

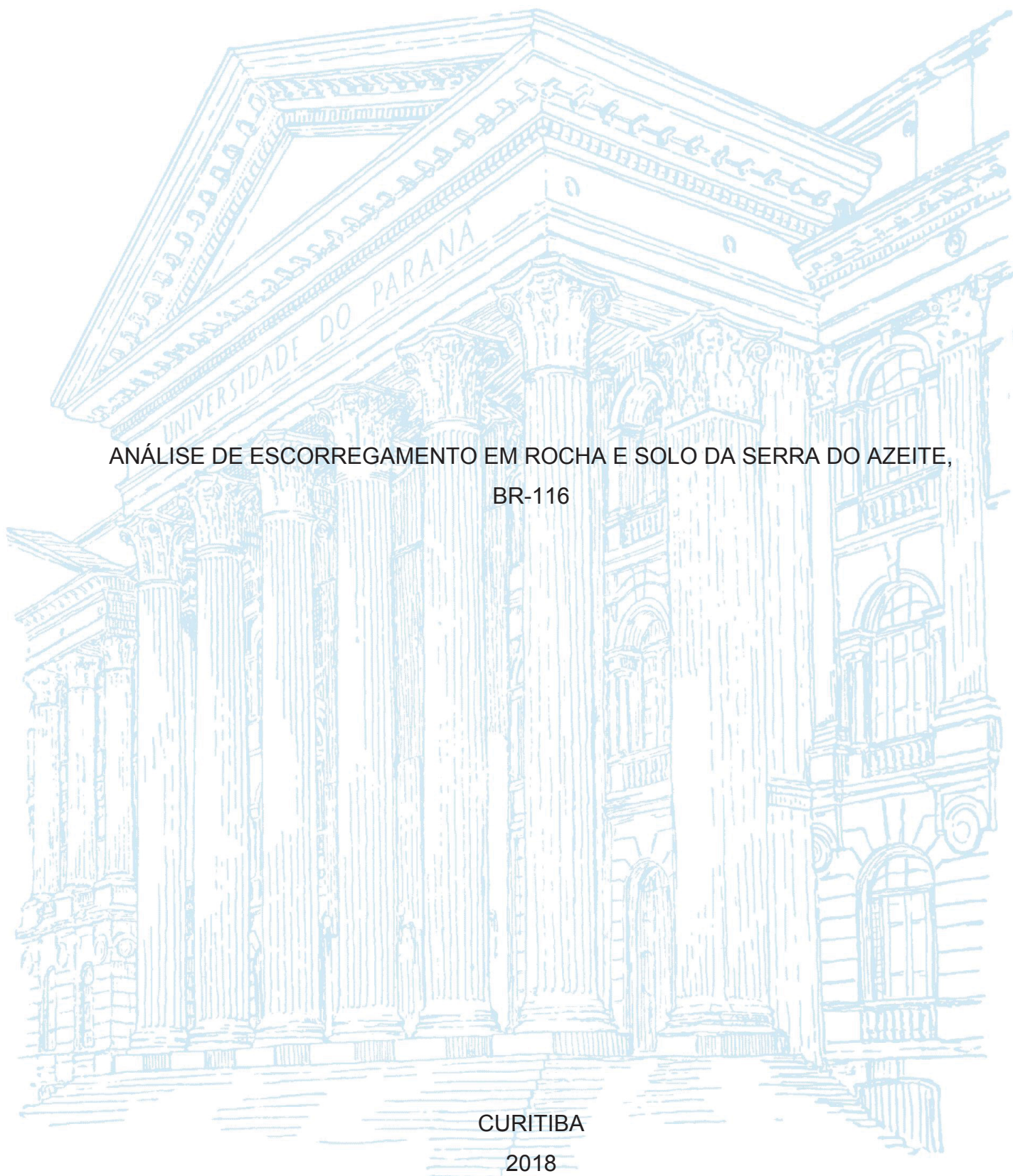
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA BITENCOURT DE BRITTO

ANÁLISE DE ESCORREGAMENTO EM ROCHA E SOLO DA SERRA DO AZEITE,  
BR-116

CURITIBA

2018



CAROLINA BITENCOURT DE BRITTO

ANÁLISE DE ESCORREGAMENTO EM ROCHA E SOLO DA SERRA DO AZEITE,  
BR-116

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia Ambiental no curso de Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Pio Fiori  
Coorientadores: Prof. Dr. Claudinei T. da Silveira  
Prof. Dr. Rodrigo M. da Silveira

CURITIBA

2018



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

---

B862a Britto, Carolina Bitencourt de  
Análise de escorregamento em rocha e solo da Serra do Azeite, BR-116 / Carolina Bitencourt de Britto. – Curitiba, 2018.  
145 p. : il. color.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2018.

Orientador: Alberto Pio Fiori.

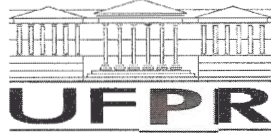
Coorientadores: Claudinei T. da Silveira, Rodrigo M. da Silveira.

1. Estabilidade de taludes rochosos. 2. Escorregamentos. 3. Serra do Azeite. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fiori, Alberto Pio. III. Silveira, Claudinei T. da. IV. Silveira, Rodrigo M. da. V. Título.

CDD: 624.151

---

Bibliotecária: Romilda Santos - CRB-9/1214



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOLOGIA

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAROLINA BITENCOURT DE BRITTO** intitulada: **ANÁLISE DE ESCORREGAMENTO EM ROCHA E SOLO DA SERRA DO AZEITE, BR-116.**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Abril de 2018.

ALBERTO PIO FIORI

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

GERMÁN MARCELO MARTINS VINUEZA FREIRE

Avaliador Externo (UFPR)

LARISSA DE BRUM PASSINI

Avaliador Externo (UFPR)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Alberto Pio Fiori pelo seu apoio e confiança dedicados a mim para o desenvolvimento desta pesquisa e por compartilhar seu conhecimento e experiências.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná pela contribuição a minha formação acadêmica.

A meu marido Wellington pelo companheirismo nesta jornada e por sua compreensão e apoio imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Aos meu pais, Rosa e Pedro, pelo apoio e incentivo de seguir os estudos e a profissão escolhida.

Aos meus irmãos Vinícius e Anderson pelo apoio e incentivo para alcançar meus objetivos.

Aos meus colegas de pesquisa pelas discussões e considerações ao longo dos trabalhos da pesquisa.



## RESUMO

Os escorregamentos são frequentes na Serra do Mar e adjacências quando ocorrem eventos de alta pluviosidade, e na área de estudo situada no município de Cajati/SP, Brasil, há um histórico de eventos de erosão e escorregamentos que afetam diretamente a rodovia BR-116. Logo para identificar os possíveis locais suscetíveis a escorregamentos é necessário determinar as causas desse processo e entender a gênese de sua formação, podendo assim, prevenir futuros eventos de movimentos de massa. Os maciços da Serra do Azeite são constituídos principalmente por litologias do embasamento representadas pelo gnaiss bandado Barra do Azeite, afetado pela zona de falha da Serra do Azeite e, como consequência, apresentando intensa milonitização e fraturamentos. Localmente ocorre a Formação Turvo-Cajati, composta por micaxisto e paragnaisse, além do granito do Alto Turvo. Foram estudados os fatores que influenciam na instabilidade desses taludes rochosos através da aplicação de modelos estruturais na análise probabilística de suscetibilidade a movimentos de massa, por meio da caracterização das estruturas e seu comportamento espacial. Conjuntamente foram feitos ensaios geotécnicos dos solos associados às cicatrizes de escorregamentos na área de estudo. Os cálculos de ângulo de atrito e da coesão foram feitos a partir dos valores de resistência a penetração em função da profundidade, obtidos em sondagens à percussão. Verificou-se que ocorrências de instabilizações ocorrem com maior frequência nos solos areno argilosos a argilo siltosos com coesão 1 a 5 kPa e ângulo de atrito  $26^\circ$  a  $29^\circ$ . A elaboração do modelo digital do terreno e os mapas de declividade e plano de curvatura das vertentes auxiliaram na identificação dos locais propícios a escorregamentos. Assim, observou-se que o principal fator que determina a instabilidade da região é a declividade, sendo esta entre  $20^\circ$  e  $45^\circ$ , havendo uma maior propensão de ocorrência de escorregamentos em encostas divergentes, pois estas retêm maior fluxo de água na vertente, potencializando o processo de movimentação do solo. As condições de estabilidade dos taludes foram determinadas pelo emprego do método do equilíbrio limite, que leva em conta a razão entre as forças resistentes e mobilizantes. Os fatores de segurança que predominam são moderados a altos, porém, quando o grau de saturação do solo atinge 20%, a suscetibilidade a escorregamentos aumenta, podendo apresentar índices de segurança menores que 1,0. Com base na análise de estabilidade de taludes rochosos, os mais suscetíveis a escorregamentos planares estão associados a família de fraturas N10-20E/75NW. Já os escorregamentos em cunha estão associados às intersecções desta mesma família com planos de foliação e com a família N15-30W/75SW. Os taludes sujeitos a escorregamentos planares apresentaram baixos fatores de segurança, mesmo não saturados por água, e moderada a baixa suscetibilidade para escorregamentos em cunha quando drenados, porém há risco de flutuação da cunha na presença de água. A definição das estruturas e dos parâmetros que influenciam no processo de escorregamento na região, dando ênfase para cada litotipo e solo resultante, permitiram um entendimento mais adequado dos mecanismos de movimentação de rochas e solos, auxiliando na avaliação e gerenciamento dos riscos dos taludes rodoviários nas encostas litorâneas.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes Rochosos. Escorregamentos. Serra do Azeite.

