranquiçada da iluviação dos horizontes superiores. O B4 tem 1 metro de espessura, fica na base do talude, possui cor vermelho escuro dado pela impregnação de óxidos e hidróxidos de ferro. A estrutura de iluviação na base é formada por veios verticais e Strips de argila iluviada e tem pequenos bolsões de argila iluviada. E a argila iluviada é tingida por minerais de limonita.

As duas zonas de veios de iluviação são inclinados formando uma cunha no centro. Da Cunha, se forma os horizontes A e B2 e B1; forma uma depressão e no contato do B2 e do B3 tem precipitação de óxido de manganês e de ferro. Formando uma crustificação deste contato (plintização).

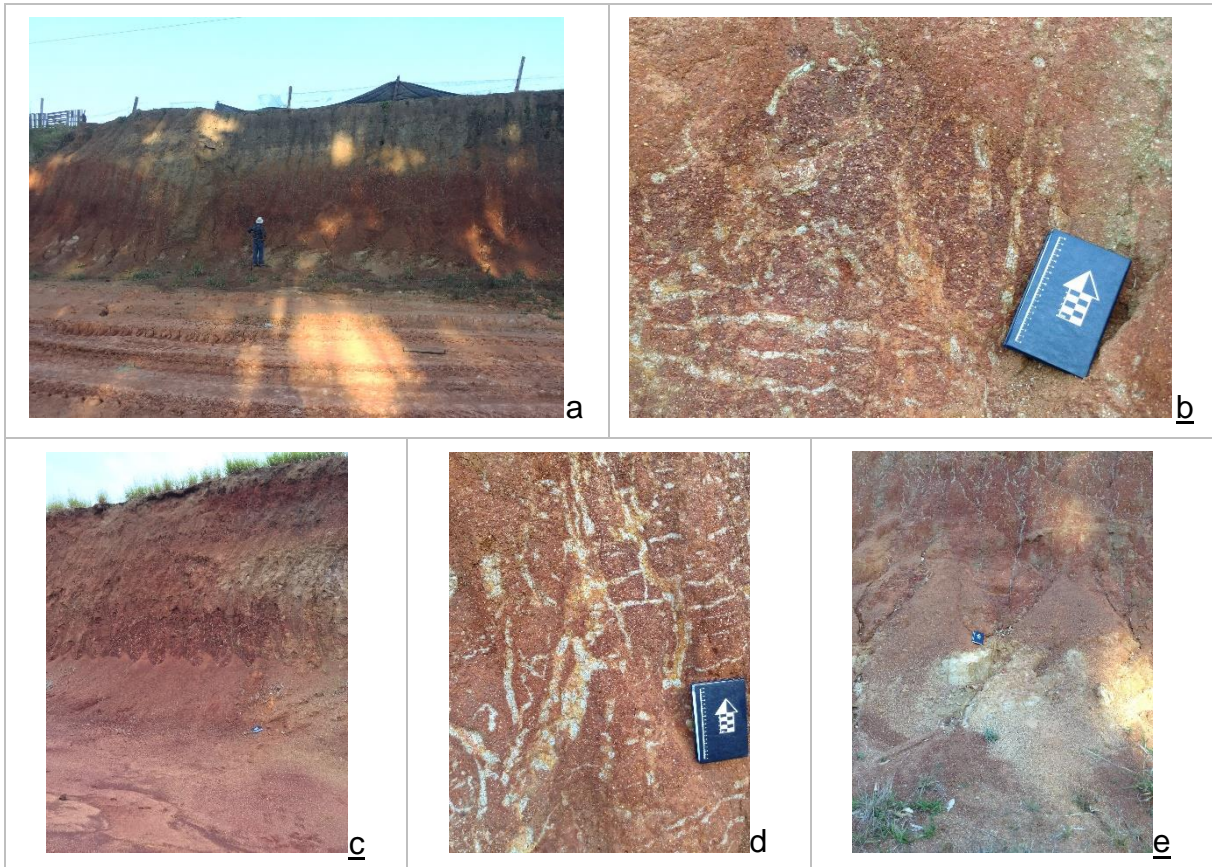


Figura 47: a) Foto frontal do talude. b) Detalhe dos processos de eluviação e iluviação/strips. c) detalhe das camadas pedológicas. d) Marcas dos veios. e) Presença do horizonte C/R.

Mecanicamente o talude é estável, sem marcas de erosão ou rupturas. A alta coesão do horizonte B e a inexistência do horizonte C na face do talude explicam a estabilidade. A geometria com inclinação de alto ângulo diminui a influência da chuva na instabilidade e erosão.



*Figura 48: Talude 21;*

Ponto 21: Coordenadas:  $-30^{\circ}30'55''$ ,  $-51^{\circ}29'45''$ , altitude 100 m (km 348).

$l = 190 \text{ m}$	$h = 3,5 \text{ m}$	$\alpha = 38^{\circ}$
---------------------	---------------------	-----------------------

O ponto apresenta erosão acentuada na porção sul, onde é caracterizado por horizonte C transicional (evolução) para B. Em sua porção centro e norte, é formado por horizonte C pouco espesso devido à altura do talude dividido em duas bancadas de menos de 2 metros cada. Mesmo com o banquetamento, a erosão por sulcos é evidente, tendendo a evoluir para erosão de ravinas. A evolução do perfil de intemperismo neste talude é lateral, estando os solos mais evoluídos na porção sul. O solo é proveniente de monzogranito, mas não preserva estruturas reliquiares.





*Figura 49: Talude 22;*

Ponto 22: Coordenadas:  $-30^{\circ}30'48''$ ,  $-51^{\circ}29'40''$ , altitude 100 m (km 347+750m).

$l = 215 \text{ m}$	$h = 6 \text{ m}$	$\alpha = 45^{\circ}$
---------------------	-------------------	-----------------------

Talude formado pelo horizonte B característico dos argissolos, estando totalmente vegetado e não apresentando características de instabilidade e marcas de erosão ao longo de sua extensão. O corte é dividido em 2 talude, cada com 3 metros e berma de 4 metros. Apesar de não haver canaletas de drenagem, o escoamento de água da chuva não apresenta alterações geométricas significativas na face do corte. A vegetação dificulta a análise dos horizontes pedológicos, mas aparentemente não ocorre exposição dos horizontes C e R. A geometria e evolução do perfil trazem estabilidade a obra.



*Figura 50: Talude 23;*

Ponto 23: Coordenadas:  $-30^{\circ}30'40''$ ,  $-51^{\circ}29'37''$ , altitude 90 m (km 347+500m).

$l = 160 \text{ m}$	$h = 4,5 \text{ m}$	$\alpha = 52^{\circ}$
---------------------	---------------------	-----------------------

Talude composto por transição abrupta entre os horizontes B e C, sendo esta linha de transição inclinada para o topo na direção sul, devido as diferenças de condições de intemperismo. O horizonte A é centimétrico e pouco exposto. 40% do talude é vegetado, predominantemente a sul, sobre o horizonte C. As marcas de erosão são sensíveis, porém é possível perceber que no horizonte C o processo é mais intenso.

Não existem obras para drenagem da água superficial. A inclinação do talude favorece a proteção contra a erosão por fluxo hídrico, porém, a evolução dos horizontes não foi linear, tendo ainda exposto cerca de 2 metros do horizonte C na parte central do corte. Sem canaletas de drenagem no sopé, o risco de erosão e escorregamento no talude são prováveis.



*Figura 51: Talude 24;*

Ponto 24: Coordenadas:  $-30^{\circ}29'35''$ ,  $-51^{\circ}29'29''$ , altitude 106 m (km 345+500m).

$l = 230 \text{ m}$	$h = 7,0 \text{ m}$	$\alpha = 34^{\circ}$
---------------------	---------------------	-----------------------

Talude com duas bancadas, cada uma possui em torno de 3,5 metros, totalizando 7 metros. Talude rochoso, horizonte R não escavável em transição para o horizonte C escavável. Alteração e processo de erosão no ponto do centro do talude. Talude totalmente vegetado, exceto na porção onde ocorreu a ruptura/erosão. As características demonstram que a instabilidade está associada a planos de fraturas sub verticais de direção  $SW82^{\circ}NE$ , formando um plano de fraqueza mecânica e de intemperismo físico com um processo de pequena ruptura. A vegetação oculta outras feições no talude, mas há probabilidade de outras ocorrências.



*Figura 52: Talude 25;*

Ponto 25: Coordenadas:  $-30^{\circ}29'14''$ ,  $-51^{\circ}29'22''$ , altitude 100 m (km 345).

$l = 230 \text{ m}$	$h = 14,0 \text{ m}$	$\alpha = 41^{\circ}$
---------------------	----------------------	-----------------------

Talude formado por 3 bancadas, cada uma com em torno de 4,5 metros, totalmente vegetado e com sistema de drenagem por calhas em todas bermas e no sopé, escada hidráulica e caixa de contenção de concreto na porção sul. Há erosão do sopé da base do talude, representado pelo movimento do horizonte C ocorrido antes do fim da construção da calha da base. A vegetação recobre os horizontes pedológicos. Na erosão do sopé é possível identificar o horizonte C característico de alteração por intemperismo dos monzogranitos da fácies Cerro Grande. O problema ocorreu por evento de chuva torrencial e fluxo intenso na base do talude, erodindo o horizonte friável. O banquetamento e as canaletas tendem a tornar o corte estável.





*Figura 53: Talude 26;*

Ponto 26: Coordenadas:  $-30^{\circ}28'33''$ ,  $-51^{\circ}29'33''$ , altitude 60 m (km 343+ 

$l = 300$ m	$h = 6,0$ m	$\alpha = 65^{\circ}$
-------------	-------------	-----------------------

 500 m).

Talude sub-vertical com corte em horizonte B (5,5 m) espesso, com alta coesão. Existe fluxo de água importante em toda a parte superior do talude, concentrado em área de formação de caverna de piping (fig. 54 b). A presença de limo junto à face do talude protege superficialmente o solo saprolítico, aumentando a resistência à erosão (SILVEIRA, 1981b in CESAR,1999). Os processos de eluviação e iluviação ocorrem como descrito no talude 20.





Figura 54: a) presença de limo, vegetação rasteira e água na face do talude. b) horizonte B espesso e coeso;



*Figura 55: Talude 27;*

Ponto 27: Coordenadas: -30°28'04", -51°29'39", altitude 60 m (km 342+ 500 m).

$l = 250 \text{ m}$	$h = 6,0 \text{ m}$	$\alpha = 36^\circ$
---------------------	---------------------	---------------------

Talude com horizonte C em quase toda a altura do corte. Diversas descontinuidades preenchidas com argila (feldspatos alterados, cor clara, quase branca). Fotos de detalhe das fraturas alteradas sub-verticais (preenchimento argiloso). Início das ravinas ocorre nas descontinuidades com a formação de cavernas de “piping”. Ocorre diferença de comportamento pré e pós-ruptura/erosão do material do horizonte C.

O horizonte A possui 50cm com cor bruno acizentado. O horizonte B possui 1,8 metros, laranja acastanhado em B1 no topo e vermelho na base no contato com horizonte C. O horizonte C é bem marcado e condicionando a erosão/ruptura dos horizontes sobrepostos. Geologicamente é descrito como Monzogranito de grão grosso (quartzo e feldspato potássico) muito friável. Os processos de alteração, erosão e escorregamento são semelhante ao dos Pontos/Taludes 8 e 10.



Figura 56: a) detalhe da ruptura. b) e c) horizonte C e R com cavernas formadas pelo processo de piping. d) Monzogranito grosseiro alterado. e) material carregado dos horizontes superiores.





*Figura 57: Talude 28;*

Ponto 28: Coordenadas:  $-30^{\circ}27'50''$ ,  $-51^{\circ}29'38''$ , altitude 60 m (km 342+ 

$l = 130$ m	$h = 9,0$ m	$\alpha = 38^{\circ}$
-------------	-------------	-----------------------

 200 m).

Talude formado por 2 (duas) bancadas, cada uma com em torno de 4,5 metros de altura, totalmente vegetado e com sistema de drenagem por calhas no topo, na berma e no sopé. Há pequenas marcas de erosão no centro do talude, mas insignificantes em relação a estabilidade do corte. A vegetação recobre os horizontes pedológicos, mas nas partes erodidas é possível identificar o solo do horizonte B, um argissolo característico de perfil de intemperismo da região. Geologicamente está inserido nos sienoganitos da Fácies Serra do Herval. O horizonte C friável não ocorre. Aparentemente não há problemas geotécnicos.



Figura 58: Talude 29;

Ponto 29: Coordenadas:  $-30^{\circ}26'16''$ ,  $-51^{\circ}28'44''$ , altitude 50 m (km 339).

$l = 240 \text{ m}$	$h = 11,0 \text{ m}$	$\alpha = 38^{\circ} - 41^{\circ}$
---------------------	----------------------	------------------------------------

Talude formado por duas bancadas, a inferior com 4 metros, e a superior com 5 metros. O horizonte A é centimétrico, com cerca de 50 centímetros, o horizonte B possui 7 metros, seguido por uma transição gradual para o horizonte C friável. A porção centro-norte do talude está totalmente erodida, do topo ao sopé, com uma largura de ruptura de 50 metros. A porção sul apresenta marcas de erosão aparente no horizonte C que tende a evoluir para um evento semelhante ao da parte norte do corte. Pedologicamente um argissolo evoluído de rocha ígnea – sienogranito. Marcas de eluviação e iluviação estão presentes entre os horizontes C e B. Não existem obras de contenção ou projeto de drenagem. Horizonte C é erodido pela água da chuva, ocasionando o escorregamento dos horizontes sobrepostos, carreando material e formando leques de deposição de argila e areia em área de baixo topográfico – área de duplicação da rodovia.



*Figura 59: Talude 30;*

Ponto 30: Coordenadas:  $-30^{\circ}26'7''$ ,  $-51^{\circ}28'39''$ , altitude 55 m (km 338 + 600m).

$l = 140 \text{ m}$	$h = 11,0 \text{ m}$	$\alpha = 38^{\circ} - 41^{\circ}$
---------------------	----------------------	------------------------------------

Talude com a presença de 2 diques na direção  $32^{\circ}$  e com mergulho de  $70^{\circ}$ . Um dique estreito, bem definido, com aproximadamente 80 centímetros de largura e outro largo e parcialmente erodido (difícil medição). Ruptura do talude parece ser condicionada por um arranjo de discontinuidades como mostrado na imagem acima. O perfil pedológico é formado por horizonte C de 10 metros com diques plásticos, horizonte B com 50 centímetros e horizonte A orgânico de 30 centímetros. As marcas verticais de fluxo de água se caracterizam pelos sulcos bem marcados na face. A geometria do talude contribui para menor interferência das gotas da chuva na erosão, mas os diques plásticos trazem instabilidade geotécnica para este corte.