## ABSTRACT

Landslides are frequent in the Serra do Mar and adjacent areas whenever high rainfall events occur in the study area located in the city of Cajati/SP, Brazil, there is a history of erosion and landslide events that directly affect the BR-116 highway. Therefore, to identify the possible places susceptible to landslides it is necessary to determine the causes of this process and to understand the genesis of its formation, and thus, to prevent future events of mass movements. The Serra do Azeite massifs are mainly constituted by basement lithologies represented by the banded gneiss Barra do Azeite, affected by the fault zone of Serra do Azeite and, consequently, presenting intense milonitization and fracturing. Locally occurs the Turvo-Cajati Formation, composed of mica schists and gneiss, in addition to the Alto Turvo granite. The factors influencing the instability of these rocky slopes were studied through the application of structural models in the probabilistic analysis of susceptibility to mass movements, through the characterization of the structures and their spatial behavior. In addition, geotechnical tests were carried out on soils associated with landslide scars in the study area. The friction angle and cohesion calculations were made from the penetration resistance values as a function of depth, obtained in cable percussion. It has been observed that occurrences of instabilizations occur more frequently in argillaceous sandy soils to silty clay with cohesion 1 to 5 kPa and angle of friction  $26^{\circ}$  to  $29^{\circ}$ . The preparation of the digital terrain model and the slope maps and curvature plane of the slopes helped to identify the landslide sites. Thus, it was observed that the main factor that determines the instability of the region is the slope, being this one between  $20^{\circ}$ -  $45^{\circ}$  with a greater propensity of occurrence of landslides in divergent slopes, since these retain more water flow in the slope, the process of soil movement. The conditions of slope stability were determined using the equilibrium limit method, which considers the ratio between the resistant and mobilizing forces. The predominant safety factors are moderate to high, but when the degree of soil saturation reaches 20%, the susceptibility to landslides increases, and may have safety indexes below 1,0. Based on stability analysis of rocky slopes, those most susceptible to planar landslides are associated with the N10-20E/75NW set of fractures. The wedge slides are associated to the intersections of this same set with foliation planes and with the N15-30W/75SW set. Slopes subjected to planar landslides presented low safety factor, even when not saturated by water, and moderate to low susceptibility to wedge slip when drained, but there is a risk of wedge flotation in the presence of water. The definition of the structures and parameters that influence the sliding process in the region, giving emphasis to each lithotype and resulting soil, allowed a better understanding of the mechanisms of rock and soil movement, assisting in the evaluation and management of road slope risks in coastal slopes.

Key words: Stability of Slopes. Slips. Serra do Azeite.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. ....   | 26 |
| FIGURA 2 - VISTA DE UM TRECHO DA SERRA DO AZEITE.....  | 27 |
| FIGURA 3 - MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO. ....  | 28 |
| FIGURA 4 - PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL ACUMULADA MENSALMENTE. ....   | 31 |
| FIGURA 5 - MAPA PEDOLÓGICO DA REGIÃO DA SERRA DO AZEITE. ....  | 33 |
| FIGURA 6 - MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) PARA A REGIÃO DA SERRA DO AZEITE... ..  | 36 |
| FIGURA 7 - MAPA DE DECLIVIDADE PARA A REGIÃO DA SERRA DO AZEITE. ....  | 37 |
| FIGURA 8 - PLANO DE CURVATURA PARA A REGIÃO DA SERRA DO AZEITE.....  | 39 |
| FIGURA 9 - AMOSTRA 1 - KM 508+700 PISTA SUL. ....  | 46 |
| FIGURA 10 - AMOSTRA 2 – KM 511+400 PISTA SUL.....  | 46 |
| FIGURA 11 - AMOSTRA 3 - KM 516+500 PISTA SUL. ....   | 47 |
| FIGURA 12 - AMOSTRA 4 - KM 518+500 PISTA NORTE.....  | 47 |
| FIGURA 13 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS SOLOS AMOSTRADOS. ....  | 48 |
| FIGURA 14 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DA REGIÃO DA SERRA DO AZEITE. ....  | 50 |
| FIGURA 15 - LOCALIZAÇÃO DOS TALUDES ROCHOSOS.....  | 52 |
| FIGURA 16 - PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE VERTENTES.....  | 54 |
| FIGURA 17 - ESQUEMA DO USO DO SIG PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA. ....   | 56 |
| FIGURA 18 - TIPOS DE RUPTURAS EM MACIÇOS ROCHOSOS. ....  | 59 |
| FIGURA 19 - FORÇAS ATUANTES EM UM BLOCO DE ROCHA. ....   | 60 |
| FIGURA 20 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA ESCORREGAMENTOS PLANARES, EM CUNHA E TOMBAMENTOS DE BLOCOS. PROJEÇÃO NO HEMISFÉRIO INFERIOR.....                  | 62 |
| FIGURA 21 - (A) PERCENTUAL DE EXTENSÃO DAS SERRAS DENTRO DO TRECHO ESTUDADO, (B) PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA NAS SERRAS PROPORCIONAL À SUA EXTENSÃO.....        | 63 |
| FIGURA 22 - MAPA COM A LOCALIZAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE INSTABILIZAÇÕES.....   | 64 |
| FIGURA 23 - CICATRIZ DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM SOLO NO KM 518+500. A) VISTA DA MARGEM DA RODOVIA NORTE. B) VISTA DO OUTRO LADO DA RODOVIA SUL. .... | 65 |
| FIGURA 24 - CICATRIZ EM MATERIAL COLUVIONAR NO KM 518+100. ....  | 66 |
| FIGURA 25 - IMAGENS DO KM 500+500. ....  | 67 |
| FIGURA 26 - IMAGENS DO KM 505+100 PN.....  | 67 |
| FIGURA 27 - IMAGENS DO KM 508+500 PN.....  | 68 |
| FIGURA 28 - IMAGENS DO KM 516+800 PN.....  | 68 |
| FIGURA 29 - IMAGENS DO KM 518+00 PN.....   | 69 |
| FIGURA 30 - IMAGENS DO KM 518+100 PN.....  | 69 |
| FIGURA 31 - IMAGENS DO KM 518+500 PN.....  | 70 |
| FIGURA 32 - IMAGENS DO KM 519+500 PN.....  | 70 |
| FIGURA 33 - IMAGENS DO KM 499+700 PS. ....   | 71 |