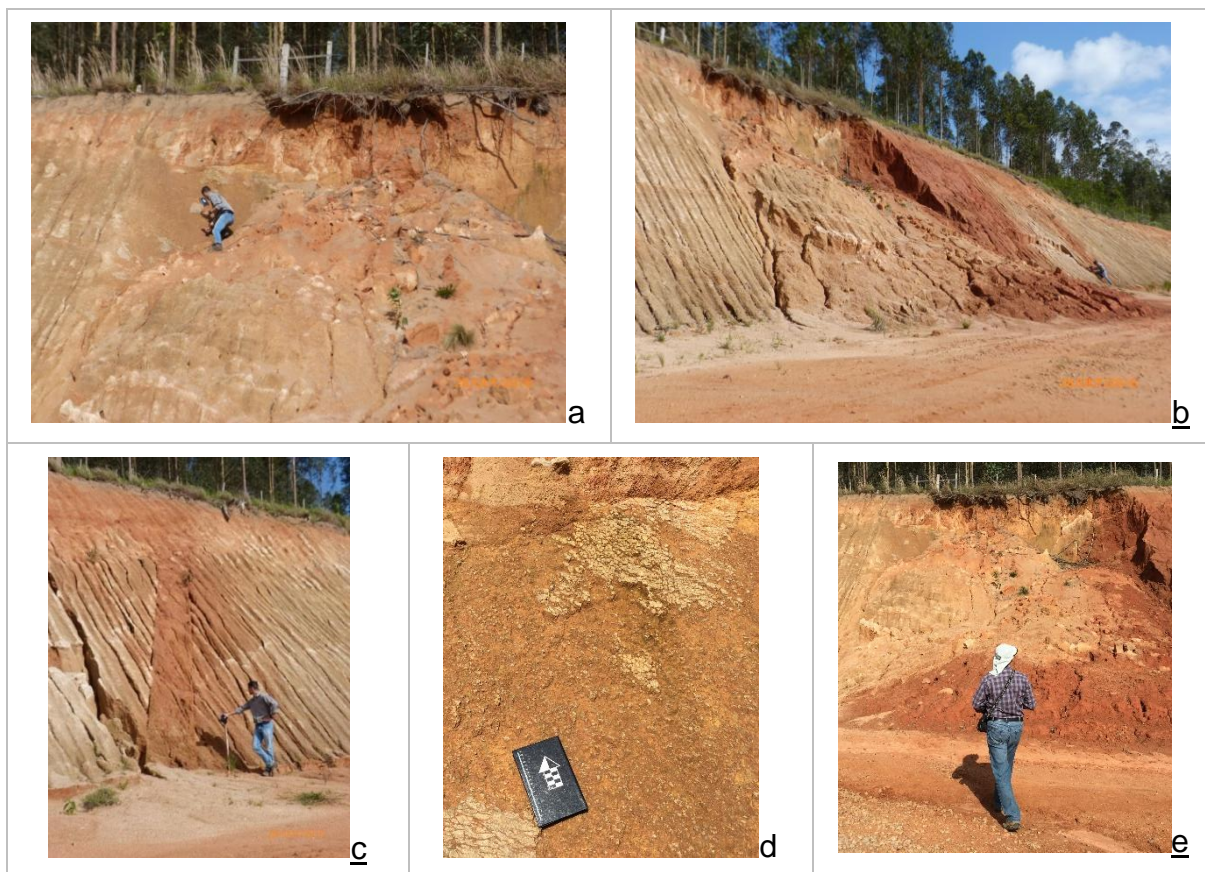


Figura 60: a) erosão dos horizontes superficiais. b) perfil da ruptura. c) dique argiloso – plástico - no horizonte C friável. d) erosão dos horizontes no plano do escorregamento inserido no horizonte C com a ocorrência de dique argiloso.





*Figura 61: Talude 31;*

Ponto 31: Coordenadas:  $-30^{\circ}24'1''$ ,  $-51^{\circ}26'42''$ , altitude 40 m (km 333 + 600m).

$l = 250 \text{ m}$	$h = 6,0 \text{ m}$	$\alpha = 37^{\circ}$
---------------------	---------------------	-----------------------

Talude inserido nos sienogranitos Serra do Herval e formado predominantemente pelo horizonte B com marcas de eluviação e iluviação. Não apresenta problemas geotécnicos, apenas marcas de escorregamento da vegetação que não se desenvolveu nos dois extremos do corte, expondo o horizonte pedológico. A altura, inclinação, coesão do horizonte pedológico e drenagem no sopé mantém a estabilidade do talude.



*Figura 62: Talude 32;*

Ponto 32: Coordenadas:  $-30^{\circ}23'40''$ ,  $-51^{\circ}26'21''$ , altitude 30 m (km 332 + 600m).

$l = 320$ m	$h = 10,0$ m	$\alpha = 70^{\circ}$
-------------	--------------	-----------------------

Corte rochoso com alto ângulo de inclinação. Possui canaletas de drenagem no topo e na superfície. Destaque para a cota de 30 metros, onde ocorre a exposição de um perfil totalmente rochoso, o R não escavável fortemente fraturado proveniente de sienogranito. As estruturas de faturamento são controladas por uma feição regional perpendicular a estrada, não trazendo problemas para risco de escorregamento ao corte. As feições estruturais tem sentido noroeste e sudoeste. O horizonte C é inexistente, o horizonte R está em contato direto com o horizonte B argiloso, já sem marcas reliquias. O horizonte A é centimétrico.

## 4.1 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Autores já citados aqui, como Phillip et. al. (2007) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006), mostram que as principais estruturais regionais do Batólito Pelotas estão na direção Nordeste, e que são Zonas de Cisalhamento Dúcteis e Rúpteis/Frágeis, até as fraturas e falhas. Phillip et. al. (2007) descreve as estruturas do Batólito como um complexo arranjo tectono-estratigráfico controlado e segmentado por zonas de cisalhamento dúcteis de expressão regional de direção N20-40° e N60-80°E e N30-40°W.

A BR-116 foi construída em 1948, passa por diversos estados, pois segue de Jaguarão (RS) até Fortaleza (CE), perfazendo 4.513 quilômetros paralelamente à costa brasileira. No estado do Rio Grande do Sul, foi alocada entre as rochas cristalinas do Batólito Pelotas e a Planície Costeira, no sentido SW-NE. Provavelmente a topografia foi determinante para a escolha da localização do percurso.

As principais feições geológicas são quase paralelas à BR-116 no estado (fig. 22), chamando a atenção para problemas relacionados às estruturas geológicas reliquiares presentes no entorno da rodovia. Taludes em rocha construídos em sentido paralelo as estruturas regionais podem ser um fator de risco para tombamentos. As estruturas regionais ainda podem estar relacionados com erosões e escorregamentos em forma de cunha quando associadas à estruturas locais formadas por movimentação tectônica, resfriamento repentino ou até mesmo por ação humana (desmonte com explosivos).

As principais feições observadas e medidas nos taludes rochosos, ou que representam estruturas reliquiares, foram plotadas em Estereograma (fig. 64). As duas principais direções locais coincidem, ou se aproximam, das orientações regionais descritas na bibliografia. Por vezes, as estruturas locais demonstram ter relação com os problemas de erosão acentuada e até mesmo escorregamento. Nos taludes rochosos, ou parcialmente rochosos, por vezes, dependendo do nível de erosão atingido, ocorrem pequenos processos de erosão no encontro de fraturas, formando blocos instáveis na forma de cunha. O cruzamento/interceptação de estruturas em ângulos fechados também contribui para a formação de matacões, através da infiltração d'água e do processo de esfoliação esferoidal.

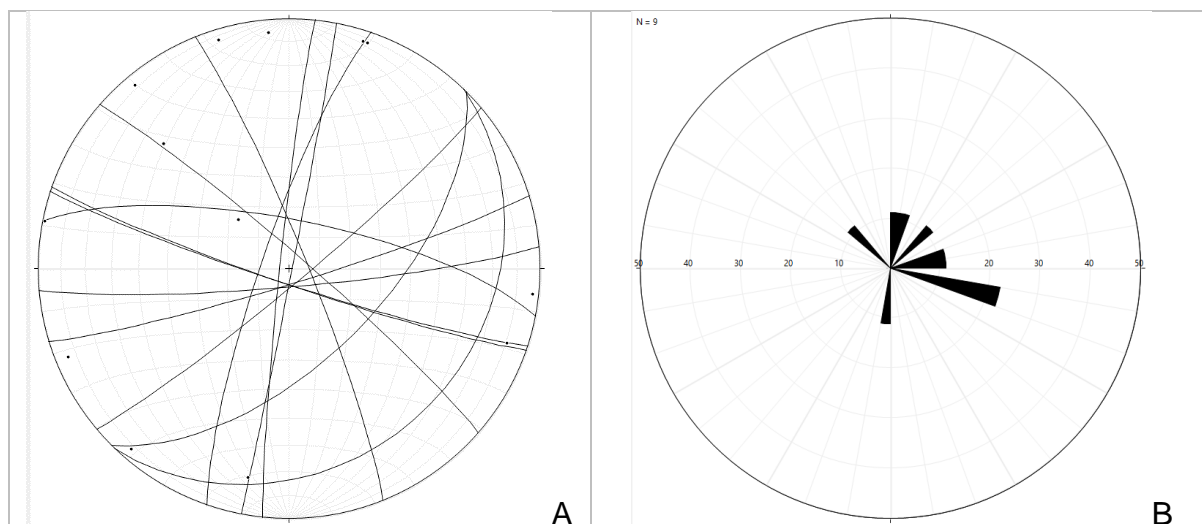


Figura 63: A) Sistema de fraturas dos Taludes rochosos plotados no estereograma. B) Diagrama de rosetas das fraturas.

## 5. ENSAIOS LABORATORIAIS GEOTÉCNICOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos seguindo a metodologia de ensaios laboratoriais apresentada, através de investigação indireta e direta. Os dados adquiridos por difração de raios X, análises de Microscópio Eletrônico de Varredura e ensaios de Cisalhamento seguem abaixo.

### 5.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A execução sistemática de análises químicas de rochas magmáticas começou em meados do século XIX, podendo considerar-se como marco histórico o trabalho de Von Bursen em 1853 sobre os basaltos da Islândia. Logo, com o desenvolvimento de novas metodologias e equipamentos, as análises químicas tornaram-se uma ferramenta corriqueira e indispensável no estudo de numerosas feições do magmatismo (WERNICK, 2003). O conceito de geoquímica moderna pode ser definido como a ciência ou o estudo da química (inorgânica e orgânica) de forma qualitativa e quantitativa, definindo a origem, abundância, circulação, distribuição e modificação dos elementos químicos da Terra. Esta tem competência para entender processos geológicos e assim definir a formação e classificação

dos minerais e rochas (PRESS et al., 2006). Processos estes que envolvem magmatismo, cristalização, intemperismo, metamorfismo, precipitação química, entre outros.

A difração auxilia na análise dos minerais invisíveis a olho nu, se tornando uma ferramenta perfeita para a descrição de argilominerais. A seguir, apresenta-se o programa de coleta das amostras para os estudos de difração de raios X e seus respectivos resultados interpretados, considerando o objetivo do trabalho. O Talude 8 foi escolhido como talude-tipo por ser representativo dos eventos de erosão hídrica e física, envolvendo processos avançados e complexos que tendem a ocorrer ao longo do tempo nos demais taludes de corte. Os taludes 15 e 30 também foram selecionados para análise de DRX, por apresentarem eventos geológicos/geotécnicos importantes.

Os principais minerais relacionados a rochas cristalinas da área de interesse, ao intemperismo de granitos e gnaisses e à alteração da rocha fonte encontrados na bibliografia estão listados na tabela abaixo (tab. 4), juntamente com seus ângulos  $2\theta$  (2 theta) principais e secundários.

*Tabela 4: Tabela com minerais e seus respectivos ângulos  $2\theta$ . Em negrito o ângulo principal (Fonte: WebMineral, 2017);*

Albita	Caulinita	Goethita	Hematita	Ilita	Ilmenita	Magnet.	Microcl.	Muscov.	Ortocl.	Quartzo
23.69	<b>12.33</b>	<b>21.24</b>	<b>33.28</b>	<b>20.03</b>	<b>32.48</b>	<b>35.45</b>	21.01	8.88	22.09	20.85
27.76	24.85	33.28	35.74	24.3	35.25		<b>27.06</b>	<b>26.83</b>	23.39	<b>26.65</b>
<b>28.07</b>		36.62	54.23	35.02	53.01		27.5	34.88	<b>28.04</b>	50.14

### 5.1.1 Talude 8: talude-tipo

Coordenadas: -30°43'14,5"; -51°36'33", altitude 30m (Km 374).

No talude 8, foram coletadas 3 amostras (8A, 8B e 8C), e cada ponto de coleta foi selecionado com base nos horizontes e na sua sucessão vertical, nas condicionantes geológicas de estruturas reliquias e no grau de alteração/intemperismo. A amostra 8A foi coletada na porção central-baixa (aproximadamente 4 metros da superfície topográfica/terreno), representando o horizonte C escavável que perfaz 80% do talude de 13 metros de altura. É uma amostra friável, que mantém a estrutura petrográfica da rocha-



mãe, mas é sensíveis a perturbações com batidas do martelo-geológico. A análises de DRX demonstraram ser um horizonte C (R escavável) arenoso (fig. 65), formado predominantemente por minerais de quartzo resistatos e plagioclásio (albita). A amostra apresenta também porções intermediárias de caulinita, ortoclásio (feldspato potássico), hematita, ilmenita, magnetita e em menor quantidade, outros argilominerais como ilita (micáceo) e goethita. Os minerais que resultam do intemperismo são caulinita, ilita e goethita.

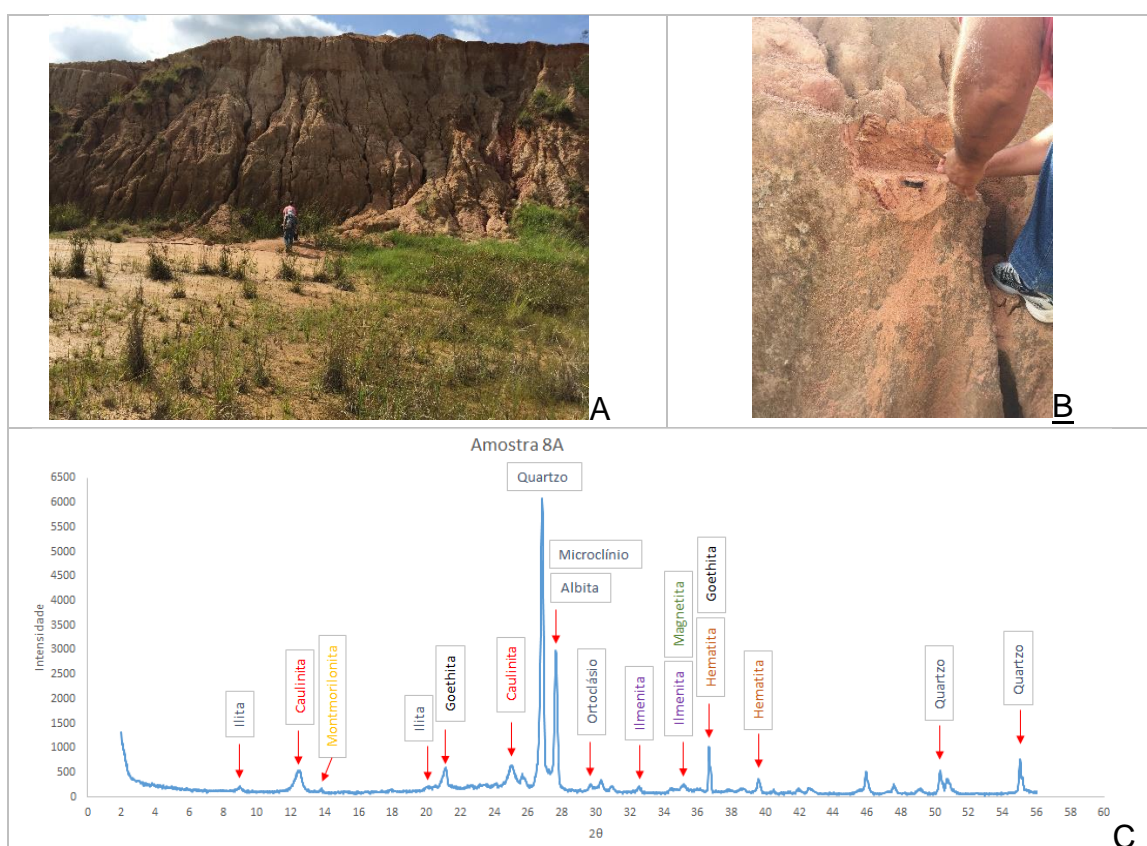


Figura 64: A) Foto frontal do Talude 8. B) Foto de detalhe do local de coleta das amostras (8A) para ensaio de Cisalhamento direto e de adensamento (coordenadas  $-30^{\circ}43'13''$  e  $-51^{\circ}36'30''$ ). C) Difratoograma da amostra 8A.

A amostra 8B foi coletada a 2 (dois) metros acima do sopé do talude, onde o horizonte C está em teoricamente com o processo de intemperismo menos acentuado do que a amostra anterior. Porém, a difratometria mostra índices mais elevados de argilização (argilominerais) como a ilita, caulinita e/ou montmorilonita. A presença de quartzo ainda é predominante, mas em menor proporção, como o plagioclásio. Este efeito pode ser causado pela iluviação do solo, através da deposição de argilominerais removidos das camadas/horizontes superiores. Outro ponto importante a ressaltar é que a amostra 8B foi

coletada próximo a uma estrutura reliquiar (fig. 66 A), também sendo um indício de maior grau de alteração do que a amostra 8A. Foram identificados minerais de illita, muscovita, caulinita/montmorilonita, microclínio, quartzo, albita, ilmenita, goethita e hematita.

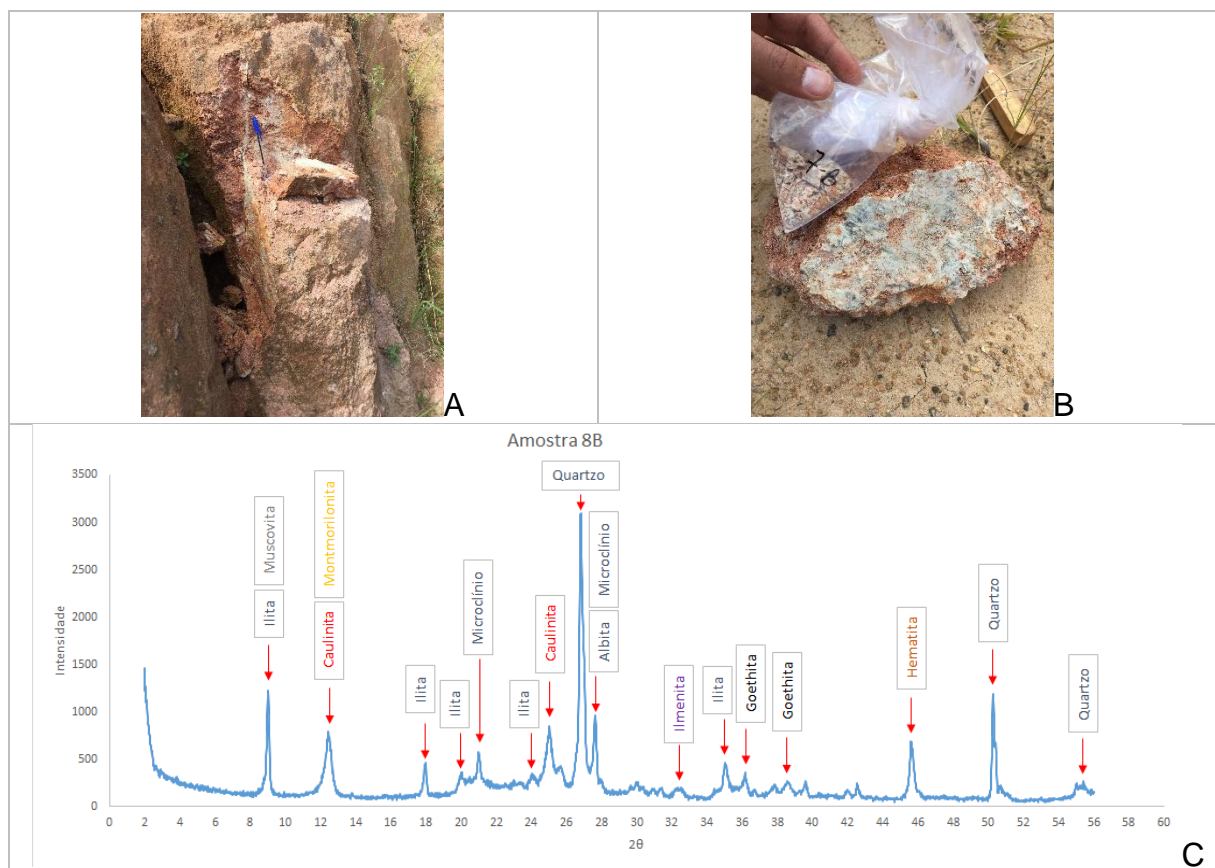


Figura 65: A) e B) Amostra 8B, coleta nos planos de falha preferencial, onde ocorre acúmulo de argila proveniente da alteração do feldspato; C) Difractograma da amostra 8B.

A amostra 8C foi coletada a menos de 1 (um) metro do sopé do talude, onde o processo de intemperismo estaria menos acentuado do que a amostra 8A. Como na amostra 8B, a difratometria mostra índices elevados de argilização (argilominerais) como a illita e caulinita. A presença de quartzo ainda é significativa, mas não dominante, pois o plagioclásio é o mineral predominante. O quartzo exposto sofre influência mecânica do fluxo superficial de água. Por isto, um ponto importante a ressaltar é que a amostra 8C foi coletada próximo ao sopé do talude, onde a camada está exposta ao intemperismo e ao fluxo hídrico por tempo considerável.

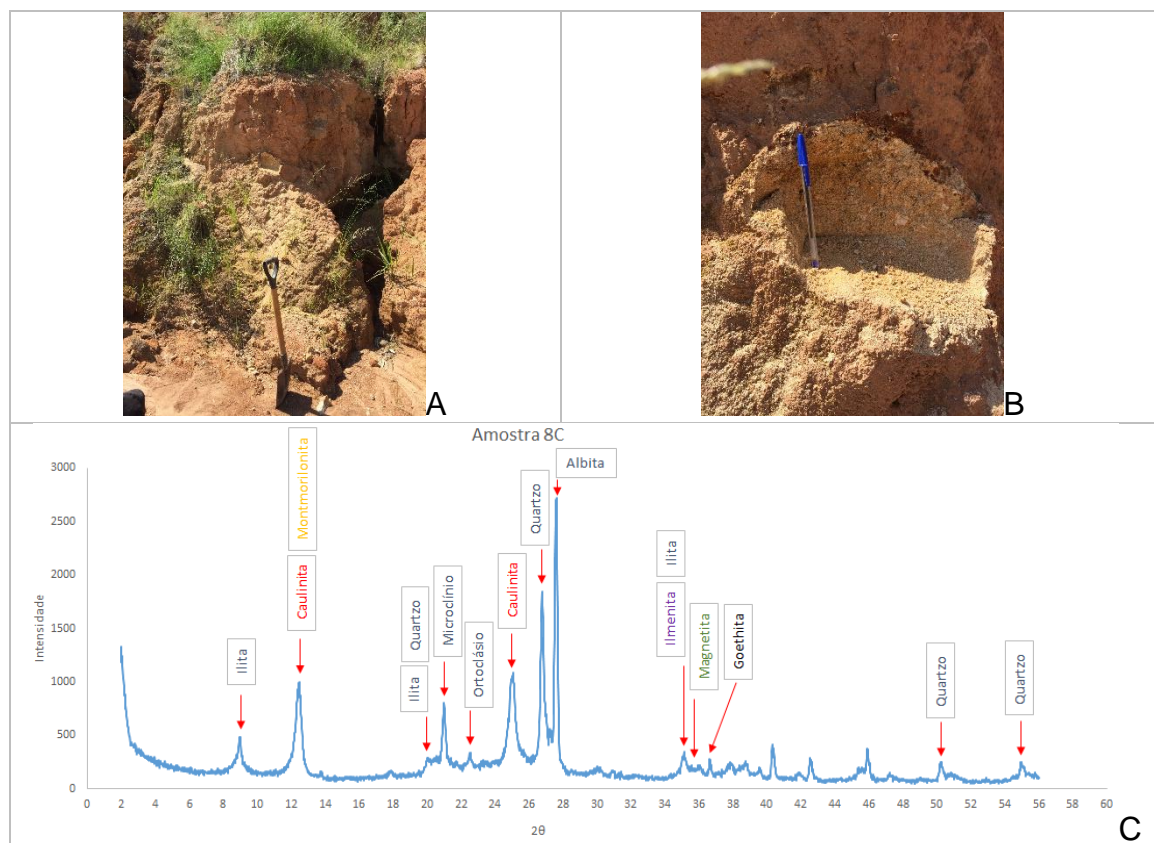


Figura 66: A) Coleta da amostra 8C, B) Detalhe do local da coleta no horizonte R escavável alterado, e C) Difratoograma da amostra 8C.

### 5.1.2 Talude 15

Coordenadas:  $-30^{\circ}37'20''$ ;  $-51^{\circ}32'24''$ , altitude 60m (Km 359).

Esse talude possui a presença de concentração argila, provavelmente associadas aos diques, essas concentrações parecem controlar as erosões e os pipings. O rompimento do talude e a vegetação dificultam a inspeção in situ.

Como mencionado no capítulo 4, esse talude está localizado na Suíte Granítica Dom Feliciano (Fácies Cerro Grande – Monzogranitos), possui 250 metros de comprimento, aproximadamente 10 a 13 metros de altura, e inclinação de  $36^{\circ}$  na porção estável e  $22^{\circ}$  de ângulo de repouso pós ruptura/escorregamento rotacional. A presença de argila nos horizontes B e C também tende a definir as erosões e os pipings.

Nesse talude 15, foram coletadas duas amostras: i) a amostra 15A no dique argiloso aflorante na borda interna direita (vista frontal) da ruptura rotacional, a cerca de 8 metros de altura em relação ao sopé do talude; e ii) a amostra 15C, coletada no horizonte C que

rompeu, este que é predominante do talude. A amostra C foi coletada próxima ao dique, sendo a rocha encaixante.

As análises de DRX permitiram confirmar a composição argilosa do dique. A amostra é formada predominantemente por caulinita, seguida por quantidades pouco expressivas de quartzo e illita. Por serem materiais plásticos, a argilização do dique pode condicionar a ruptura do talude.

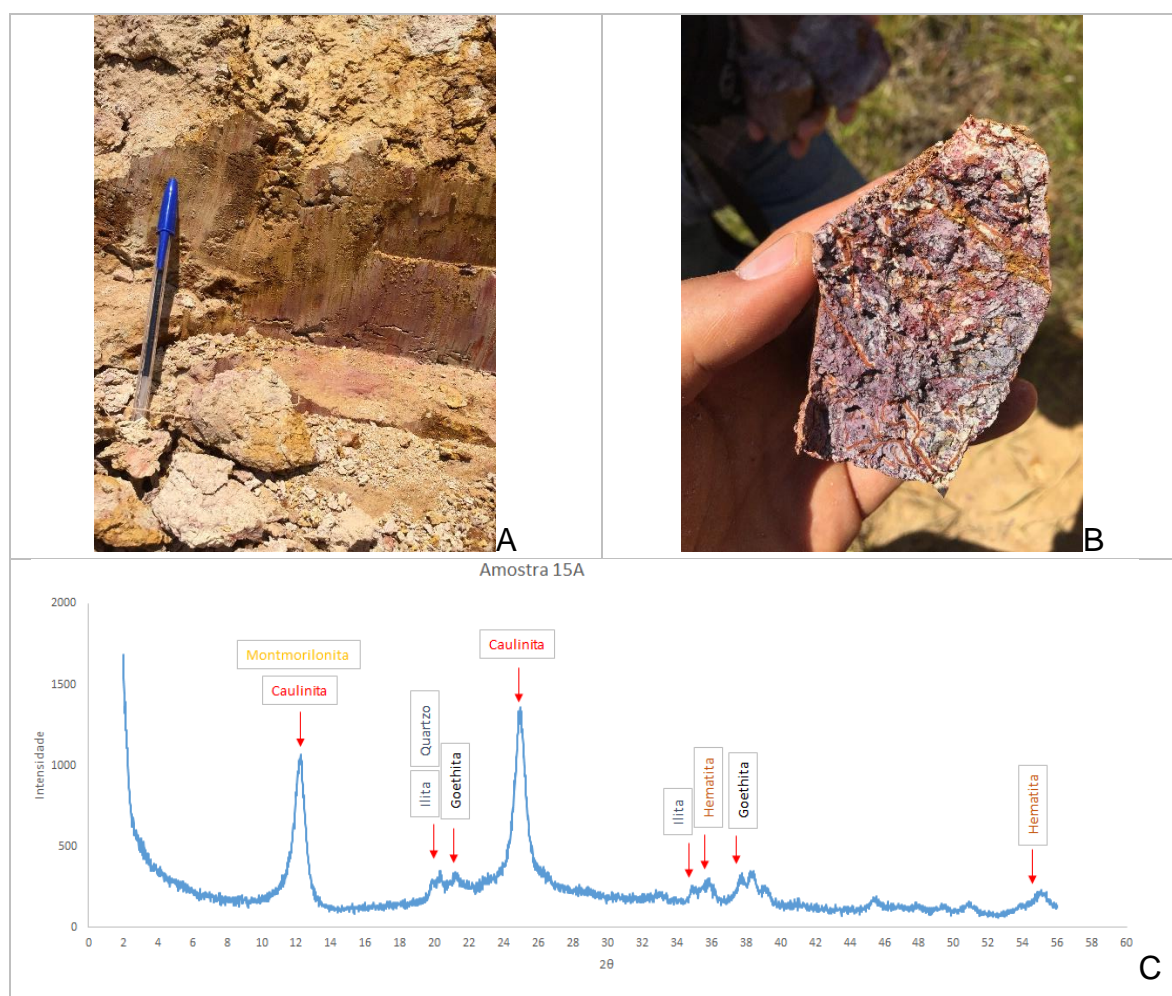


Figura 67: A) Foto do ponto de coleta da amostra do material do dique (15A), B) Foto de detalhe da amostra 15A; C) Difratoograma de raios X da amostra 15A.

A amostra 15C apresenta também, como a amostra 15A, forte argilização, provavelmente caracterizada pelos eventos de padrão "stripping" horizontal e vertical e também pela iluviação de óxidos de Fe do horizonte B superior. A predominância de argilominerais é acentuada e evidente. Os picos de caulinita e/ou montmorilonita na



difração de raios X mostram que o horizonte C é formado praticamente por argilominerais. Essa forte concentração de argila torna o horizonte C tão plástico quanto o dique. A soma dos fatores indicam ser a causa da ruptura deste talude. Eventos de ruptura rotacional tão bem definidos são raros ao longo do trecho estudado.

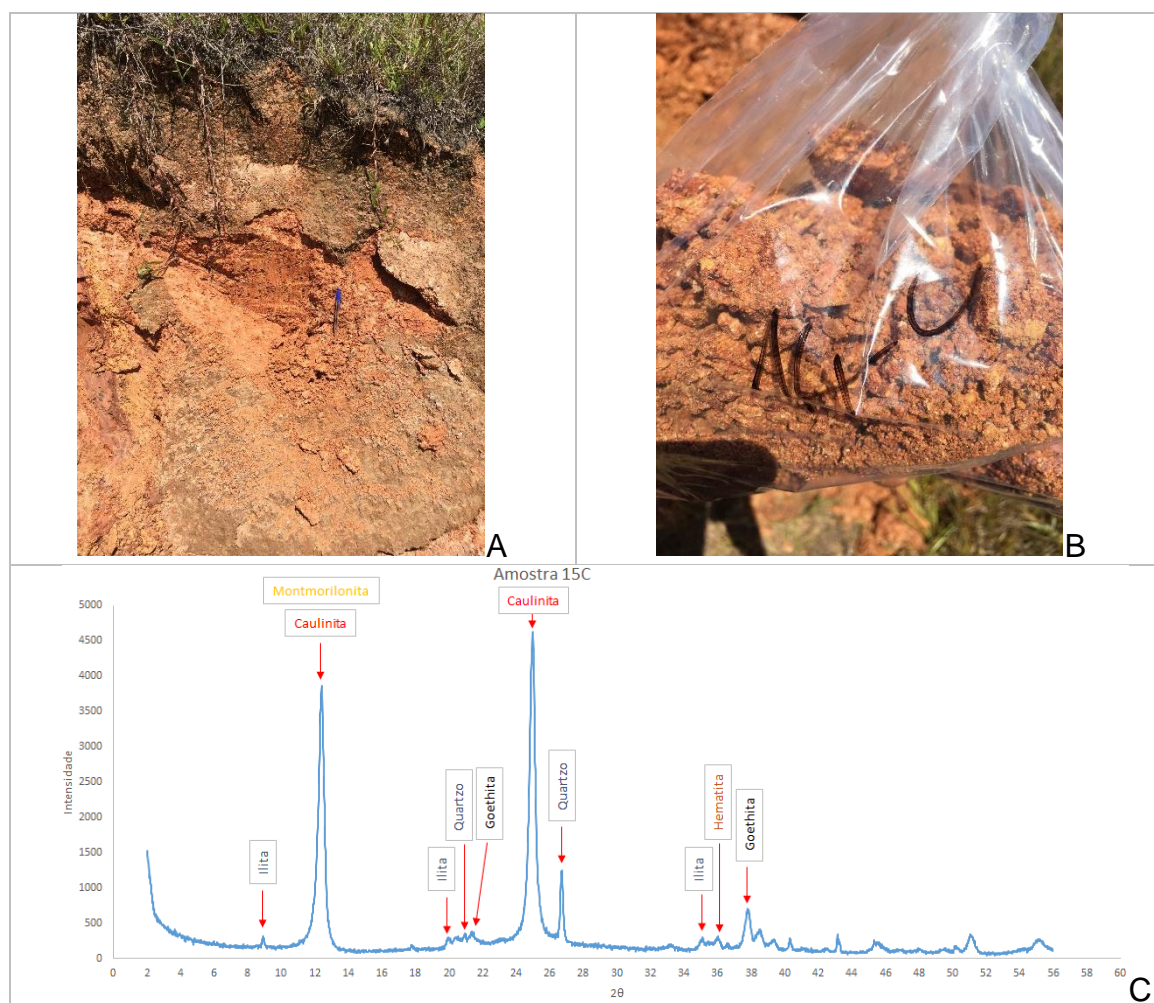


Figura 68: A) Foto detalhe do local de coleta da amostra 15C, horizonte C ou R escavável; B) Foto de detalhe da amostra 15C; C) Difratoograma da amostra 15C.