|   |    |
|---|----|
| FIGURA 34 - IMAGENS DO KM 508+700 PS. ....  | 71 |
| FIGURA 35 - IMAGENS DO KM 511+300 PS. ....  | 72 |
| FIGURA 36 - IMAGENS DO KM 513+500 PS. ....  | 72 |
| FIGURA 37 - IMAGENS DO KM 514+500 PS. ....  | 73 |
| FIGURA 38 - IMAGENS DO KM 515+900 PS. ....  | 73 |
| FIGURA 39 - IMAGENS DO KM 517+900 PS. ....  | 74 |
| FIGURA 40 - IMAGENS DO KM 510+800 PS. ....  | 74 |
| FIGURA 41 - IMAGENS DO KM 516 - 516+900 PS. ....  | 75 |
| FIGURA 42 - MAPA DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS. ....   | 77 |
| FIGURA 43 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-1. ....  | 79 |
| FIGURA 44 - TALUDE SA-1. A) BANDAMENTO GNÁISSICO; B) ROCHA MODERADAMENTE ALTERADA COM FOLIAÇÃO MILONÍTICA. ....   | 80 |
| FIGURA 45 - A) ESTEREOGRAMA DOS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-1; B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO), 3 (AMARELO) E 4 (VERDE). ....   | 80 |
| FIGURA 46 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-1. EM MARROM A ATITUDE DO TALUDE E EM VERDE ESCURO A REPRESENTAÇÃO DO CONE DE ATRITO. ....  | 81 |
| FIGURA 47 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-2. ....  | 82 |
| FIGURA 48 - VISTA DO TALUDE CONSTITUÍDO POR MILONITO. ....  | 82 |
| FIGURA 49 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA OS TALUDES COM FACE VOLTADA PARA NORTE (ESQUERDA) E FACE VOLTADA PARA SUL (DIREITA); B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO), 3 (AMARELO), 4 (VERDE) E FOLIAÇÃO (ROSA) DOS TALUDES VOLTADO PARA NORTE (ESQUERDA) E PARA SUL (DIREITA). .... | 83 |
| FIGURA 50 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE COM FACE VOLTADA PARA O NORTE. ....   | 84 |
| FIGURA 51 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE COM FACE VOLTADA PARA O SUL. ....   | 84 |
| FIGURA 52 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-4. ....  | 85 |
| FIGURA 53 - TALUDE DE GNAISSE NO PONTO SA-4. ....   | 85 |
| FIGURA 54 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-4; B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL) E 3 (AMARELO). ....   | 86 |
| FIGURA 55 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-4. ....   | 86 |
| FIGURA 56 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-5. ....  | 87 |
| FIGURA 57 - TALUDES NO PONTO SA-5. A) FACE VOLTADA PARA SW, B) FACE VOLTADA PARA NE. ....   | 88 |
| FIGURA 58 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O TALUDE COM FACE VOLTADA PARA SW (ESQUERDA) E FACE VOLTADA PARA NE (DIREITA); B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO), 5 (VERDE) E FOLIAÇÃO (ROSA) DOS TALUDES VOLTADO PARA SW (ESQUERDA) E PARA NE (DIREITA). ....                        | 89 |
| FIGURA 59 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA SW. ....   | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 60 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA NE. ....  | 90  |
| FIGURA 61 - LOCALIZAÇÃO DOS TALUDES SA-6 E SA-7. ....  | 91  |
| FIGURA 62 - DETALHE DO TALUDE SA-7. ....   | 91  |
| FIGURA 63 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA OS TALUDES SA-6 (ESQUERDA) E SA-7 (DIREITA); B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO) E FOLIAÇÃO (ROSA) DOS TALUDES SA-6 (ESQUERDA) E SA-7 (DIREITA). ....  | 92  |
| FIGURA 64 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-6. ....  | 93  |
| FIGURA 65 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-7. ....  | 93  |
| FIGURA 66 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-8. ....   | 94  |
| FIGURA 67 - GNAISSE BANDADO NO PONTO SA-8. ....  | 94  |
| FIGURA 68 - ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE FOLIAÇÃO PARA O PONTO SA-8. ....   | 95  |
| FIGURA 69 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-8. ....  | 95  |
| FIGURA 70 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-10. ....  | 96  |
| FIGURA 71 - VISTA DO TALUDE SA-10. ....  | 96  |
| FIGURA 72 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-10, B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL) E 5 (VERDE). ....   | 97  |
| FIGURA 73 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-10. ....   | 97  |
| FIGURA 74 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-13. ....  | 98  |
| FIGURA 75 - A) PARAGNAISSE COM DOBRAS INTRAFOLIARES; B) BOUDANS DE QUARTZO E ULTRAMÁFICOS. ....  | 98  |
| FIGURA 76 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-13, B) FAMÍLIA DE FRATURAS 1 (AZUL) E 5 (VERDE). ....  | 99  |
| FIGURA 77 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-13. ....   | 99  |
| FIGURA 78 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-14. ....  | 100 |
| FIGURA 79 - VISTA DO TALUDE COMPOSTO POR GRANITO GNAISSE. ....   | 100 |
| FIGURA 80 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O TALUDE COM A FACE VOLTADA PARA NW (ESQUERDA) E PARA SE (DIREITA). B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 3 (AMARELO) E 6 (LARANJA) DO TALUDE COM FACE VOLTADA PARA NW (ESQUERDA) E PARA SE (DIREITA). .... | 101 |
| FIGURA 81 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA NW. ....  | 102 |
| FIGURA 82 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA SE. ....  | 102 |
| FIGURA 83 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-22. ....  | 103 |
| FIGURA 84 - VISTA DO TALUDE COMPOSTO POR GNAISSE BANDADO. ....   | 103 |
| FIGURA 85 - ESTEREOGRAMAS COM OS PLANOS DE FOLIAÇÃO. A) TALUDE COM A FACE VOLTADA PARA NE; B) TALUDE COM A FACE VOLTADA PARA SW. ....  | 104 |
| FIGURA 86 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DO TALUDE COM FACE VOLTADA PARA NE. ....   | 105 |
| FIGURA 87 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DO TALUDE COM FACE VOLTADA PARA SW. ....   | 105 |
| FIGURA 88 - MICAXISTO. ....  | 106 |
| FIGURA 89 - ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE FOLIAÇÃO PARA O TALUDE TRANSVERSAL A RODOVIA. ....   | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 90 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DO TALUDE TRANSVERSAL A RODOVIA. ....   | 107 |
| FIGURA 91 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-24.....  | 107 |
| FIGURA 92 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-24, B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (ROXO) E 2 (LILÁS).....   | 108 |
| FIGURA 93 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-24.....   | 108 |
| FIGURA 94 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO SECO.....   | 110 |
| FIGURA 95 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA, PARA CENÁRIO SECO. ....  | 111 |
| FIGURA 96 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO 20% DE SATURAÇÃO. ....  | 112 |
| FIGURA 97 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA, COM 20% DE SATURAÇÃO.....  | 113 |
| FIGURA 98 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO 50% DE SATURAÇÃO. ....  | 114 |
| FIGURA 99 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMINIO DA RODOVIA, COM 50% DE SATURAÇÃO.....  | 115 |
| FIGURA 100 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO SATURADO.....  | 116 |
| FIGURA 101 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMINIO DA RODOVIA, PARA O CENÁRIO SATURADO. ....   | 117 |
| FIGURA 102 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. ....  | 125 |
| FIGURA 103 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO.....   | 128 |
| FIGURA 104 - PLANOS DE FOLIAÇÃO.....  | 129 |
| FIGURA 105 - FRATURAS. ....   | 129 |
| FIGURA 106 - FAMÍLIA 1.....   | 130 |
| FIGURA 107 - FAMÍLIA 2.....   | 130 |
| FIGURA 108 - FAMÍLIA3.....  | 130 |
| FIGURA 109 - FAMÍLIA 4.....   | 130 |
| FIGURA 110 - FAMÍLIA 5.....   | 130 |
| FIGURA 111 - FAMÍLIA 6.....   | 130 |
| FIGURA 112 - DIAGRAMAS DE INTERPRETAÇÃO PARA OS TALUDES. A) TALUDE DE DIREÇÃO N10W/80SW, B) TALUDE EW/80N, C) TALUDE EW/80S, D) TALUDE N10W/80SW, E) TALUDE N8W/80SW, F) TALUDE 10E/80SE..... | 132 |



## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 1 - CLASSES DE RELEVO.....  | 22  |
| TABELA 2 - INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DA REGIÃO .....                                   | 30  |
| TABELA 3 - OCORRÊNCIA DAS CLASSES DE RELEVO NA SERRA DO AZEITE.....                                  | 38  |
| TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS PLANOS DE CURVATURA NA REGIÃO.....                                       | 38  |
| TABELA 5 - CLASSES DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.....   | 40  |
| TABELA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO.....   | 45  |
| TABELA 7 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS AMOSTRADOS.....  | 49  |
| TABELA 8 - LITOLOGIAS E LOCALIZAÇÃO EM KM DOS TALUDES.....   | 52  |
| TABELA 9 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA.....                                | 57  |
| TABELA 10 - CLASSES DE FATOR DE SEGURANÇA.....   | 57  |
| TABELA 11 - HISTÓRICO DE INSTABILIZAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO.....                                      | 65  |
| TABELA 12 - OCORRÊNCIAS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS.....                                    | 77  |
| TABELA 13 - OCORRÊNCIAS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA..... | 78  |
| TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SEGURANÇA NAS BACIAS.....                                    | 118 |
| TABELA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA.....            | 119 |
| TABELA 16 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA ESCORREGAMENTOS PLANARES..... | 120 |
| TABELA 17 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA ESCORREGAMENTOS EM CUNHA..... | 121 |
| TABELA 18 - FATORES DE SEGURANÇA DOS TALUDES SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS PLANARES E EM CUNHA.....  | 123 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$  - Coesão

$\gamma_{nat}$  - Peso específico natural do solo

$\gamma_a$  - Peso específico da água

$\gamma$  - Peso específico da rocha

$h_w$  - Altura da zona saturada, perpendicular à vertente

$h$  - Altura da zona não saturada, perpendicular à vertente

$H$  - Altura do talude

$i$  - Inclinação do talude

$\theta$  - Inclinação da superfície de escorregamento

$P$  - Peso do bloco

$A$  - Área da superfície de escorregamento

$\phi$  - Ângulo de atrito interno

$\sigma_a$  - Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores

$\sigma_{ve}$  - Pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal

$F_{ve}$  - Força do vento

$P_a$  - Peso das árvores

$\tau$  - Resistência ao cisalhamento

$\sigma_n$  - Tensão normal

$\sigma_s$  - Tensão cisalhante

$\sigma_v'$  - Tensão vertical efetiva

$\sigma'_n$  - Tensão normal efetiva

$S_u$  - Resistência não-drenada

$U$  - Força neutra da água

$N_{SPT}$  - Número de golpes da sondagem à percussão

$CN$  - Coeficiente de correção

$Z$  - Profundidade

$F_s$  - Fator de segurança

$\cos$  - Cosseno

$tg$  - Tangente

$sen$  - Seno

$cotg$  - Cotangente

$cosec$  - Cossecante

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>15</b> |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA.....  | 16        |
| 1.2      | OBJETIVOS.....  | 16        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                            | <b>18</b> |
| 2.1      | MOVIMENTOS DE MASSA.....                                      | 18        |
| 2.2      | ESTABILIDADE DE TALUDES.....                                  | 23        |
| 2.3      | SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG).....                 | 24        |
| <b>3</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>                 | <b>26</b> |
| 3.1      | GEOLOGIA REGIONAL .....                                       | 28        |
| 3.2      | CLIMA E REGIME PLUVIOMÉTRICO.....                             | 29        |
| 3.3      | VEGETAÇÃO .....   | 31        |
| 3.4      | SOLOS .....   | 32        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                               | <b>34</b> |
| 4.1      | ELABORAÇÃO DE MAPAS.....                                      | 35        |
| 4.1.1    | Análise do relevo .....                                       | 40        |
| 4.2      | DADOS DE CAMPO .....  | 41        |
| 4.3      | SONDAGENS.....  | 41        |
| 4.3.1    | Descrição dos perfis de sondagens.....                        | 43        |
| 4.4      | CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....                                 | 44        |
| 4.4.1    | Coleta de amostras e descrição dos solos in situ .....        | 45        |
| 4.4.2    | Ensaio de laboratório .....                                   | 48        |
| 4.4.3    | Caracterização Geotécnica.....                                | 49        |
| 4.5      | CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS .....                               | 51        |
| 4.6      | ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS .....             | 53        |
| 4.6.1    | Mapas de Fatores de Segurança.....                            | 56        |
| 4.7      | ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS.....              | 58        |
| <b>5</b> | <b>HISTÓRICO DE EVENTOS DE INSTABILIZAÇÃO NA REGIÃO .....</b> | <b>63</b> |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                          | <b>76</b> |
| 6.1      | SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM TALUDES DE SOLO.....     | 76        |
| 6.2      | SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM TALUDES ROCHOSOS.....    | 78        |
| 6.3      | FATOR DE SEGURANÇA PARA TALUDES EM SOLO.....                  | 109       |



|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.4      | FATOR DE SEGURANÇA PARA TALUDES ROCHOSOS .....   | 120        |
| 6.5      | ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇOS DA SERRA DO AZEITE – BR-116 .....            | 124        |
| <b>7</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>135</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>138</b> |
|          | <b>APÊNDICE 1 – MODELO DIGITAL DE TERRENO PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA .....</b>     | <b>142</b> |
|          | <b>APÊNDICE 2 – MAPAS DE DECLIVIDADE PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA .....</b>          | <b>143</b> |
|          | <b>APÊNDICE 3 – PLANO DE CURVATURA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA .....</b>            | <b>144</b> |
|          | <b>APÊNDICE 4 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS DA FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA .....</b> | <b>145</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os escorregamentos são processos naturais de modelamento do relevo, podendo ser desencadeados por diversos fatores, como tipo de rocha ou solo, geomorfologia e variáveis climáticas, além da ação antrópica, como retirada da cobertura vegetal, construções inadequadas em vertentes e uso inadequado do solo (BISPO et al., 2011). Segundo Amaral Junior (2007) a ocorrência de movimentos de massa é função da constância de chuvas críticas e da associação de fatores predisponentes à instabilização (características pedológicas, clima, entre outros).