### 5.1.3 Talude 30

Coordenadas:  $-30^{\circ}26'3,61''$ ;  $-51^{\circ}28'36,65''$ , altitude 30m (Km 338+500).

Esse talude também está situado sobre rochas da Suíte Granítica Dom Feliciano, Fácies Serra do Herval, que é constituído por sienogranitos. O talude possui aproximadamente 300 metros de comprimento, 8 metros de altura e inclinações de  $66^{\circ}$ . Nesse talude ocorrem dois



diques com orientação 081- 087 e com grau de alteração diferente da rocha encaixante, ou o seu horizonte C (R escavável) predominante no talude. O material do horizonte C é friável, mas a ocorrência do dique pode ter influenciado para o escorregamento e erosão acentuada (fig. 70 A).

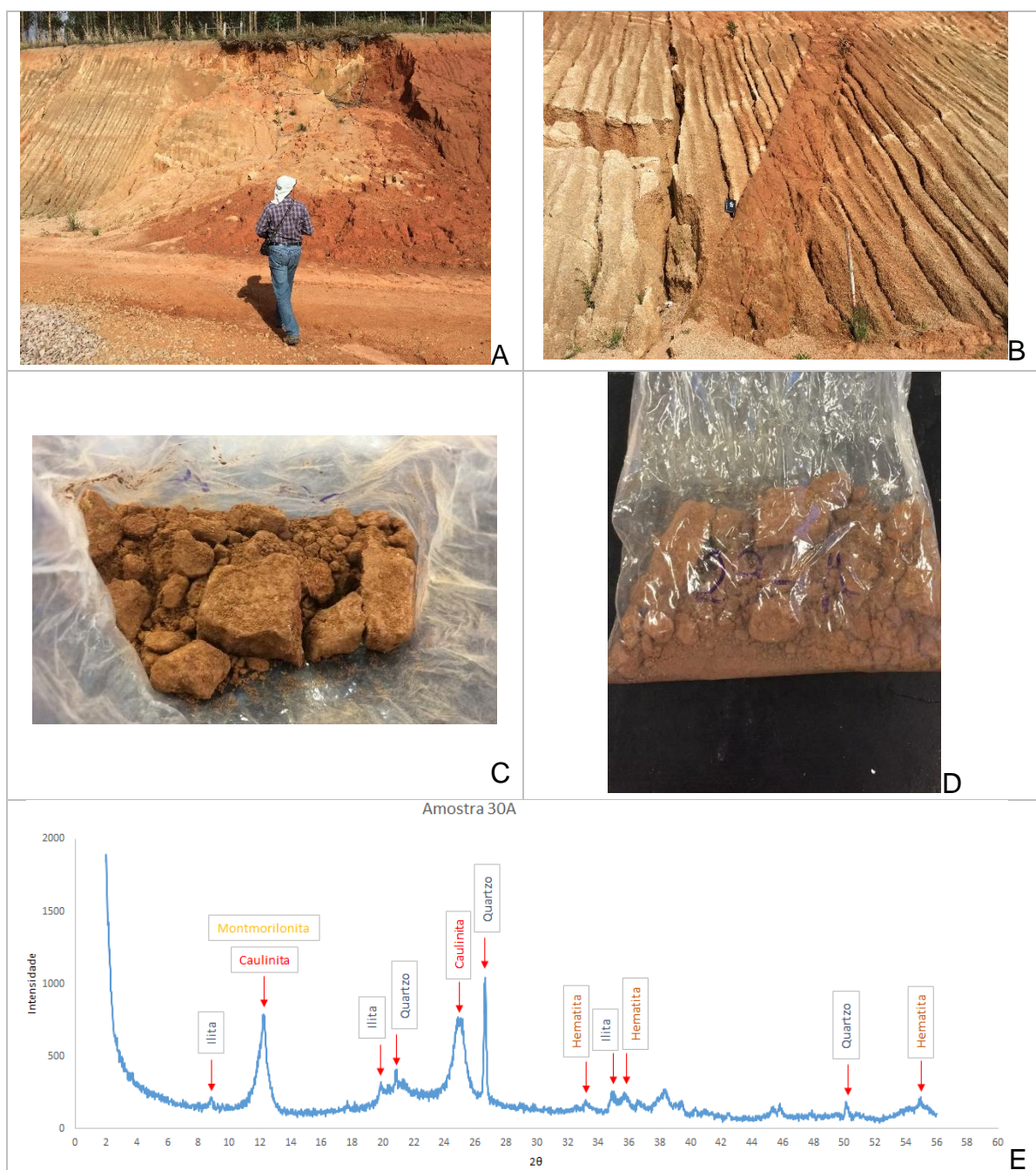


Figura 69: A) Foto frontal do talude 30. B) foto frontal de detalhe do dique mais ao sul e sem rompimento ou erosão. C) e D) Fotos da amostra 30-A, dique fortemente alterado, prevalecendo argila na fácies e entre os minerais resistentes altamente intemperizados. E) Difractograma da amostra 30<sup>a</sup>.

A amostra 30B apresenta minerais principais de caulinita, quartzo, microclínio e albita. Como minerais secundários, illita, ortoclásio, ilmenita, magnetita, hematita e goethita.

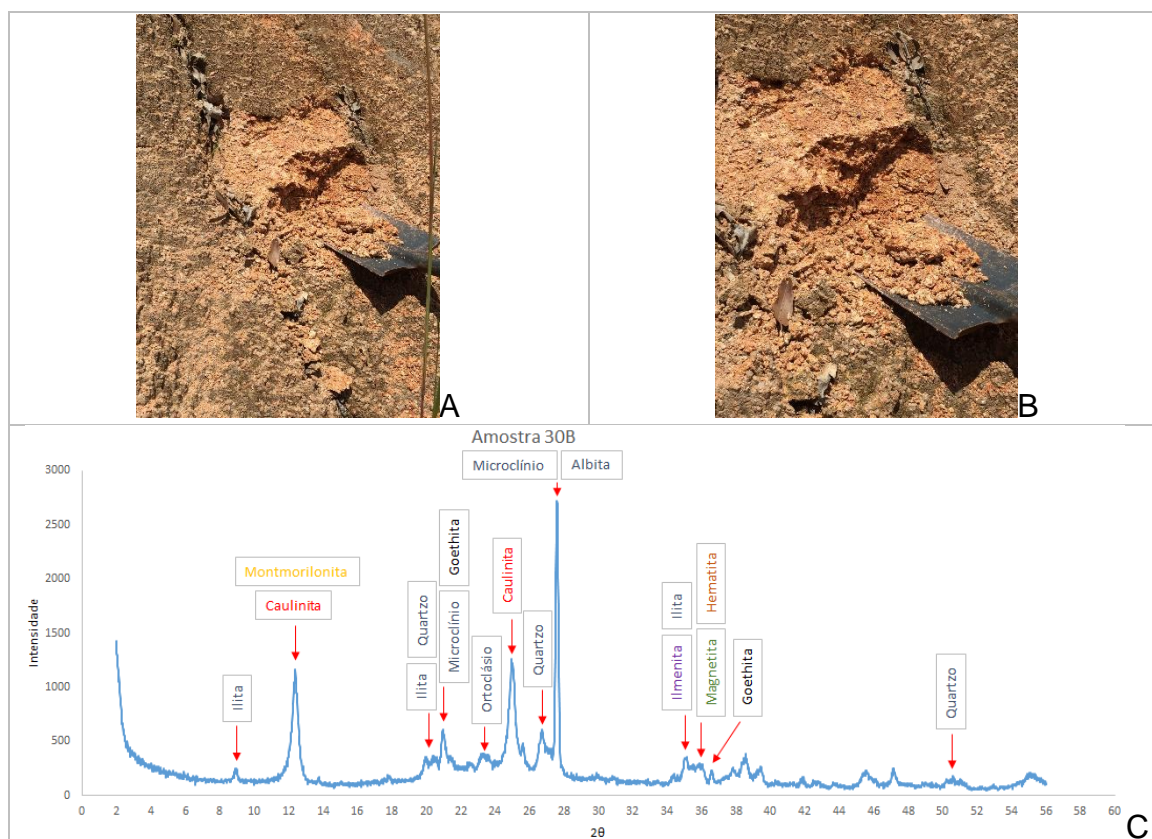


Figura 70: A) e B) Fotos de detalhe da coleta da amostra 30B, material granular fortemente alterado, com aspectos e estruturas reliquias da rocha fonte, mas com uma leve coesão e baixa resistência-friável; C) Difratoograma da amostra 30B;

## 5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA (MEV)

IRFAN (1988, apud Bastos 1991) comenta que a determinação real da fração argila de solos saprolíticos é um problema, pois argila está fortemente presa aos minerais primários. A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), nesta questão, permite analisar a textura e a topografia dos minerais, a distribuição dos elementos presentes e a relação de crescimento de argilominerais nos poros e sobre os grãos detríticos e/ou primários.

As amostras interpretadas para esta análise seguem o princípio das amostras executadas na difração de raios X. Após as análises de DRX, foram executadas as análises no microscópio eletrônico, tendo como objetivo a identificação visual dos minerais definidos nos difratogramas e a avaliação de suas relações texturais e estruturais.



A amostra 8A apresenta minerais de quartzo e caulinita bem definidos e visíveis. Uma matriz de solo sem coesão, material solto, é formada por argilominerais de difícil visualização, que podem ser montmorilonita, illita ou ilmenita, produtos da alteração dos feldspatos. O alto grau de intemperismo e a fragilidade da amostra (perda da estrutura) dificultam a visualização de outros minerais caracterizados na difração.

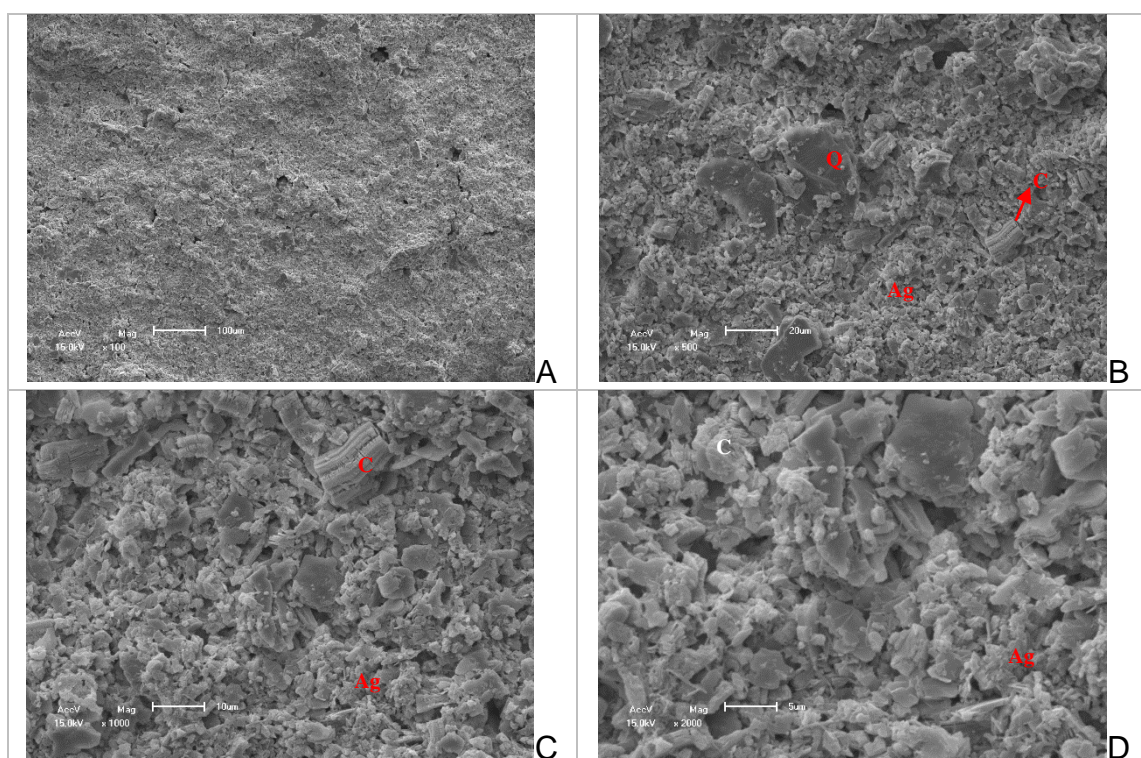
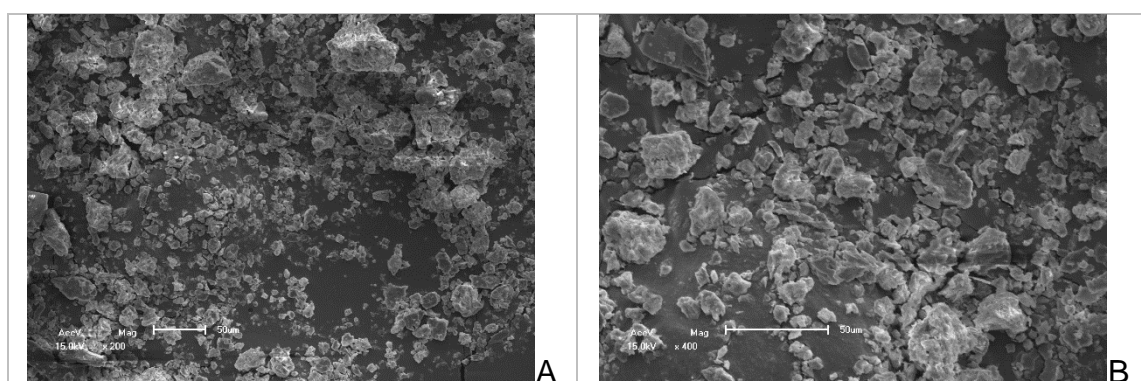


Figura 71: Imagens do MEV da Amostra 8A; Q = quartzo, C = caulinita e Ag = argilominerais. A) Aumento de 100x; B) Aumento de 500x; C) Aumento de 1000x; D) Aumento de 2000x.

As imagens da amostra 8B também mostram a presença de minerais resistatos de quartzo, além dos argilominerais como a caulinita, proveniente da alteração dos feldspatos. Os minerais resistatos apresentam o crescimento de argilominerais de difícil identificação mesmo com aumento de 2000x no microscópio eletrônico.



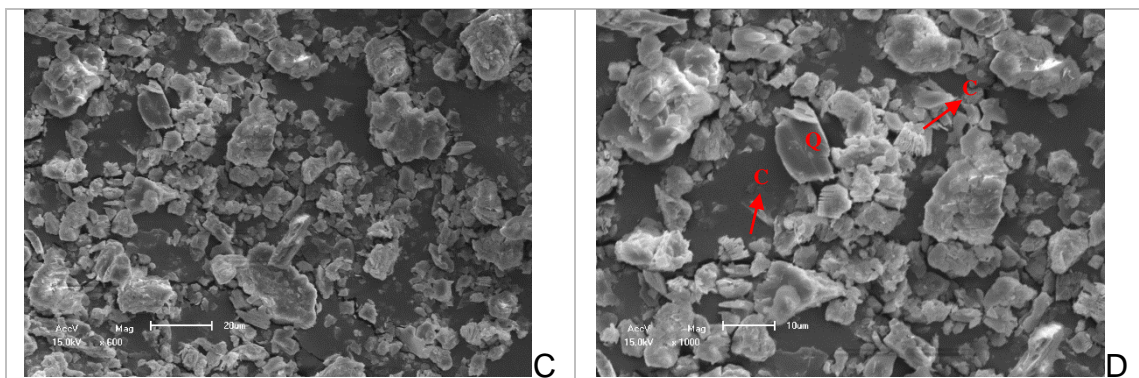


Figura 72: Imagens do MEV da amostra 8B; Q = quartzo, C = caulinita. A) Aumento de 200x; B) Aumento de 400x; C) Aumento de 600x; D) Aumento de 1000x.

Nas imagens da amostra 8C, é possível visualizar o crescimento dos argilominerais sobre os minerais resíduos de quartzo e feldspato, principalmente com o aumento de 500x e 1000x. No aumento de 1000x, a formação de ilita e montmorilonita são nítidas. No aumento de 2000x, há predominância de argilominerais sobre os minerais primários.

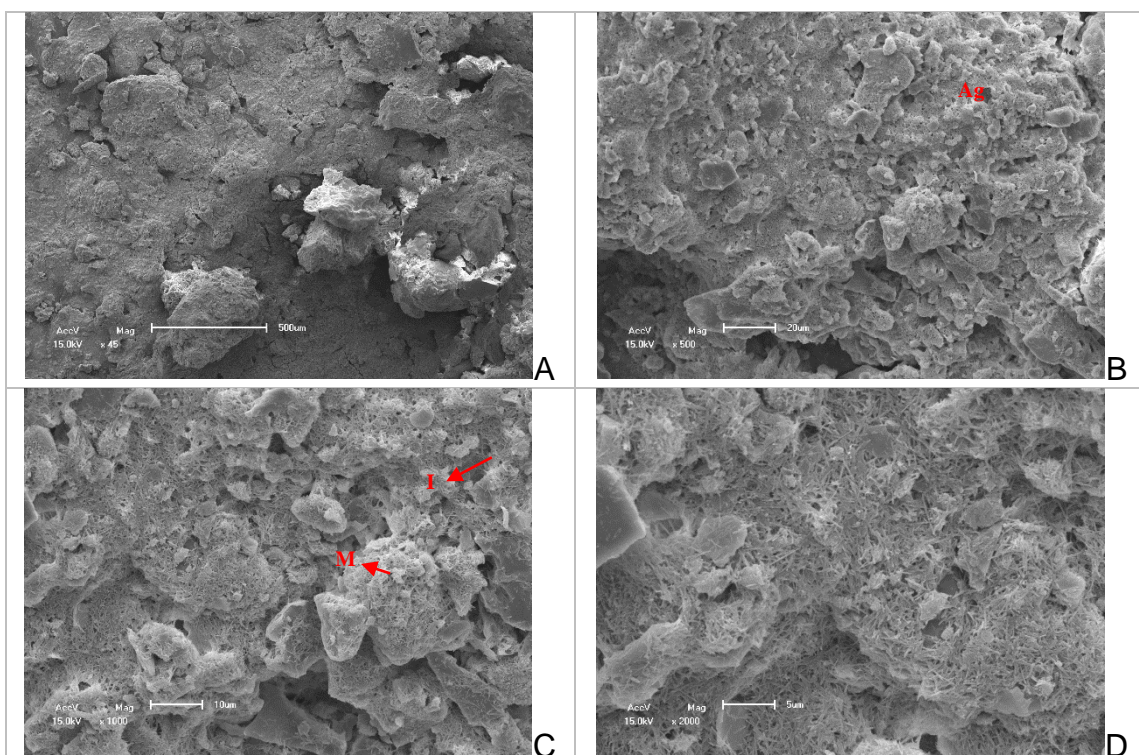


Figura 73: Imagens do MEV da Amostra 8C; Ag = argilominerais, I = ilita e M = montmorilonita. A) Aumento de 45x; B) Aumento de 500x; C) Aumento de 1000x; D) Aumento de 2000x.



A amostra 15A apresenta uma matriz formada totalmente por argilominerais. A imagem com aumento de 100x permite observar o total preenchimento e cobertura dos minerais primários já alterados. Conforme os resultados por difração de raios X, o mineral predominante é o argilomineral caulinita. Nas imagens, é possível visualizar os planos preferenciais laminares, podendo ser caulinita ou minerais de illita.

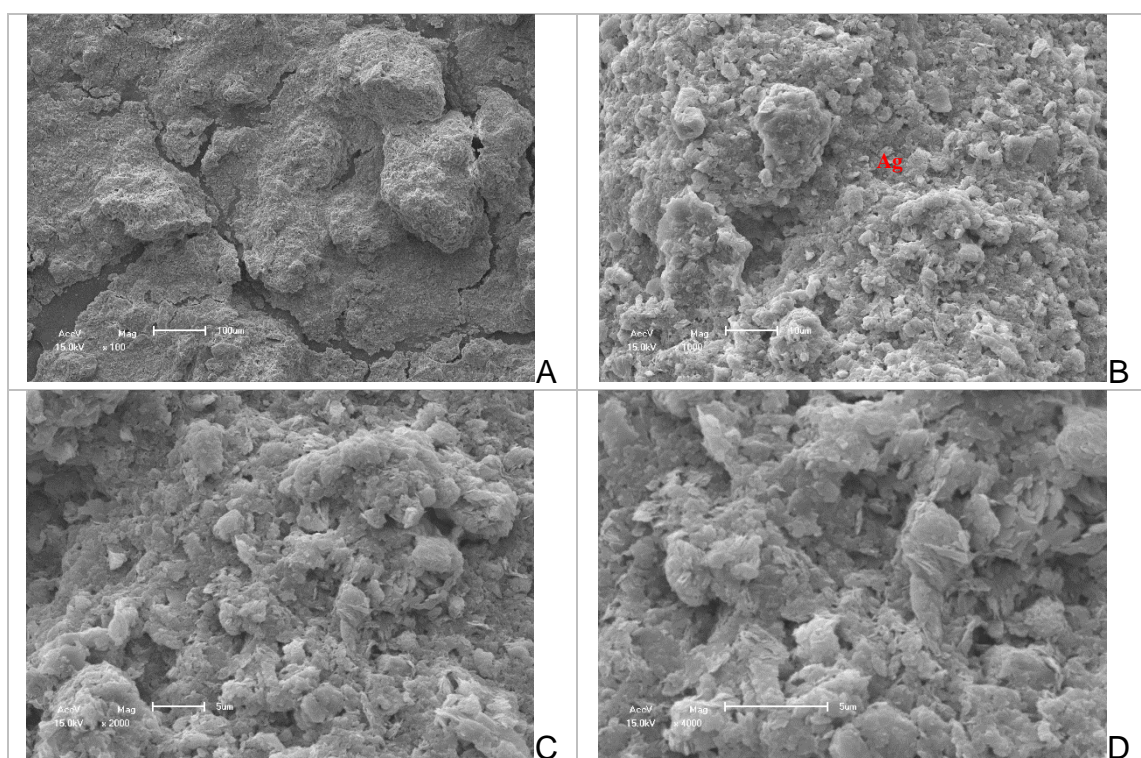
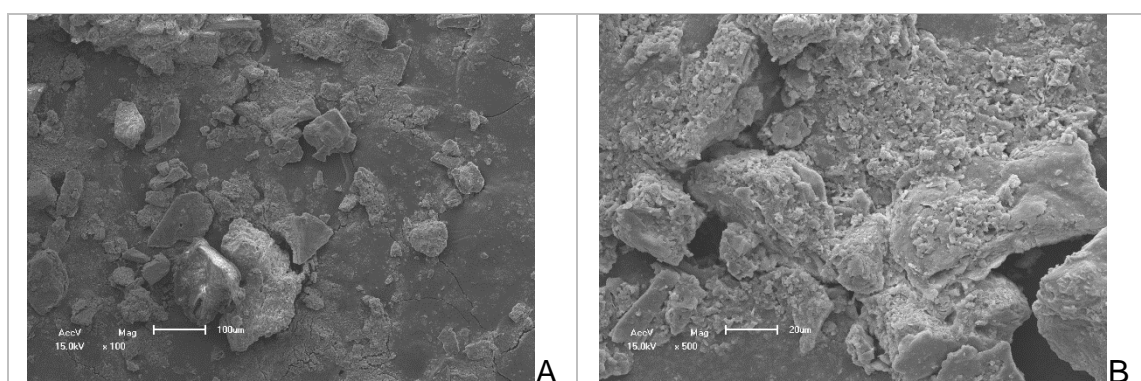


Figura 74: Imagens do MEV da Amostra 15A; Ag = argilominerais. A) Aumento de 100x; B) Aumento de 1000x; C) Aumento de 2000x; D) Aumento de 4000x.

Os resultados de DRX da amostra 15C demonstram uma predominância ainda maior argilominerais do que na amostra 15A. Nas imagens do MEV é possível identificar argilominerais de caulinita e a formação de montmorilonita que recobrem os minerais resistatos primários.





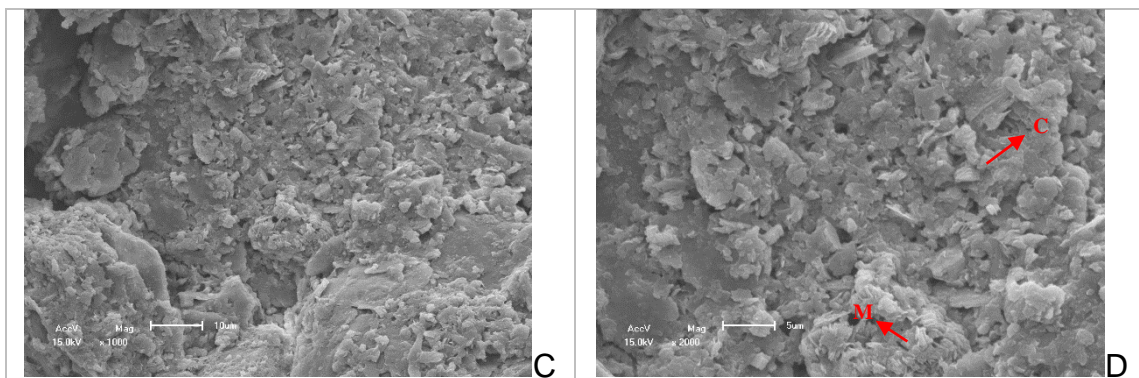


Figura 75: Imagens do MEV da amostra 15C; C = caulinita; M = montmorilonita. A) Aumento de 100x; B) Aumento de 500x; C) Aumento de 1000x; D) Aumento de 2000x.

A amostra 30A mostra a predominância de argilomerais, comprovando os resultados interpretados na difração. As imagens mostram a evolução de caulinita sobre minerais de quartzo. A interpretação visual inicial é difícil, mas com o auxílio dos resultados da DRX é possível observar as características da formação quase total de caulinita.

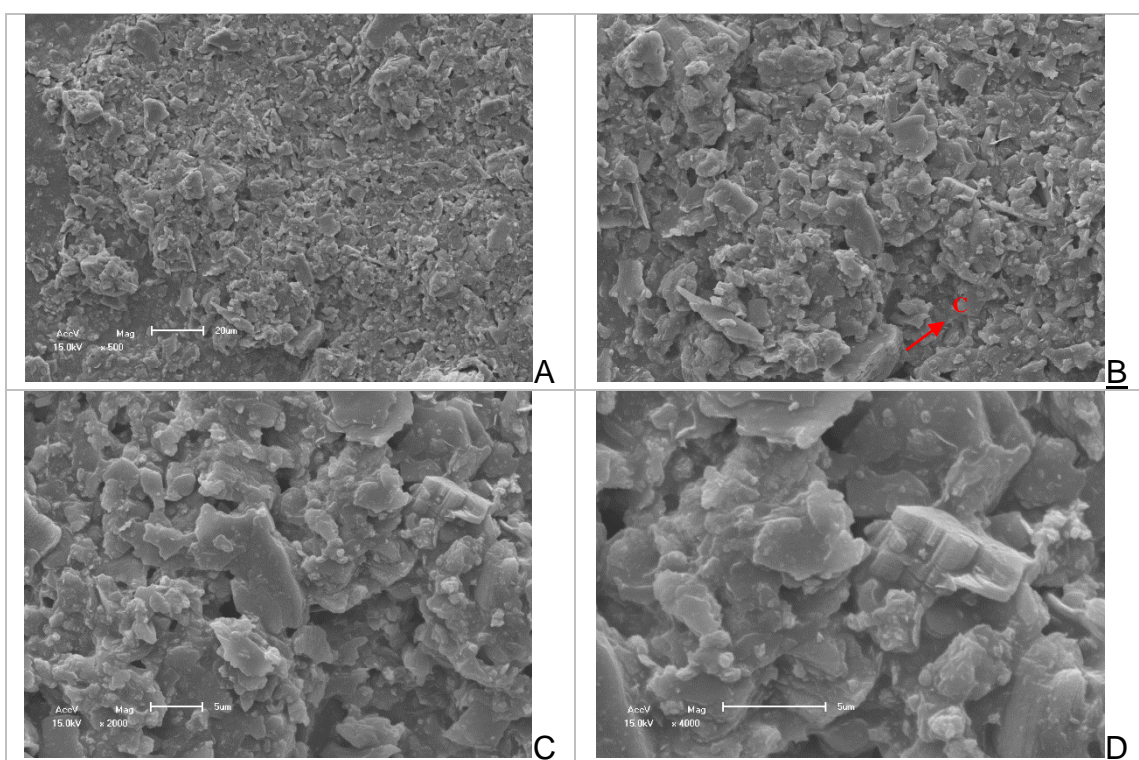


Figura 76: Imagens do MEV da amostra 30A; C = caulinita. A) Aumento de 500x; B) Aumento de 1000x; C) Aumento de 2000x; D) Aumento de 4000x.

Os resultados da interpretação da difração de raios X mostra uma semelhança entre a amostra 30B e a amostra 8C. Na amostra 30B os minerais de caulinita são evidentes, mas

os minerais de illita também estão presentes das imagens. A diferença dos horizontes C nas amostras 8C e 30B é a presença de montmorilonita nas imagens da segunda.