A análise da estabilidade de encostas é essencial para identificar os movimentos de massa e prevenir desastres ambientais. Para avaliar o grau de estabilidade de uma vertente, vários autores, como Fiori e Carmignani (2015), utilizam métodos determinísticos como o Fator de Segurança. Esse método baseia-se na teoria do equilíbrio-limite, que consiste no equilíbrio de forças resistentes ao movimento e forças indutivas de movimento. Segundo Tonus (2009), a análise de estabilidade de vertentes de modo probabilístico e com o desenvolvimento de mapas de risco contribui para o gerenciamento da estabilidade de áreas serranas, que são regiões que apresentam maiores riscos de escorregamentos.

A influência dos diversos fatores condicionantes dos movimentos de massa é comumente avaliada usando-se técnicas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), nos quais por sobreposição de diferentes dados, levantados em diferentes escalas, é realizado o cruzamento das informações com ferramentas estatísticas, e a análise e tratamento dos dados gerados (VANACOR, 2006).

Segundo Guidicini e Nieble (1984), através da caracterização e espacialização de elementos estruturais em maciços rochosos e determinação das feições relevantes na probabilidade de ocorrência de escorregamentos, obtém-se o modelo estrutural que rege a estabilidade do talude rochoso. A intensidade das descontinuidades e o grau de alteração dos maciços rochosos são fatores que, intensificados pela percolação da água, contribuem para o aumento da predisposição dos taludes aos escorregamentos e tombamentos de blocos (PARIZZI et al., 2009)

A definição dos parâmetros que influenciam no processo de escorregamento na região da Serra do Azeite, município de Cajati/SP - Brasil, dando ênfase para cada litotipo e solo resultante, permitiu um entendimento mais adequado dos mecanismos que agem nas encostas litorâneas brasileiras, a fim de ser aplicado em outros locais,

auxiliando no gerenciamento de segurança e avaliação dos riscos dos taludes rodoviários.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os escorregamentos são frequentes na Serra do Mar e adjacências quando ocorrem eventos de alta pluviosidade. Ao longo da rodovia Régis Bittencourt (BR-116), no município de Cajati/SP - Brasil, há um histórico de eventos de erosão e escorregamentos que afetam diretamente a rodovia BR-116, o que causa, muitas vezes, danos econômicos. Para identificar os possíveis locais suscetíveis a escorregamentos, é necessário determinar as causas desse processo e entender a gênese de sua formação, o que permitirá, assim, prevenir futuros eventos de movimentos de massa.

Com o crescimento urbano desordenado ao longo da rodovia e a consequente incidência de instalações residenciais inadequadas ao longo da mesma, intensificam-se os eventos naturais de movimentos de massas, podendo até causar perdas humanas. Em períodos de chuvas intensas, a região torna-se instável devido à dinâmica morfológica do relevo, principalmente pela declividade das vertentes.

O mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos é imprescindível para essas regiões serranas cortadas por rodovias, que são meios de tráfegos de grande importância no Brasil, através do qual é avaliado as condições de segurança decorrentes desse meio, minimizando a ocorrência de movimentos de massas que podem causar danos materiais e perdas humanas.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é determinar a suscetibilidade a escorregamentos nas vertentes da Serra do Azeite ao longo da rodovia Régis Bittencourt (BR-116), na cidade de Cajati/SP - Brasil, através da determinação dos parâmetros que influenciam na instabilidade das vertentes. Para tanto serão empregados modelos matemáticos para determinar o Fator de Segurança, por meio da metodologia proposta por Fiori e Carmignani (2015), e sua espacialização na região pelo emprego de geoprocessamento (SIG).

Os objetivos específicos são:

- Definir os tipos de escorregamentos que ocorrem na região, realizando o inventário das cicatrizes de escorregamentos identificadas em imagens de satélites e idas a campo.
- Determinar a influência das estruturas em rocha no processo de escorregamento.
- Identificar os tipos de solos nos quais ocorrem escorregamentos, determinando seus parâmetros de resistência e suas propriedades físicas e mecânicas.
- Avaliar quais parâmetros mais influenciam no fator de segurança e sua probabilidade de desencadear os escorregamentos na Serra do Azeite.
- Elaborar mapas temáticos na escala 1:50.000 que serão usados como base de dados para o cálculo do Fator de Segurança, como modelo digital do terreno, declividade, orientação de vertentes, solo, geologia.
- Elaborar o mapa de suscetibilidade a escorregamentos de solos da Serra do Azeite, e determinar as condições de estabilidade dos taludes rochosos presentes nas imediações da BR-116, ao longo do trecho entre os quilômetros 500 e 520.
- Analisar a correlação entre estabilidade dos taludes em diferentes litotipos e a compartimentação estrutural desses maciços.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As vertentes são resultantes da morfodinâmica que atua na paisagem, modeladas pelos processos denudacionais de movimentação de massa e fluviais, sendo uma forma de relevo que deve ser tratada com grande relevância, principalmente para as construções e ocupações do terreno (FERNANDES e AMARAL, 2000).

Os fatores que influenciam no comportamento das vertentes, segundo Guidicini & Nieble (1984), são o tipo de litologia e estruturas associadas, que determinam principalmente a forma do perfil da vertente e a declividade; os processos erosivos, comandados pelo clima (temperatura e precipitação); e o comportamento da vegetação, que proporciona maior escoamento ou infiltração.

A instabilidade dos taludes é consequência da própria dinâmica de evolução das encostas, pois a força da gravidade contribui naturalmente para a deflagração do movimento. Com o avanço dos processos físico-químicos de alteração das rochas, o material resultante torna-se menos resistente e, dependendo da influência da topografia, geram-se condições propícias para deflagrar a ruptura (GERSCOVICH, 2012).

### 2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa são deslocamentos de materiais encosta abaixo devido a força da gravidade. Envolvem uma variedade de materiais, processos formadores e fatores condicionantes, e, portanto, são apresentados vários tipos de classificações, gerando muitas discussões terminológicas e processuais (FERNANDES e AMARAL, 2000). Os principais parâmetros utilizados para a classificação dos movimentos de massas, são o tipo de material mobilizado (solo, rocha ou ambos), a velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o conteúdo de água.

Dentre as várias classificações existentes, destacam-se a de Varnes (1978), que é baseada no constituinte transportado e tipo de movimento, e a proposta por Hutchinson (1988), que se fundamenta em vários critérios, como o tipo de material, a morfologia do material movimentado, mecanismo e estado de poro-pressão na ruptura e velocidade do movimento. Devido à sua complexidade, esta última classificação,

não é muito utilizada em campo por apresentar muitos critérios de difícil determinação, sendo, então, a proposta de Varnes (1978) mais amplamente utilizada, consequência de sua simplificação e praticidade em se determinar no campo.

Outras classificações como a de Sharpe (1938), simplificada em tipo e velocidade do movimento e tipo de material movimentado, que serviu de base para muitas outras; e a de Terzaghi (1953), que apresenta uma abordagem estritamente mecânica aos processos e classificação. No Brasil, foram desenvolvidas também várias classificações, destacando-se a de Freire (1965), que sintetiza o modelo mecânico de Terzaghi (1953) em conjunto com parâmetros físico e causais do movimento; Guidicini e Nieble (1984) que modifica a proposta por Freire (1965) com enfoque na diferenciação entre agentes e causas dos movimentos; e Augusto Filho (1992), que adequou a classificação de Varnes (1978) para a dinâmica de clima tropical do Brasil.

A classificação abordada nesta pesquisa foi a proposta por Guidicini e Nieble (1984), devido à sua adequação com a dinâmica ambiental da região de estudo. Nela são classificados os movimentos de massa em escoamentos (rastejos e corridas), escorregamentos (rotacionais e translacionais), quedas de blocos e detritos, e subsidências (subsidências, recalques e desabamentos). Segundo Guidicini e Nieble (1984), os movimentos de massa são divididos em:

Rastejos: são movimentos lentos e contínuos de uma massa de material, composta por solo, rocha ou ambos, ao longo de uma encosta, na qual não se desenvolve uma superfície de ruptura, e cujos limites são geralmente indefinidos. O movimento é provocado pela ação da gravidade e por efeitos das variações de temperatura e umidade. O processo de expansão e contração do material por variação térmica produz uma movimentação encosta abaixo. É evidenciado por presença de árvores inclinadas ou com troncos recurvados, deslocamento de blocos, postes ou cercas, trincas em muros e paredes, ou por linhas de seixos recobertas por solo movimentado.

Corridas: movimentos rápidos de massa de solo ou solo e rocha, nos quais os materiais se comportam como fluidos altamente viscosos. Envolve grande volume de massa com alto poder de transporte. Ocorre devido à redução de atrito interno em virtude da destruição da estrutura do solo em presença de excesso de água.

Escorregamentos: movimentos rápidos, de curta duração, com plano de ruptura bem definido, envolve solo, rocha ou solo e rocha. Causado pela diminuição

da resistência ao cisalhamento do material devido ao peso da cunha. A forma do plano de ruptura pode ser circular, planar ou em cunha, em função da existência de estruturas ou planos de fraqueza nos materiais envolvidos, que condicionam a formação das superfícies de ruptura.

Escorregamentos rotacionais possuem uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual se dá um movimento rotacional da massa de solo, e possuem uma extensão relativamente limitada. Mobilizam geralmente o manto de alteração, e comumente a superfície de ruptura ocorre ao longo da própria rocha.

Escorregamentos translacionais são movimentos ao longo de uma superfície planar condicionada por feições estruturais do substrato. Geralmente possuem formas compridas e são rasos, onde o plano de ruptura encontra-se, na grande maioria das vezes, em profundidades que variam entre 0,5 e 5 m. Nos solos, a movimentação ocorre ao longo do contato solo-rocha ou entre as camadas de solo. Em rocha, o deslocamento dá-se ao longo de descontinuidades ou planos de fraqueza preexistentes, resultantes da atividade de processos geológicos (acamamentos, fraturas, falhas, juntas de alívio de pressão, xistosidade etc).

Há também os escorregamentos translacionais de solo e rocha desenvolvidos, geralmente, em depósitos de tálus ou colúvios, presentes nos sopés das escarpas, que são constituídos por fragmentos de diversos tamanhos de blocos rochosos em meio a uma matriz de solo, originados a partir do mesmo processo de acumulação.

Quando associados com maior quantidade de água, os escorregamentos translacionais podem passar a corridas, ou podem se converter em rastejo, após a acumulação do material movimentado no pé da encosta.

Os escorregamentos em cunha ocorrem quando há a intersecção de duas ou mais estruturas planares desfavoráveis à estabilidade, o que condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos.

Queda de blocos e detritos: compreendem movimentos rápidos, em queda livre ou rolamento, envolvendo blocos de rocha ou massas de fragmentos terrosos ou rochosos inconsolidados. O processo se desenvolve em encostas íngremes sem superfície de movimentação. A instabilização do bloco se dá pela perda da resistência mecânica de apoio, que pode ser uma superfície rochosa ou elementos como árvores e raízes, causada a partir de erosão ou ação das águas das chuvas, que lavam as



camadas superficiais do solo, liberando os matacões encosta abaixo por processo de desconfinamento ou alívio de tensões.

Subsidências: são o afundamento de camadas, consequência da remoção de alguma fase sólida, líquida ou gasosa do substrato. Esta remoção pode ocorrer por processos naturais ou ser produto de atividade humana, causada por ação erosiva ou bombeamento de águas subterrâneas, exploração de depósitos minerais, ação de vibrações sobre sedimentos inconsolidados.

Recalques: são movimentos verticais de uma estrutura provocadas pela ação do próprio peso, ou ainda pela remoção de confinamento lateral por escavações nas proximidades de estruturas, efeito generalizado do lençol freático ou do bombeamento de água.

Desabamentos: são formas de subsidência bruscas, envolvendo colapso na superfície, provocada pela ruptura ou remoção total do substrato. É associada a trabalhos subterrâneos de mineração e por processo natural de dissolução de rochas calcárias ou dolomíticas.

O principal agente deflagrador do processo de escorregamento é a água da chuva, muitas vezes associado a desmatamentos, erosão, variações de temperatura, oscilações do nível freático. As chuvas contribuem diretamente para a instabilização de encostas, por meio de infiltração e encharcamento do solo, formação de fendas, trincas e juntas, com a geração de superfícies de ruptura; atuação de pressões hidrostáticas; saturação do solo com aumento do peso específico; redução da resistência dos solos pela perda de coesão e escorregamento (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Fatores condicionantes dos escorregamentos:

Tipo de material: vertentes constituídas por rocha ou por solo residual e/ou coluvionar respondem de maneira diferente aos processos intempéricos e agentes deflagradores dos movimentos de massa (IPT, 1991).

Geomorfologia da vertente: a forma (retilínea, côncava ou convexa) influencia no escoamento da água; a orientação da vertente influencia na intensidade à exposição climática; a declividade influencia na configuração superficial dos terrenos, que afetam as formas de modelado. Segundo a Embrapa (2013), são divididas as seguintes classes de relevo:

- Plano: superfície de topografia horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0 a 3%.

- Suave ondulado: superfície de topografia pouco ondulada, constituída por conjunto de colinas ou outeiros (elevações de altitudes relativas até 50 m e de 50 a 100 m), apresentando declives suaves, predominantemente variáveis de 3 a 8%.
- Ondulado: superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas ou outeiros, apresentando declives moderados, predominantemente variáveis de 8 a 20%.
- Forte ondulado: superfície de topografia movimentada, formada por outeiros ou morros (elevações de 50 a 100 m e de 100 a 200 m de altitudes relativas) e raramente colinas, com declives fortes, predominantemente variáveis de 20 a 45%.
- Montanhoso: superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamento relativamente grandes e declives fortes ou muito fortes, predominantemente variáveis de 45 a 75%.
- Escarpado: áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes, tais como: aparados, itaimbés, frentes de cuestras, falésias, vertentes de declives muito fortes, usualmente ultrapassando 75%.

As classes de relevo, propostas pela EMBRAPA (2013), são baseadas na porcentagem de declividade, e, a partir de cálculos estas classes podem ser correlacionadas com o grau de inclinação da vertente (GONZÁLEZ ACEVEDO, 2017), conforme pode ser observado na Tabela 1.

TABELA 1 - CLASSES DE RELEVO.

| Tipo de Relevo | Declividade |               |
|----------------|-------------|---------------|
|                | %           | Graus (°)     |
| plano          | 0 - 3       | < 1,72        |
| suave ondulado | 3 - 8       | 1,72 - 4,57   |
| ondulado       | 8 - 20      | 4,57 - 11,31  |
| forte ondulado | 20 - 45     | 11,31 - 24,23 |
| montanhoso     | 45 - 75     | 24,23 - 36,87 |
| escarpado      | > 75        | > 36,87       |

FONTE: modificado de González Acevedo (2017).

Segundo Fernandes e Amaral (2000), a maior frequência de escorregamentos ocorre nas vertentes com declividade entre 20% e 35%, e não nas mais inclinadas.

A forma das encostas influencia na espessura dos solos, sendo as vertentes divergentes associadas a solos espessos, as convergentes a solos de espessura mediana, enquanto que as encostas retilíneas se associam a menor profundidade do solo (AUGUSTO FILHO, 1992).

Clima: Segundo Guidicini e Nieble (1984), a maioria dos escorregamentos no Brasil estão associados a eventos de alta pluviosidade e de duração curta (poucas horas até alguns dias) que desencadeiam os escorregamentos, porém, nem sempre chuvas intensas são suficientes para desencadear o movimento e gerar os fenômenos de instabilização de encostas.

A correlação entre chuvas e escorregamentos foi elaborada por Guidicini e Nieble (1984), que indicaram que eventos de chuvas de intensidade alta, com índices de pluviosidades superiores a 250-300 mm, são capazes de desencadear movimentos de massas praticamente em qualquer circunstância, e, que para os índices de pluviosidade situados abaixo dessa faixa é possível causar escorregamentos ou não. Há também a correlação com a condição de ocorrer um episódio de chuva intensa que se soma com a chuva acumulada na região, que já é elevada.

Vegetação: a cobertura vegetal atua reduzindo a intensidade da ação dos agentes climáticos no maciço rochoso ou no solo, favorecendo a estabilidade das encostas. Segundo Guidicini e Nieble (1984) a vegetação evita a ocorrência de variações bruscas na umidade e temperatura do solo e retém água da chuva, além das raízes aumentarem a resistência ao cisalhamento dos solos.

Ação antrópica: A ocupação desordenada do solo em áreas naturalmente instáveis aumenta o risco a movimentos de massa (DALMAS, 2013). As interferências antrópicas indutoras dessas instabilizações são a remoção da cobertura vegetal, execução de cortes e aterros inadequados, saturação do solo por meio do lançamento e concentração de águas pluviais, lançamento de lixo nas encostas e taludes, cultivo inadequado do solo etc (IPT, 1991).

## 2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES

Talude é qualquer superfície inclinada que delimita um maciço de rocha, terra ou ambos. As encostas e vertentes são taludes naturais, e os artificiais podem ser os

cortes e os aterros construídos pelo homem. Os taludes são submetidos a forças devidas ao peso dos materiais e ao escoamento da água, que tendem a deslocar a massa de solo ou rocha encosta abaixo, e forças devidas à resistência ao cisalhamento, que impede a movimentação.

Para determinar as condições de estabilidade do talude é comumente utilizado o método do equilíbrio limite, que leva em conta o equilíbrio entre as forças atuantes no material. Esse método considera a ruptura da encosta próxima de um ponto de ruptura, existindo uma condição de equilíbrio do solo no qual não ocorrerá a ruptura. Para verificar a estabilidade do talude em diferentes condições de equilíbrio-limite, é dado um Fator de Segurança ( $F_s$ ), definido como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e a resultante das forças favoráveis ao movimento.

Uma vertente em condição de equilíbrio, deve ter  $i = \phi$ , para coesão igual a zero e, nessa condição, o Fator de Segurança ( $F_s$ ) é igual à unidade. Valores de  $F_s$  menores que a unidade ( $i > \phi$ ) são favoráveis ao movimento, pois indicam que as forças solicitantes são maiores que as resistentes. Valores de  $F_s$  maiores que a unidade ( $i < \phi$ ), indicam que as forças resistentes ao cisalhamento são maiores que as solicitantes. O Fator de Segurança é dado por (FIORI e CARMIGNANI, 2015):

$$F_s = \frac{P \cos i \operatorname{tg} \phi}{P \operatorname{sen} i} = \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} i} \quad (1)$$

Há várias formas de cálculo para analisar a estabilidade de taludes, dentre as simplificadas que consideram somente o ângulo de atrito interno e a inclinação das vertentes, a cálculos complexos que envolvem muitos fatores como a presença de água, propriedades físicas e parâmetros de resistência do solo, influência da vegetação, etc (KOZCIAK, 2005).