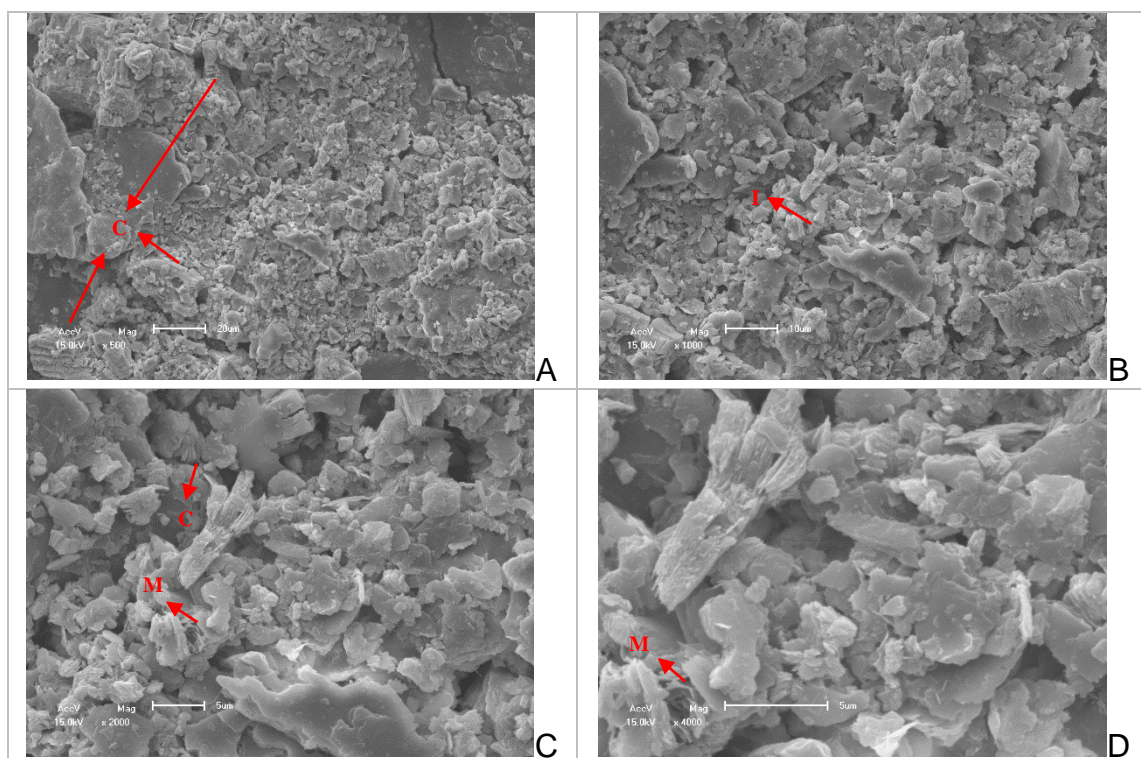


Figura 77: Imagens do MEV da amostra 30B; C = caulinita; I = illita; M = montmorilonita. A) Aumento de 500x; B) Aumento de 1000x; C) Aumento de 2000x; D) Aumento de 4000x.

### 5.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO – TALUDE TIPO

Os ensaios de cisalhamento direto realizados para este trabalho foram executados com amostras indeformadas, remoldadas inundadas e indeformadas inundadas do Talude 8 (talude-tipo), coletadas no horizonte C representativo dos problemas observados em campo. Primeiramente foram ensaiadas amostras indeformadas, com tensões normais de 25, 50 e 100 kPa com umidade natural. A segunda etapa de ensaios realizada para romper as amostras remoldadas da primeira etapa (retroceder o deslocamento horizontal no equipamento), com as mesmas tensões normais de 25, 50 e 100 kPa, mas com os corpos de prova inundados. E, por último, foram ensaiadas amostras indeformadas inundadas com tensões normais de 25 e 50 kPa.

Os ensaios de cisalhamento direto (CD) permitem obter as curvas de tensão cisalhante versus deformação horizontal, deformação vertical versus deformação horizontal, as envoltórias de resistência ao cisalhamento das amostras indeformadas, para as amostras

remoldadas inundadas e para a indeformadas inundadas. Esses resultados permitem obter parâmetros de resistência, como a coesão ( $C$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ).

Os ensaios com amostras remoldadas foram feitos com a reconstituição após ruptura das amostras indeformadas em umidade natural. O procedimento serve para análise de amostras rompidas, ao observar se preservaram estruturas ou coesão, e como se comportam sobre regimes saturados. A seguir, são apresentados os resultados na forma de tabela para as amostras e os gráficos gerados:

*Tabela 5: Amostras do ensaio de Cisalhamento Direto;*

Condição da amostra	Nome da amostra	Tensão Vertical (kPa)	d (cm)	h (cm)	Umidade (%)	Índice de Vazios
Indeformada	8A N2	25	6,04	2,02	10,08	0,652
	8A N5	50	6,0	2,03	11,78	0,657
	8A N15	100	6,0	2,04	12,24	0,664
Reconstituída Inundada	8A RI2	25	6,04	2,02	10,08	0,652
	8A RI5	50	6,0	2,03	11,78	0,657
	8A RI15	100	6,0	2,04	12,24	0,664
Indeformada Inundada	8A I2	25	6,0	2,05	11,41	0,644
	8A I5	50	6,0	2,03	11,78	0,657

### 5.3.1 Ensaios de CD com umidade natural

No gráfico de deformação horizontal *versus* tensão cisalhante (fig. 79), é possível observar que todas as amostras, sob as diferentes tensões normais, apresentam pico de resistência. Os picos das amostras de tensões normais de 25 e 50 kPa possuem curvatura semelhantes, mudando somente no valor do pico da tensão cisalhante. Os resultados mostram um crescimento na ordem de 4x no pico de tensão cisalhante quando o valor da tensão normal dobra. As deformações horizontais atingem deformação final entre 5,5 e 6,5 mm.

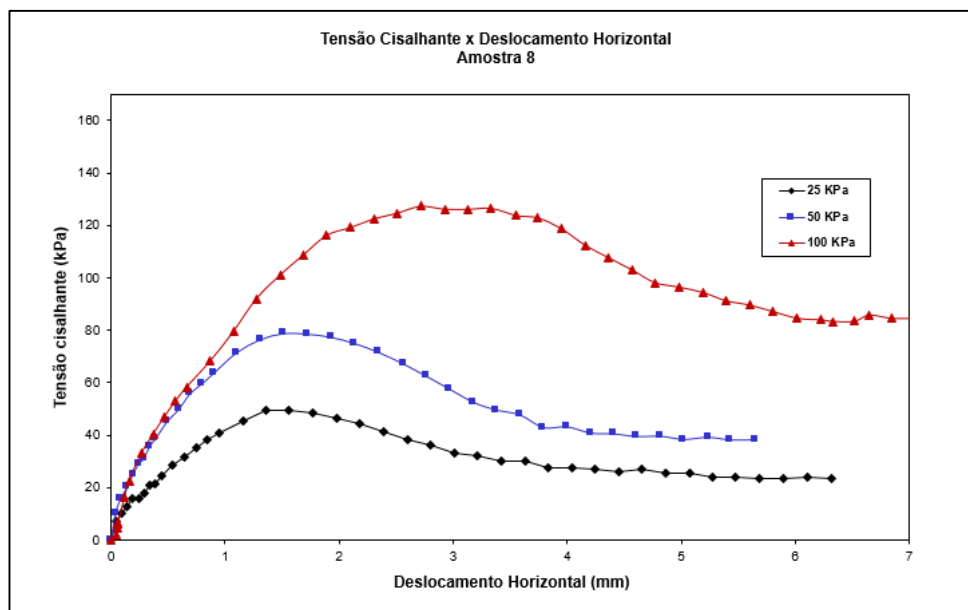


Figura 78: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante da amostra 8 com umidade natural.

A figura do Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal (fig. 80) mostra que apenas a amostra sob tensão normal de 100 kPa expandiu no início do ensaio (a de maior tensão normal). As amostras sob tensão normal de 25 e kPa tiveram comportamento, em relação à curvatura, semelhantes, como acontece no gráfico acima.

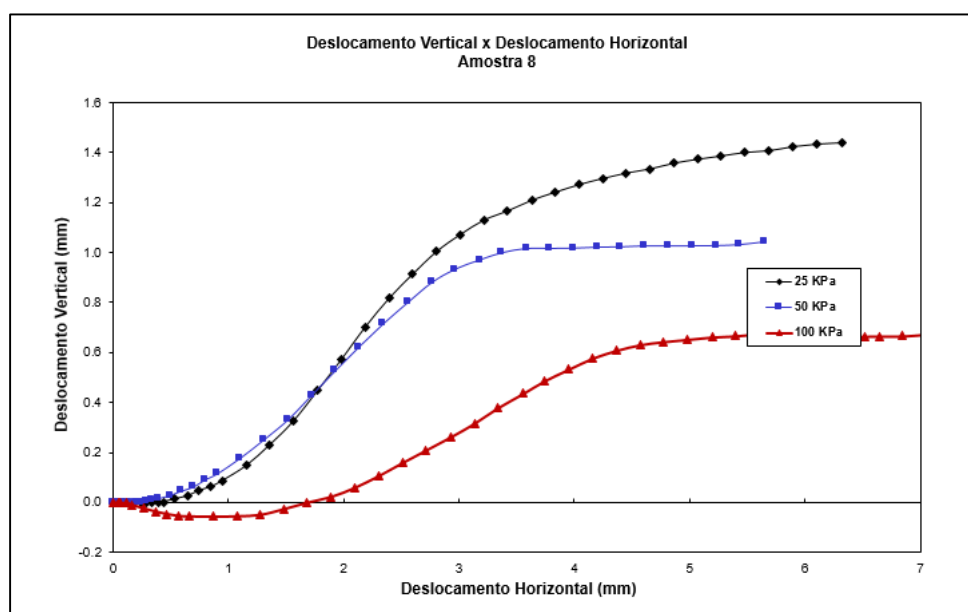


Figura 79: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical da amostra 8 com umidade natural.

A envoltória de ruptura (fig. 81) para os ensaios com umidade natural apresentam parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico com ângulo de atrito de  $45,8^\circ$  e coesão 25,1 kPa. Os resultados mostram que o material tem resistência mecânica inicial, mas que, depois de rompido (parâmetros de resistência pós pico), a coesão cai para 0 (zero). Assim, perdem a resistência da estrutura da matriz e mantém-se praticamente o mesmo ângulo de atrito.

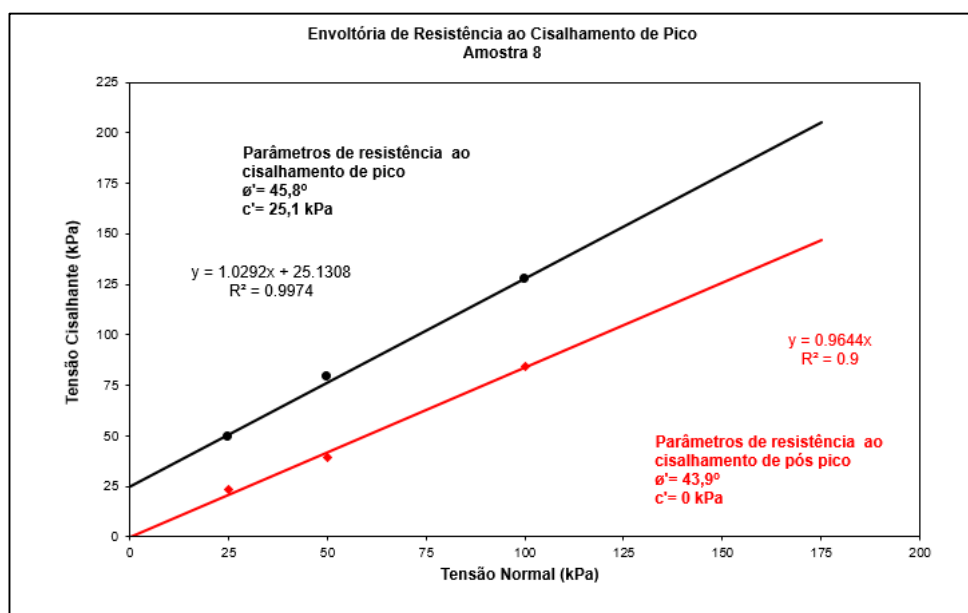


Figura 80: Envoltória ao Cisalhamento de Pico da amostra 8 com umidade natural.

### 5.3.2 Ensaio de CD inundado

As amostras de Cisalhamento Direto Inundados apresentaram, no gráfico de deformação horizontal versus tensão cisalhante (fig. 82), uma perda de resistência em relação às amostras de umidade natural, visualizada pela falta de pico e baixos valores de tensão cisalhante. As curvas são crescentes, com uma pequena diminuição na tensão cisalhante residual, com pouco significado para a interpretação mecânica.



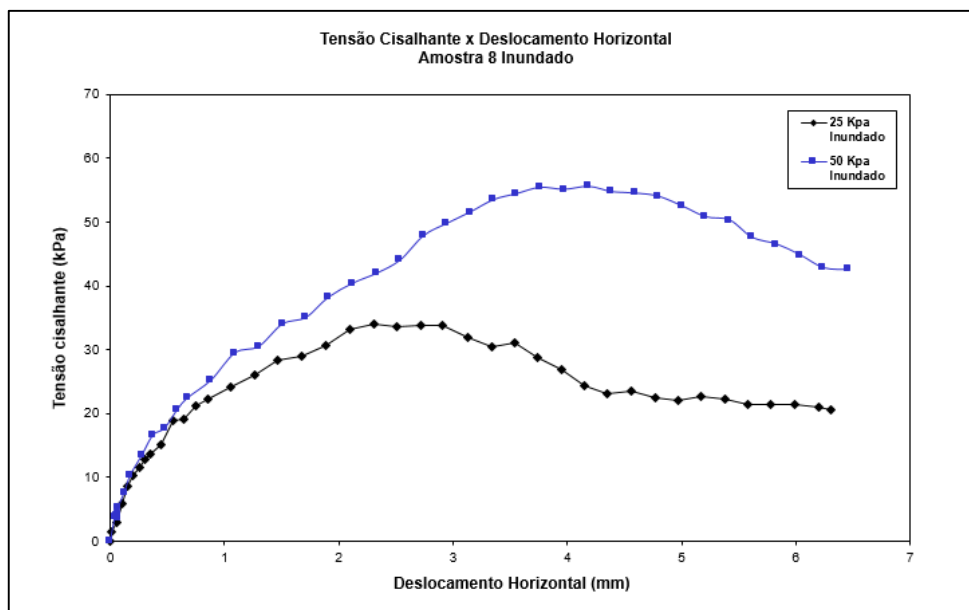


Figura 81: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante da amostra 8 inundada.

A figura que mostra o Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal (fig. 83) demonstra que a amostra com tensão normal de 25 kPa teve uma pequena expansão no início do ensaio, quase irrelevante, a após 0,5 mm, a amostra contrai. A amostra com tensão normal de 50 kPa, teve comportamento contrário, expandido até 0.37 mm. Para baixas tensões normais (25 kPa) a amostra inundada se contrai, e a partir de tensões normais maiores, como 50 kPa, ela expande.

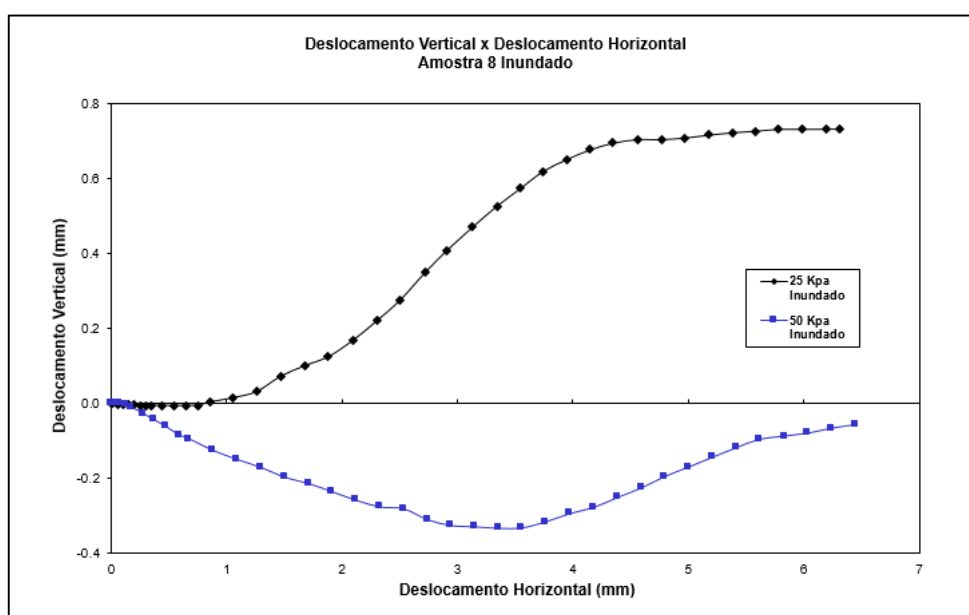


Figura 82: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical da amostra 8 inundada.