### 2.3 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

A utilização de Sistema de Informações Geográficas (SIG) permite o cruzamento dos dados e uma análise rápida e dinâmica das informações, a partir dos quais é feita a avaliação dos condicionantes atuantes na deflagração dos movimentos

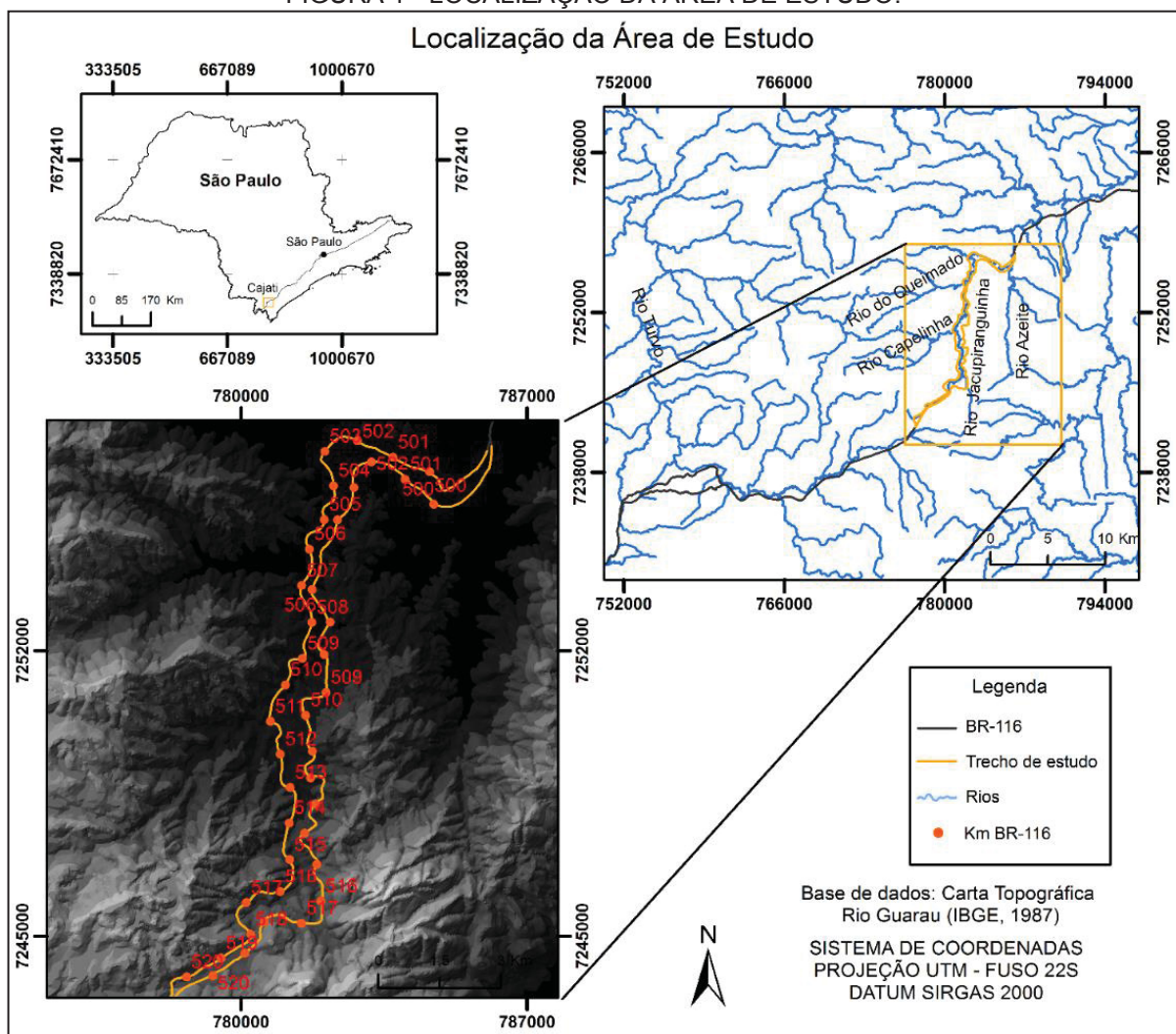
de massa, propiciando o desenvolvimento de um método de análise da suscetibilidade a movimentos de massa (VANACOR, 2006).

A técnica de SIG é amplamente utilizada na interpolação dos mapas temáticos e na elaboração dos mapas de Fator de Segurança, como exemplo o trabalho de Tabalipa (2008). Esse autor, a partir de modelos matemáticos e fatores condicionantes dos movimentos de massa nas vertentes, elaborou mapas de fator de segurança para as encostas da Bacia do Rio Ligeiro em Pato Branco (PR). Vários outros autores utilizam as técnicas de SIG para espacialização das equações de Fator de Segurança, como Fiori (1995a), Fiori (1995b), Nunes (2002), Fiori e Nunes (2003), Amaral (2003), Borchardt (2005) e Teixeira (2012).

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo situa-se ao sul do estado de São Paulo, no município de Cajati, em um trecho da Rodovia Régis Bittencourt (BR-116) que liga as cidades de Curitiba (PR) e São Paulo (SP). O trecho da rodovia escolhido para a pesquisa fica entre os quilômetros 500-520 e suas adjacências (Figura 1), a qual compreende um trecho da Serra do Azeite que apresenta um relevante histórico de eventos de escorregamentos e erosão.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: a autora (2018).

A Serra do Azeite pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape, que compreende o rio de mesmo nome e seus afluentes principais como Açungui, Capivari, Turvo e Jacupiranga (CBH-RB,2011). Na área de estudo, encontra-se o rio



Jacupiranguinha que segue quase paralelo à rodovia BR-116 no trecho da Serra do Azeite. Seus principais afluentes são os rios Capelinha, Queimado e Azeite. O rio Jacupiranguinha junta-se com o rio Guaraú à jusante da cidade de Cajati, e formam o Rio Jacupiranga, um dos principais afluentes do Rio Ribeira de Iguape.

Na área de estudo ocorre o relevo do tipo Serras Alongadas, caracterizado por relevo montanhoso com predomínio de declividades médias a altas (acima de 15%) e amplitudes locais acima de 300 metros (IPT,1981). Apresenta topos angulosos, vertentes ravinadas com perfis retilíneos, por vezes abruptos, com drenagem de alta densidade e vales fechados, características estas observadas na Serra do Azeite (Figura 2).

FIGURA 2 - VISTA DE UM TRECHO DA SERRA DO AZEITE.



FONTE: Google Earth (2018).

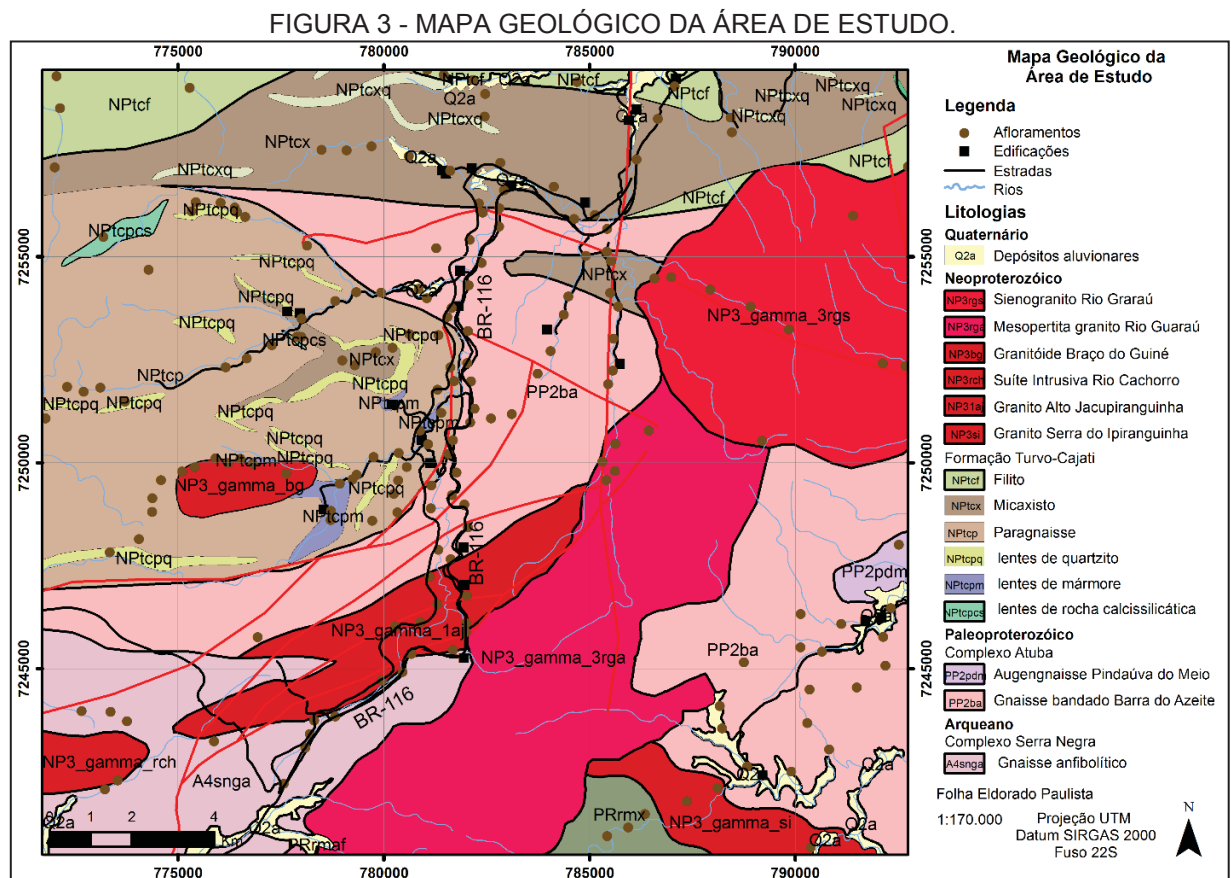
A gênese de formação deste relevo está associada ao Cinturão Orogênico do Atlântico, gerado a partir de vários ciclos tectônicos de colisões de placas e soerguimento de cadeias montanhosas, como a Serra do Mar (IPT,1981). Sua morfologia é condicionada pela zona de cisalhamento Serra do Azeite (CPRM,2013) que, por meio de falhas e dobramentos, esculpiu o relevo; pela variação da resistência litológica, na qual o relevo da região é modelado em rochas metamórficas de alto grau (migmatitos, gnaisses e xistos) associados com intrusões ígneas; e pelo clima da região.