A envoltória de ruptura para as amostras inundadas (fig. 84) apresenta parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico com ângulo de atrito de  $40,8^\circ$  e coesão 12,3 kPa. Os resultados mostram que o material perdeu resistência mecânica em relação às amostras de umidade natural, na ordem de  $5^\circ$  para o ângulo de atrito e 12,3 kPa para a coesão inicial. A coesão caiu praticamente pela metade. Para os parâmetros de resistência pós pico, a coesão também cai para 0 (zero), mas o ângulo de atrito praticamente não muda. O ângulo de atrito passa de  $40,8^\circ$  para  $40,7^\circ$ .

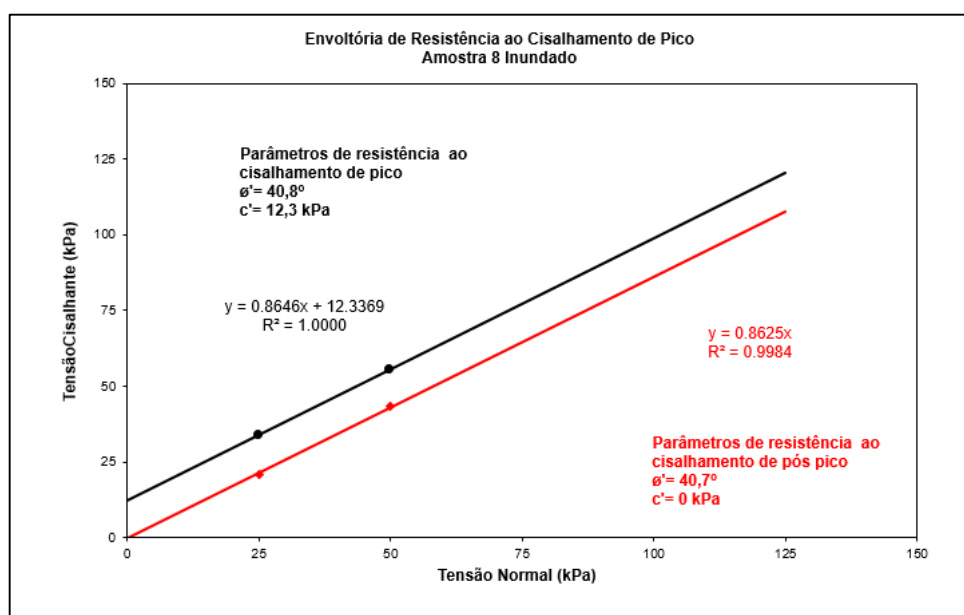


Figura 83: Envoltória ao Cisalhamento de Pico da amostra 8 inundada.

### 5.3.3 Ensaio de CD rompido inundado

O gráfico deformação horizontal *versus* tensão cisalhante (fig. 85) das amostras remoldadas inundadas observar-se que todas as amostras, sob as diferentes tensões normais, não apresentam pico de resistência. A falta de pico nessas amostras deve-se à quebra da estrutura inicial da matriz da amostra. As curvas de  $\sigma \times \varepsilon$  sob tensões normais de 25 kPa e 50 kPa novamente aparecem próximas e simétricas, com pequena resistência. Somente a curva da amostra sob tensão normal de 100 kPa destaca-se no gráfico, chegando a tensões cisalhantes de quase 100 kPa.

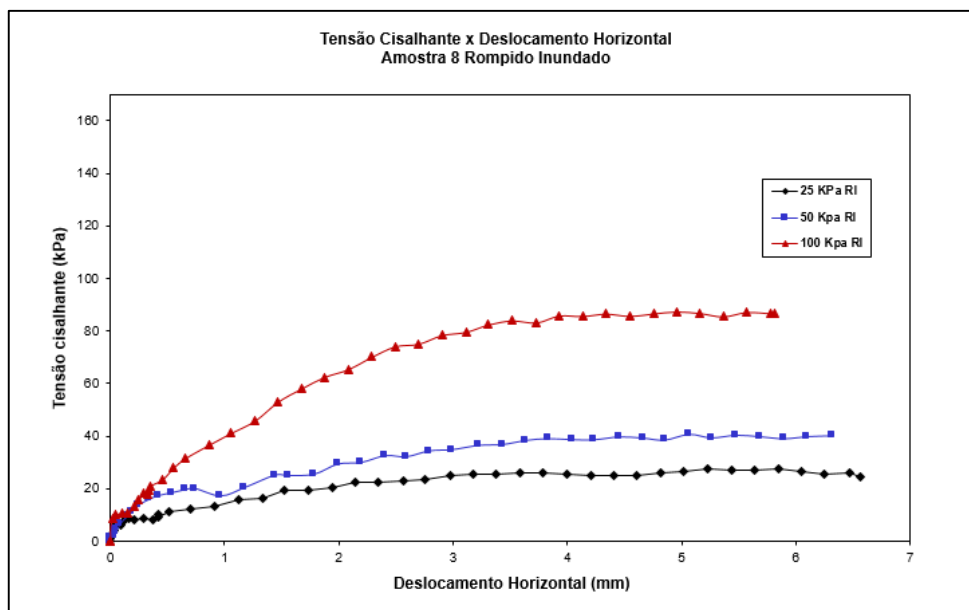


Figura 84: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante da amostra 8 rompida inundada.

O gráfico de Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal das amostras rompidas inundadas (fig. 86) mostra que, sob todas as tensões normais, as amostras apresentam uma forte expansão no início do ensaio. A amostra sob tensão de 100 kPa não mostra retorno à contração. No entanto, a parte de 50 kPa, nota-se uma pequena contração a partir de 4 mm de deslocamento. A amostra sob tensão de 25 kPa, por outro lado mostra forte contração a partir de 2,5 mm de deslocamento horizontal.

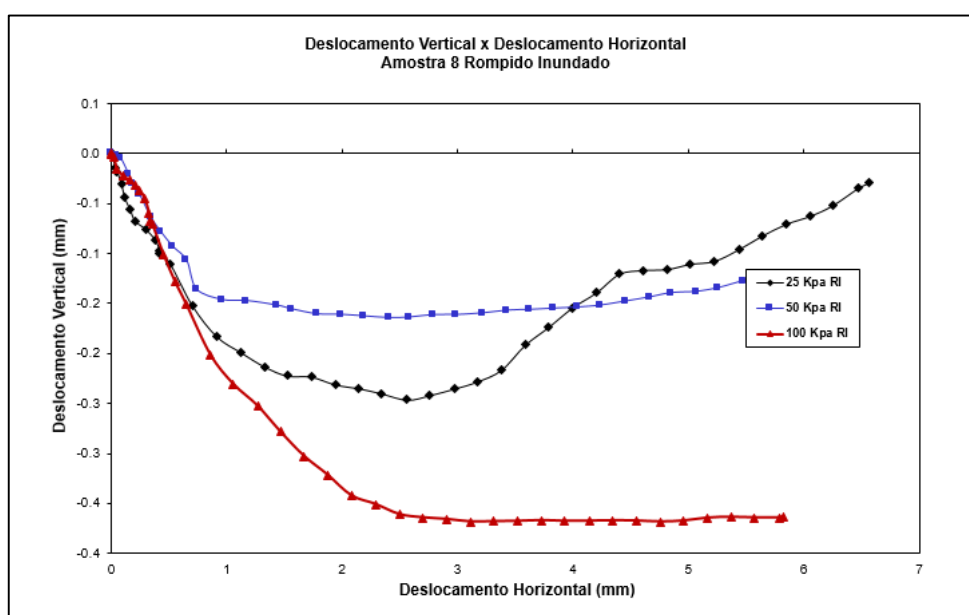


Figura 85: Gráfico de Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical da amostra 8 rompida inundada.

A envoltória de ruptura para as amostras rompidas inundadas (fig. 87) apresentam parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico com ângulo de atrito de  $39,2^\circ$  e coesão 4,3 kPa. Os resultados mostram que o material manteve o ângulo de atrito na casa dos  $40^\circ$ , como as amostras inundadas, com uma pequena diminuição de  $40,8$  para  $39,2^\circ$ . A maior influência do rompimento ocorreu na coesão, que passou de 12,3 kPa para 4,3 kPa, baixando em torno de 6x em relação às amostras de umidade natural e 3x em relação as amostras inundadas indeformadas. Porém, levando em consideração que a coesão pós pico, pós rompimento, das amostras em umidade natural e inundadas indeformadas caiu para 0 kPa, as amostras rompidas inundadas mostram que a pequena resistência da matriz mineralógica pode ser devido à resistência residual da matriz mineralógica e/ou petrográfica.

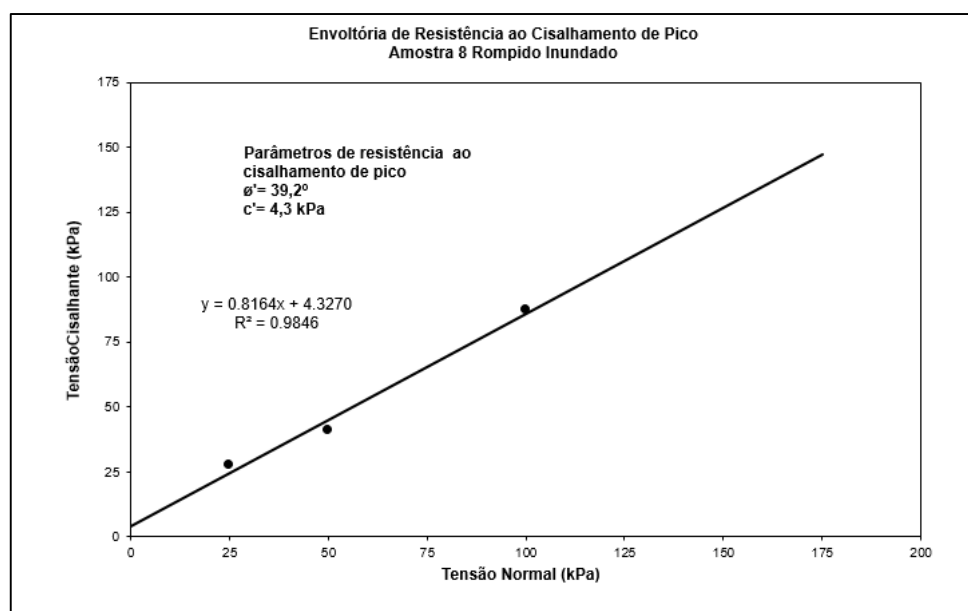


Figura 86: Envoltória ao Cisalhamento de Pico da amostra 8 rompida inundada.

## **6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

A Revisão Bibliográfica foi de extrema importância para o início e a organização do trabalho. Esse estudo permitiu obter o embasamento teórico das necessidades dos taludes a serem estudados, descritos e quantificados. Esta primeira etapa permitiu seguir uma rotina de prospecção eficiente, por mais que não exista um método unânime. Além do mais, mapeamento geotécnico exige conhecimento sobre várias áreas de conhecimento e o conhecimento prévio é essencial para um trabalho completo e conciso.

A partir da revisão bibliográfica e do estudo de metodologias já utilizadas, foi possível montar o cronograma do projeto. Os métodos de investigação foram pensados com o objetivo de trazer as respostas para as causas dos problemas encontrados na área de estudo. Conforme os dados obtidos durante todas as etapas são interpretados, é possível construir um conhecimento sobre as causas dos eventos ocorridos. Assim, os resultados fornecem informações importantes para a interpretação geotécnica, mecânica e pedológica. As informações são discutidas seguindo a lógica dos fatos, onde, em cada etapa, é possível chegar a uma conclusão dos problemas causadores dos eventos. Abaixo seguem as análises e discussões dos resultados obtidos separadas em dois tópicos: i) a descrições dos eventos causadores das instabilidades e ii) a correlação destas com o material de origem.

### **6.1 DESCRIÇÃO DOS EVENTOS CAUSADORES DOS PROBLEMAS DE ESTABILIDADE ENCONTRADOS NOS TALUDES DE CORTE DO TRECHO**

As investigações realizadas para estudo do material permitiram obter dados sobre o intemperismo, a composição mineralógica dos materiais que compõem os taludes, as suas respectivas resistências e as informações sobre as estruturas reliquias presentes em tais. A descrição dos dados seguem a ordem cronológica de investigação.

A difração de raios X permitiu identificar os minerais que formam diferentes sequências de intemperismo do horizontes C friável característico dos taludes com problemas de erosão e escorregamento por erosão do sopé. Foram identificados minerais como Albita, Caulinita, Goethita, Hematita, Ilita, Ilmenita, Magnetita, Microclínio, Muscovita, Ortoclásio e



Quartzo. A variedade de minerais e suas diferentes quantidades em cada cota e variedade lateral dos horizontes, principalmente do C, comprovam o que os autores consultados comentam, sobre a heterogeneidade dos perfis de intemperismo e sua difícil interpretação.

A investigação por MEV foi utilizada nas amostras para confirmar visualmente a caracterização dos minerais e para analisar as feições texturais decorrentes do intemperismo. A fragilidade das amostras tornou difícil a interpretação da matriz mineral, mas foi possível observar os argilominerais constituintes. Entre os minerais presentes, o quartzo e a caulinita apresentaram maior importância, pela quantidade e por suas características mecânicas. O quartzo tende a aumentar o ângulo de atrito do horizonte, e a caulinita, proveniente do intemperismo, prova o que os autores citados anteriormente comentaram sobre os processos químicos, principalmente Bastos (1991). A caulinita está presente em grande parte nas zonas de fraqueza dos taludes, face e horizontes com intemperismo avançado, comprovada pelas amostras 8B, 15A, 15C e 30A.

A literatura e os dados de trabalhos semelhantes mostram que os resultados dos ensaios de CD eram esperados. O material que compõem o horizonte C apresentou alto ângulo de atrito e alta coesão natural. Porém, após a ruptura, ocorre a perda total da coesão, mantendo praticamente o mesmo ângulo de atrito. Isso demonstra que o rompimento do material causa somente a quebra da estrutura reliquiar da rocha de origem, sem causar quebra representativa dos grãos.

As amostras de CD inundado, que tentam reproduzir condições de saturação total do solo/material, mostraram que a água tem forte influência sobre a coesão. A perda da coesão em amostras inundadas é de 49% em relação às amostras de umidade natural. Uma possibilidade é de que a sucção somada a matriz mineral seja responsável pelo ganho de coesão. Estas informações permitem observar que, em eventos de chuvas torrenciais ou perenes, onde ocorre a saturação do solo, a probabilidade de ocorrer escorregamentos aumenta significativamente. Estes eventos não são raros, visto que é possível observar linhas de umidade bem marcadas nos taludes do trecho após eventos de forte pluviometria.

Os ensaios de CD com amostras remoldadas (rompidas) mostraram que pós ruptura, a estrutura inicial da matriz (estrutura da rocha fonte) é quebrada. A diminuição da coesão, causada pelo rompimento da matriz somada à saturação do material, é significativa. Os valores de coesão passaram de 12,3 kPa para 4,3 kPa, baixando em torno de 6x em relação às de umidade natural e 3x em relação as inundadas indeformadas. Estes dados permitem

inferir que, quando já há escorregamentos no talude e ocorrem eventos pluviométricos, a resistência inicial (coesão) é 6x menos que nos taludes intactos. O material/solo pode ser carregado com facilidade para as pistas de rodagem, tanto para a via em construção, como para a via consolidada. Bastos (1991) comenta sobre a cimentação das partículas e estruturas reliquias, concluindo que são de difícil quantificação, mas a influência mecânica é perceptível.

## **6.2 CORRELAÇÃO DE EVENTOS COM MATERIAIS DE ORIGEM**

Descrito por muitos autores, como Bressani (2008), os regimes de chuva tendem a condicionar, em muitos casos, os escorregamentos de regiões inteiras. Associado às chuvas, o clima tem grande importância na mecânica dos solos quando se trata de estabilização de taludes. Conforme comentado nos primeiros capítulos, além das rochas que compõem o embasamento geológico, o clima é o grande responsável pelo intemperismo destas rochas, influenciando diretamente nos processos físicos e químicos envolvidos e definindo o tipo de solo que será formado.

Na área de estudo, o clima subtropical úmido/temperado auxilia na aceleração do processo de intemperismo devido às trocas de temperatura repentinas entre o dia e a noite e entre as estações do ano, concentração de umidade pelo alto regime de chuvas bem distribuídas e com frequentes eventos torrenciais (STE, 2009). Nestas regiões, são característicos processos químicos como hidrólise, hidratação, redução, oxidação, ácidos e intemperismo biológico (BASTOS, 1991), bem como os processos de eluviação e iluviação.

Característico em rochas graníticas em regiões de clima temperado, a alitização resulta na lixiviação de silicatos e de sílica, formando minerais de caulinita. Este processo é facilmente identificado nas paredes das estruturas reliquias presentes nos taludes, ou nos horizontes superficiais com alto grau de alteração. O processo torna a massa mais susceptível à eventos nestes pontos, não sendo somente as características mecânicas como ângulo e atrito e coesão que condicionam os escorregamentos.

Outros processos comuns e importantes dentro dos taludes da faixa de duplicação da BR-116 no trecho de interesse são a iluviação e eluviação. Esta troca de óxidos de ferro e

alumínio entre os horizontes tende a aumentar a coesão do horizonte B e diminuir a resistência mecânica do horizonte C, tornando-o mais friável. A soma entre pluviometria concentrada, estruturas reliquias ricas em caulinita, geometria dos taludes, horizonte C exposto e áreas com intemperismo avançado tendem a ser o principal problema taludes estudados.

A geometria dos taludes é muito importante, não somente pelas características mecânicas dos materiais, mas também pelo fato da inclinação da face influenciar na erodibilidade da massa. Bastos (1991 e 1999) discute esse fator muito importante no seu estudo geotécnico de taludes e encostas. Lembrando que o autor comenta que “a erosão superficial será nula em duas ocasiões extremas, horizontal – onde não há fluxo - e vertical – onde a precipitação do talude é quase nula. Para inclinações maiores do que 30° e 45° (ângulo de erosão máxima em taludes do Estado de São Paulo), a infiltrabilidade do solo supera o fluxo da chuva com rara formação de escoamento superficial, entretanto a capacidade de destacamento das partículas é maior, e o inverso ocorre para baixas inclinações, onde o fluxo superficial aumenta, porém a capacidade de deslocamento das partículas pelo salpicamento e fluxo concentrado é maior.”

Na área de estudo, os taludes com horizonte exposto apresentam em média uma inclinação de 42°. Mas, onde os taludes que apresentam somente o horizonte B exposto possuem alto grau de inclinação (>40°), são/estão estáveis e sem sinais evidentes de problemas geotécnicos (erosão ou rupturas). Os taludes com o horizonte C friável expostos na base, ou em sua totalidade, apresentam problemas geotécnicos a partir de ângulos de inclinação de 30 - 35°. A argilização do horizonte B através dos processos químicos já descritos tornam este horizonte extremamente coeso e com pouca ou nenhuma interferência de estrutura reliquias - inexistentes nestes casos.

Nos taludes formados somente pelo horizonte B, o comportamento é distinto no horizonte C. No horizonte B, a concentração de ferro e alumínio, resultado do intemperismo, aumenta significativamente a coesão do material, e também sofrem pouca influência da saturação do solo - quando não expansíveis. A pequena influência da chuva se deve pela resistência à permeabilidade dos argilominerais, somada a característica de não herdarem as estruturas reliquias da rocha fonte. No horizonte C, é possível visualizar uma matriz mineral menos desenvolvida do que no horizonte B, pouco argilizada, tornando este horizonte mais friável.

Estruturas reliquiárias e amostras de pequena dimensão podem dar resultados ilusórios. Em solos saprolíticos, deve-se considerar a massa de solo por inteiro. É indicado utilizar ensaios mecânicos para análise da massa de solo como uma resistência base, onde não há influência de estruturas. Para uma análise final ou definitiva, os resultados devem ser somados a uma interpretação das estruturas geológicas presentes, estas que muitas vezes condicionam os movimentos. Estruturas reliquiárias de grande porte demonstraram a aceleração do intemperismo, causada pela facilidade de entrada e percolação de água pelos planos de fraqueza. Esta percolação acelera o processo de argilização nas paredes das estruturas, formando planos preenchidos com caulinita na face do talude.

Os principais causadores dos problemas e eventos geotécnicos na área de interesse são a soma dos processos descritos individualmente. Em suma, taludes com o horizonte C exposto altamente evoluído através de iluviação, com ângulos propensos à ação da chuva e fluxo hídrico, sobrepostos por horizontes B e A espessos, e sem a devida drenagem são os fatores que levam aos eventos geológicos/geotécnicos de erosão, piping e ruptura.

O horizonte C exposto permite que a água da chuva aja diretamente na erosão do sopé, na formação de canaletas e piping, evoluindo para bossorocas e acarretando na remoção deste horizonte. As estruturas reliquiárias preenchidas por caulinita se somam à erosão, ocasionando na retirada da base estrutural de todo o corte. Com isso, o horizonte B acaba escorregando, trazendo junto o horizonte A e a vegetação logo acima. A ação da gravidade e a sucessão de eventos pluviométricos faz com que o material das camadas sobrepostas seja carregado.

As observações de campo, o estudo analítico profundo e os ensaios de confirmação, foi permitirem chegar aos fatores causadores dos problemas geomecânicos da área. Com estas análises, é possível entender os eventos e prever os taludes que ainda poderão romper ou escorregar. Também é possível, através destas informações, encontrar a solução de engenharia para cada ponto.

## 7. CONCLUSÕES

A pesquisa bibliográfica permitiu adquirir informações importantes de autores consagrados, como no caso da dissertação e da tese de doutorado do Professor César Bastos (1991 e 1999). As investigações de Bastos apresentam resultados significativos e importantíssimos para o caso em estudo. Por este motivo, o presente trabalho focou no estudo, pesquisa e ensaios que deram resultados satisfatórios para estes. Estas informações tornaram o presente trabalho mais objetivo e linear.

Os pontos abordados no presente trabalho trouxeram as respostas necessárias para o objetivo do estudo: descrever e caracterizar os eventos causadores dos problemas de estabilidade encontrados nos taludes de corte do trecho e verificar sua relação com os materiais de origem. Cada etapa foi muito importante para o desenvolvimento e conclusão dos resultados. As etapas de campo, inicialmente, deixam muitas dúvidas e incertezas, mas são essenciais para, no final, poder compreender a ideia do todo. A difração de raios X, a microscopia eletrônica e os ensaios de cisalhamento direto mostraram ser um conjunto eficiente para qualificação dos taludes. Para a quantificação, seria necessário um número maior de amostras, principalmente tratando-se de ensaios mecânicos como o cisalhamento direto.

As observações de campo, empiricamente, já davam indícios de que o principal problema da área estudada estava na erosão do horizonte C. Porém, não é possível inferir conclusões sem a comprovação quantitativa de aspectos como a composição geológica, evolução pedogenética e comportamento mecânico. Estas etapas pós campo foram pensadas para responderem perguntas e eliminar possíveis causas. Uma possibilidade seria de que o horizonte C tivesse uma resistência pequena, o que não foi definido. Outros fatores possíveis seriam as estruturas reliquias condicionarem os escorregamentos, ou os argilominerais reproduzissem um comportamento plástico. Neste caso, para confirmação da teoria, seria necessário a execução de ensaios de resistência ao cisalhamento das descontinuidades. A difração de raios X, somada a comprovação por visualização em MEV, serviu para descobrir a composição mineralógica da matriz principal e os argilominerais que compõem o material dos taludes. Nos resultados, foi possível identificar que somente nas estruturas reliquias, os argilominerais tem influência mecânica; porém, não condicionam os eventos principais.



Os ensaios de cisalhamento direto são importantes para o conhecimento da resistência mecânica dos materiais, sendo um método simples e ágil de investigação. Um dos objetivos do cisalhamento direto no presente trabalho era comprovar as análises empíricas iniciais, de que a resistência mecânica do material não era a causa das instabilizações. E, também, qual a influência da saturação do material e a resistência pós pico, devido aos pontos já escorregados do trecho.

As análises dos resultados, individualmente, somente respondem questões específicas, mas não são suficientes para definir o problema. Para chegar a uma conclusão das causas, foi necessária uma avaliação conjunta dos resultados e do conhecimento adquirido.

A partir dos resultados de todas as etapas da metodologia, é possível concluir que os problemas causadores dos eventos são a soma destes;

- *horizonte C exposto;*
- *eventos pluviométricos;*
- *falta de sistema de drenagem do sopé;*
- *inclinação do talude;*
- *estruturas reliquiares preenchidas com caulinita;*
- *altura do talude;*
- *permeabilidade das estruturas;*

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização dos problemas geotécnicos dos taludes da BR-116 e a definição dos condicionantes dos rompimentos desses taludes, tendo em vista o evidente problema com as obras destes ao longo do trajeto. A quantidade de ensaios mecânicos e químicos serviu para responder perguntas específicas e chegar na conclusão do topo. O ideal para a quantificação do problema seria executar o programa de ensaios para todos os taludes, alcançando dados sobre cada talude estudado. Além disto, seria interessante o aprofundamento destes ensaios nos horizontes da cada talude e na variedade lateral. Porém, não havia recursos financeiros disponível para tal.

## 8. REFERÊNCIAS

- AZAMBUJA, M. A. E.; 1970. Intemperismo, origem e formação de solos. Porto Alegre. CEUE.
- BASTOS, C. A. B.; 1991. Mapeamento e Caracterização Geomecânica das unidades geotécnicas de solos dos granitos, gnaisses e migmatitos de Porto Alegre. Dissertação PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.
- BASTOS, C. A. B.; 1999. Estudo Geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. Tese PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.
- BRESSANI, L.A.; 2008. Estabilidade de Taludes. PPGEC, UFRGS, v.7.2 de jun, p. 4-60.
- CHEMALE Jr. F.; BABINSKI M. 1995. U-Pb zircon dating of deformational events from the Neoproterozoic rocks in the Eastern Brazil. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, V, Gramado, Boletim de Resumos Expandidos, 377-378
- CHEMALE Jr.; F, HARTMANN LA.. Silva L.C. 1994. Tectonic evolution of Southern Brazil in the Brasiliano Cycle. In: SBG. Congresso Brasileiro de Geologia. 38, Camboriú, Boletim de Resumos Expandidos. 1: 626.
- CNT. Confederação Nacional do Transporte. Acessado em 27/12/2016, disponível em: < [www.cnt.org.br](http://www.cnt.org.br) >.
- CPRM, 2006. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. 1996. Landslide types and process. In Landslides Investigation and Mitigation. Special Report 247, TRB, national Research Council, Washington.
- DEERE, D. U.; PATTON. F.D. 1971. Slope Stability in Residual Soils. In Proc., Fourth Pan American Conference on Soils Mechanics and Foundation engineering, San Juan, Puerto Rico, American Society of Civil Engineers, New York.
- EMBRAPA. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. (SiBCS). 2ª Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006
- FILHO.O. A.; VIRGILI, J. C.; 2013. Capítulo 15 - Estabilidade de Taludes. Geologia de Engenharia, ABGE. São Paulo: Oficina de Textos. 8ª reimpressão p. 243-270.

- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L.; 2009. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. Curitiba: UFPR.
- FORMOSO, M. L.; In: GOMES, C.B. (Coord.); 1984. Técnicas Analíticas Instrumentais aplicadas à Geologia. São Paulo: Edgard Bluche. Difractometria de Raios Xr, pag. 1-43.
- GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. 1976. Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido. IPT, São Paulo, p. 48.
- HSU, K. J. 1995. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. Bulletin of the Geological Society of America, vol. 18, n. 1.
- IBGE – Mapa de Clima do Brasil 2002. Acessado em 20 de setembro de 2017, disponível em: < <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos> >.
- IBGE. 2012. Solos; Acessado em 22 de agosto de 2017, disponível em: < [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/pedologia/vetores/escala\\_250\\_mil/escorte\\_milionesimo/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/escorte_milionesimo/) >.
- INFANTI, N.; FORNASARI, N.; 2013. Processos de dinâmica superficial. Geologia de Engenharia, ABGE. São Paulo. Oficina de Textos. 8ª reimpressão, p. 131-152.
- INFRAESTRUTURA URBANA; Acessado em 14 de agosto de 2016, disponível em: < <http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/10/artigo243465-1.aspx> >
- MICROLAB DGEO UFOP; Acessado em 22 de setembro de 2017, disponível em: < <http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm> >.
- OLIVEIRA, E. P.; 2006. Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granitognaisse de Curitiba, PR. Rio de Janeiro, PUC Rio de Janeiro.
- PASTORE, E. L.; FORTES, R. M. 2013. Caracterização e Classificação de Solos. Geologia de Engenharia, ABGE, 8ªed., p. 197-210.
- PHILIPP R.P., MACHADO R., NARDI L.V.S., LAFON J.M. 2002. Magmatismo granítico neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional.

- PHILIPP R.P., MACHADO R., 2001. Suítes graníticas do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul: petrografia, tectônica e aspectos petrogenéticos. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(3):257-266.
- PHILIPP, R.P.; MACHADO, R. 2005. The Late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 19:461–478.
- PHILIPP, R.P.; MACHADO, R.; CHEMALE Jr., F. 2007. A Geração dos granitoides Neoproterozoicos do Batólito Pelotas: evidências dos isótopos de Sr e Nd e implicações para o crescimento continental da porção sul do Brasil. In: Ianuzzi, R.; Frantz, J.C. (Org.). 50 anos de Geologia. Instituto de Geociências. Contribuições. 1ed. Porto Alegre: Editora Comunicação e Identidade, CIGO. IG-UFRGS, v. 1, p. 59-77.
- PHILIPP, R.P.; MACHADO, R.; NARDI, L.V.S.; LAFON, J.M. 2012; O Magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no Sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. *Revista Brasileira de Geociências*. 32(2):277-290.
- PINTO, C. S. 2006; Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T.H.; 2006. Para Entender a Terra. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 31-34.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T.H.; 2006. Para Entender a Terra. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, p. 31-34.
- RODRIGUES, R.; LOPES, J. A. U.; 2013. Rodovias. Geologia de Engenharia, ABGE. São Paulo. Oficina de Textos. 8ª reimpressão, p. 419-430.
- SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S.; 2013. Solos em pedologia. Geologia de Engenharia, ABGE. São Paulo: Oficina de Textos. 8ª reimpressão, p. 87-99.
- SILVA, A. L. S.; 2013; Caracterização mineralógica por difração de raios X e determinação de terras raras por icp-ms de rochas da região sul da Bahia. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais.
- STE; 2009. Estudo de Impacto Ambiental/ Relatório de Impacto Ambiental da Rodovia BR 116 – RS – Porto Alegre\_Pelotas; Acessado em: 18 de junho de 2016, disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Rodovias/>

- STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S.; 2008. Solos do Rio Grande do Sul. 2ª ed. p. 10-183.
- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M.; TAIOLI, F.; 2009. Decifrando a Terra. 2ª Edição. Companhia Editora Nacional. São Paulo.
- VARNES, D. J. 1978. Slope movement types and process. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. TRB, National Research Council, Washington, D. C., p.11-33.
- WEB MINERAL. Acessado em 18 de junho de 2017, disponível em:< <http://webmineral.com/>>
- WERNICK, E. Rochas Magmáticas; Conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica. São Paulo: UNESP, 2003. p. 364-381.
- WILDNER, V., RAMGRAB, G. E.; 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB : Pedro Osório. SH.22-Y-C. Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:250.000, Brasília, CPRM.
- WILDNER, W.; LOPES, R. C.; 2010. Evolução Geológica do Paleoproterozoico ao Recente. In CPRM-Programa Geologia do Brasil: Levantamento da Geodiversidade. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul. Ministério de Minas e Energia, CPRM – Serviço Geológico Brasileiro. Porto Alegre. cap. 2. pag. 17-30.