### 3.1 GEOLOGIA REGIONAL

Quanto à geologia, a área de estudo está inserida na porção meridional do Cinturão Ribeira (Província Mantiqueira), no domínio tectônico do terreno Curitiba, composto por rochas do embasamento representadas pelo Gnaiss Bandado Barra do Azeite e por seqüências supracrustais da formação Turvo-Cajati (CPRM, 2013).

O Gnaiss Bandado Barra do Azeite é de idade 2.200-2.100 Ma, composto por ortognaiss bandado, migmatizado em condições de fácies anfibolito alto e milonitizado em condições de fácies xisto-verde; e a Formação Turvo-Cajati é constituída por rochas metassedimentares siliciclásticas e carbonáticas metamorfizadas em condições de fácies xisto-verde a granulito, com idade máxima de sedimentação 850-900 Ma (CPRM, 2013). Na Figura 3 observa-se o mapa geológico da região.



FONTE: modificado de CPRM (2013).

O Gnaiss Bandado Barra do Azeite é composto por gnaiss migmatítico e milonítico, cinza escuro a esverdeado, constituído por biotita e hornblenda, de

granulação fina a média (CPRM, 2013). Segundo os autores, a rocha apresenta bandamento gnáissico bem desenvolvido, definido pela intercalação de níveis quartzo-feldspáticos centimétricos a decimétricos, e níveis descontínuos de biotita e hornblenda milimétricos a centimétricos. Também são descritas dobras isoclinais no bandamento gnáissico e foliação contínua com lineações de estiramento mineral nos seus planos. Os autores também citam que o gnaisse apresenta foliação milonítica bem desenvolvida, e que localmente é cortado por uma clivagem de crenulação e por planos de fratura.

A Formação Turvo-Cajati é representada na área de estudo por micaxistos e paragnaisses, e secundariamente ocorrem intercalações de quartzito, mármore e rochas calciossilicáticas (FALEIROS, 2008). Segundo o autor, na porção norte da região da Serra do Azeite, predominam micaxistos cinza escuro a prateado, de granulação média a grossa, composto por biotita e muscovita, com pouca granada milimétrica e localmente estauroлита e sillimanita. E na região centro-oeste da Serra do Azeite, o autor destaca a predominância de xistos grossos prateados e paragnaisses porfiroblásticos, constituídos por biotita, quartzo, feldspato e comumente granada milimétrica a centimétrica. O autor destaca a presença de foliação milonítica nessas litologias e, localmente, uma clivagem de crenulação levemente oblíqua cortando a foliação.

Ocorrem, também, na área intercalações de biotita-quartzito branco, com granulação média, além de corpos lenticulares concordantes de mármore dolomítico, de granulometria grossa e com acamamento de espessura centimétrica a decimétrica (FALEIROS, 2008 e CPRM, 2013).

Na área, é encontrado também o Granito Alto Jacupiranguinha que apresenta foliação milonítica e lineação bem desenvolvidas, com variações deformacionais de protomilonito a ultramilonito (CPRM, 2013). O granito tem textura que varia de equigranular a porfirítico, de granulação fina a grossa, composto de quartzo, feldspato e biotita na matriz e cristais centimétricos de feldspato róseo.

### 3.2 CLIMA E REGIME PLUVIOMÉTRICO

O clima da região foi definido de acordo com a classificação climática de Köppen, que considera os dados anuais/mensais pluviométricos e termométricos e a sazonalidade. De acordo com o CEPAGRI (2016), o tipo de clima encontrado na

cidade de Cajati é *Am*, caracterizado pelo clima tropical chuvoso, com inverno seco onde o mês menos chuvoso tem precipitação inferior a 60 mm. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C.

As temperaturas médias diárias de Cajati variam de 19,8°C a 27,8°C, e a precipitação pluviométrica média é de 1536 mm por ano, com período chuvoso de setembro a abril, sendo janeiro o mês de maior pluviosidade (CEPAGRI, 2016). No período entre os meses de maio e agosto, a precipitação média é 71 mm (considerado período seco), e agosto é o mês de menor pluviosidade (CEPAGRI, 2016).

O entendimento do regime pluviométrico da região é essencial para compreender a influência da dinâmica pluvial na deflagração de movimentos de massa, e o histórico de chuvas deve ser considerado nas avaliações dos condicionantes de fluxo e mecanismos de infiltração. Com base em informações de sete estações pluviométricas da região (Tabela 2), obtidas na Agência Nacional de Águas, e no estudo estatístico realizado em 2015, a Autopista Régis Bittencourt (APRB) identificou os eventos de máxima pluviosidade.

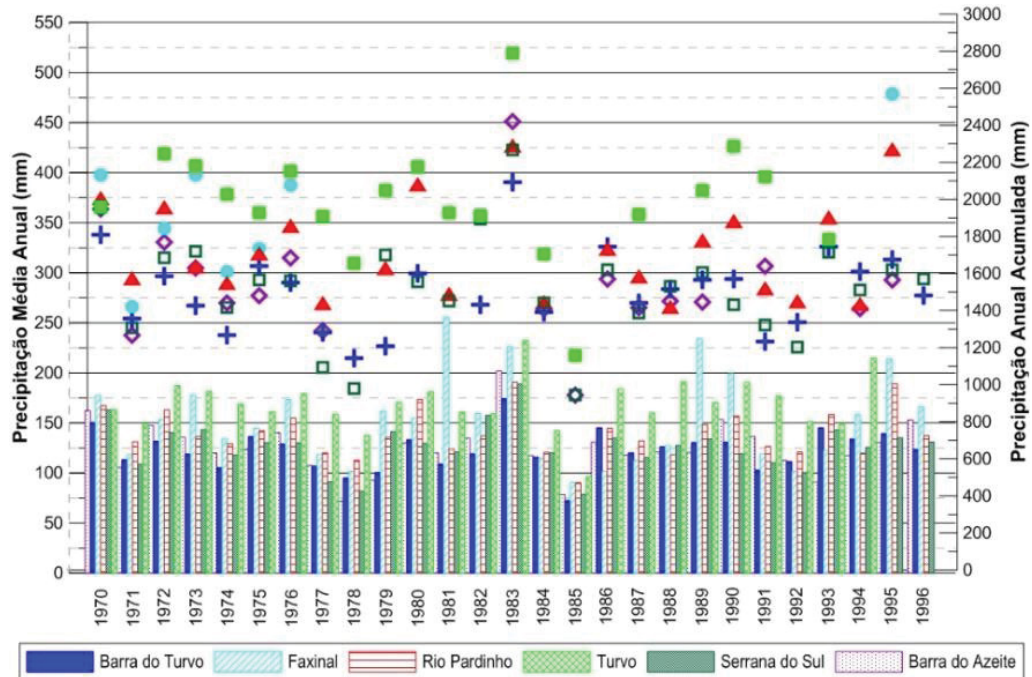
TABELA 2 - INFORMAÇÕES DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DA REGIÃO

| NOME                   | MUNICÍPIO      | RESPONSÁVEL | CÓDIGO  | LATITUDE | LONGITUDE | ALTITUDE (M) | DADOS DESDE | DADOS ATÉ |
|------------------------|----------------|-------------|---------|----------|-----------|--------------|-------------|-----------|
| BARRA DO AZEITE        | CAJATI         | DAEE        | F5-014  | 24°47'   | 48°10'    | 80           | 09/60       | 08/99     |
| BARRA DO TURVO         | BARRA DO TURVO | DAEE        | 2448026 | 24°45'   | 48°30'    | 160          | 08/69       | 02/14     |
| BARRA DO TURVO (INMET) | BARRA DO TURVO | INMET       | A746    | 24°57'   | 48°25'    | 667          | 07/08       | 12/15     |
| FAXINAL                | BARRA DO TURVO | DAEE        | 2448029 | 24°53'   | 45°18'    | 840          | 09/69       | 06/97     |
| RIO PARDINHO           | BARRA DO TURVO | DAEE        | 2548069 | 25°04'   | 48°34'    | 600          | 06/64       | 03/15     |
| SERRANA DO SUL         | CAJATI         | DAEE        | F5-028  | 24°43'   | 48°07'    | 50           | 06/50       | 04/15     |
| TURVO                  | BARRA DO TURVO | DAEE        | 2448030 | 24°58'   | 48°20'    | 660          | 07/60       | 12/96     |

FONTE: APRB (2015).

Por meio de gráficos comparativos dos volumes acumulados mensais em cada estação pluviométricas ao longo de cada ano de monitoramento, entre os anos de 1970 e 1996 (período no qual há registro de dados em seis estações), a APRB (2015) verificou que o mês de janeiro representa o período com os maiores volumes de chuva medidos em todos os equipamentos, e que o ano de 1983 foi o que registrou maior volume acumulado de chuva, chegando a 2.790 mm (Figura 4).

FIGURA 4 - PRECIPITAÇÃO ANUAL ACUMULADA E PRECIPITAÇÃO MÉDIA ANUAL ACUMULADA MENSALMENTE.



FONTE: APRB (2015).

A empresa Autopista Régis Bittencourt também identificou que, entre os anos de 1970 a 1996, os períodos mais chuvosos se concentraram entre os meses de dezembro a março (verão) e os períodos com menores precipitações registradas corresponderam aos meses de junho a setembro.

Segundo a APRB (2015), os dados históricos provenientes dessas estações pluviométricas mostram que há uma grande variação entre os valores de precipitações mensais máximas ao longo dos anos, e que os períodos mais chuvosos para cada uma das estações foram registrados em períodos distintos (1981, 1995, 2003 e 2010), refletindo possivelmente as diferentes altitudes em que esses equipamentos estão instalados. Os autores também afirmam que a ocorrência de registros atípicos em todas as estações, com volumes superiores à média mensal histórica, pode estar associada a períodos com registros de movimentações de terra.

### 3.3 VEGETAÇÃO

Na área de estudo encontra-se a Floresta Ombrófila Densa Montana, vegetação característica de clima tropical chuvoso, que ocorre nas encostas em porções elevadas entre cotas 500-1500 m, com árvores diversificadas de até 20 m de

altura, e nas áreas mais baixas encontram-se arbustos de até 3 metros de altura, além de epífitas e lianas (INSTITUTO FLORESTAL, 2005). Ocorre também vegetação secundária, ou remanescente, desta floresta densa, chamada de capoeira, que se sucede à derrubada das florestas, apresentando porte desde arbustivo até arbóreo, porém, com árvores finas de porte menor e menos diversificada que a floresta original.

### 3.4 SOLOS

Os solos foram classificados segundo a Embrapa (2013), que se baseia nas propriedades dos solos resultantes diretamente dos processos que atuaram na sua formação, através de características identificadas no campo e separação de horizontes diagnósticos, que são definidos com base em propriedades físicas, químicas e mineralógicas e em propriedades que refletem as condições ambientais. Com base no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo de Rossi (2017), os solos que ocorrem na área de estudo são:

**Argissolos:** presença de horizonte B textural diagnóstico, com acúmulo de argila em profundidade. São solos vermelho-amarelo distrófico típico ou latossólico, que apresentam textura média a argilosa, com horizonte A moderado ou proeminente. São solos profundos a muito profundos desenvolvidos em relevo ondulado a forte ondulado.

**Cambissolos:** solos típicos com horizonte B incipiente e pedogênese pouco avançada. Pode apresentar porções com baixa saturação por bases ( $V < 50$ ) no horizonte B (cambissolo distrófico) e outras com caráter alumínico ( $\geq 50\%$ ) (cambissolo álico). Possuem textura argilosa e média, com A moderado e proeminente. Ocorrem de forma descontínua em relevo forte ondulado, sendo pouco profundos a profundos.

**Latossolos:** são solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos e profundos, com horizonte B latossólico. Apresentam coloração amarela e caráter alumínico no horizonte B (latossolo álico), com A moderado e textura argilosa. Ocorrem em superfícies suave onduladas.

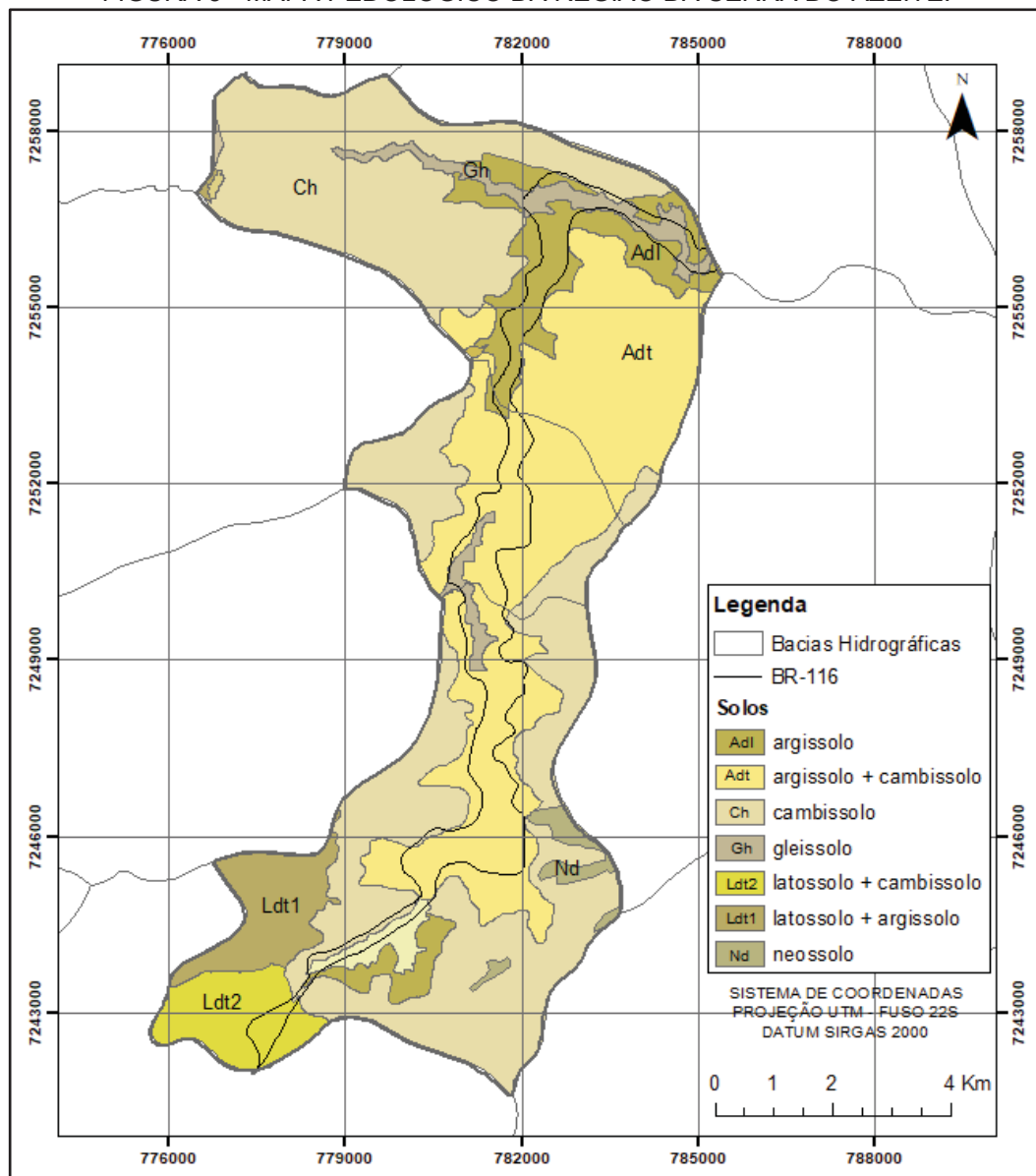
**Neossolo:** são solos rasos ou muito rasos, pouco desenvolvidos e com horizonte A diretamente sobre substrato rochoso, contudo, podem exibir horizonte B incipiente muito pouco espesso, acima do material rochoso pouco intemperizado, sobreposto ao substrato rochoso. Em geral são solos muito pobres e ácidos.

Normalmente estão confinados a paisagens mais íngremes, associados a afloramentos naturais de rochas das encostas das serras.

Gleissolos: apresentam água estagnada e são influenciados pelo lençol freático e regime de umidade. São solos pouco profundos que ocorrem em relevo plano, nas regiões próximas dos rios.

Na área de estudo esses solos ocorrem associados, conforme o mapa pedológico da Figura 5, estando a rodovia BR-116 delineada em sua maior parte sob a associação de argissolo e cambissolo.

FIGURA 5 - MAPA PEDOLÓGICO DA REGIÃO DA SERRA DO AZEITE.



FONTE: adaptado de Rossi (2017).



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente realizou-se a revisão bibliográfica e compilação dos dados já existentes da área de estudo para o banco de dados, como dados cartográficos, topográficos e imagens de satélites. As cartas topográficas utilizadas são as Rio Guarau e Rio Turvo na escala 1:50.000, do ano de 1987, elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com equidistância de 20 m entre as curvas de nível, no sistema de coordenadas *Universal Transversa de Mercator* (UTM), fuso 22 sul e *datum* horizontal SAD-69. Para as descrições das unidades geológicas foi utilizada a folha Eldorado Paulista (SG.22-X-B-VI), elaborada pela CPRM em 2013, na escala 1:100.000.

Para detalhamento da área sob concessão da rodovia, foi utilizada a base 1:1.000, que abrange uma faixa de domínio de 200 metros de cada lado da rodovia, elaborada a partir de uma restituição fotogramétrica realizada pela concessionária Autopista Régis Bittencourt em 2010.

O trabalho também envolveu as informações do modelo digital de elevação extraído do banco de dados geomorfométricos do Brasil (TOPODATA), realizado pela Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A base de dados foi obtida através do mapa índice da folha cartográfica de nome 24S495ZN que continha o MDE da região. Esses dados altimétricos foram elaborados a partir do processamento das imagens SRTM com data de 2008, e aprimorada para refinamento no tamanho do pixel de 90 metros para a criação de grades com espaçamento de 30 metros, interpolado pelo método de Krigagem (Valeriano e Rossetti, 2009).

A partir desta folha cartográfica foi realizado o processamento da imagem e o modelo digital de terreno. Para isso, foi realizado o realce destas para formato de 16 bits para melhor visualização do raster e facilitar o trabalho de interpretação. Em seguida foi reprojetoado o modelo do sistema de coordenadas geográfico WGS84 para o sistema de projeção UTM SIRGAS 2000, Zona 22S, e definida a área de interesse no raster.

As sondagens referentes a projetos já realizados na área de estudo pela concessionária Autopista Régis Bittencourt (APRB), foram compilados ao banco de dados e utilizados na caracterização dos solos, assim como, na análise do Fator de Segurança (parâmetros de resistência e propriedades físicas). Realizaram-se ao



longo da rodovia BR-116 33 sondagens, sendo 18 delas à percussão e as outras 15 sondagens rotativas mistas.

O levantamento de dados pluviométricos realizou-se com base nas informações de sete estações pluviométricas da região, obtidas na Agência Nacional de Águas, e no estudo estatístico de eventos de máxima pluviosidade, feito em 2015 pela Autopista Régis Bittencourt (APRB).

#### 4.1 ELABORAÇÃO DE MAPAS

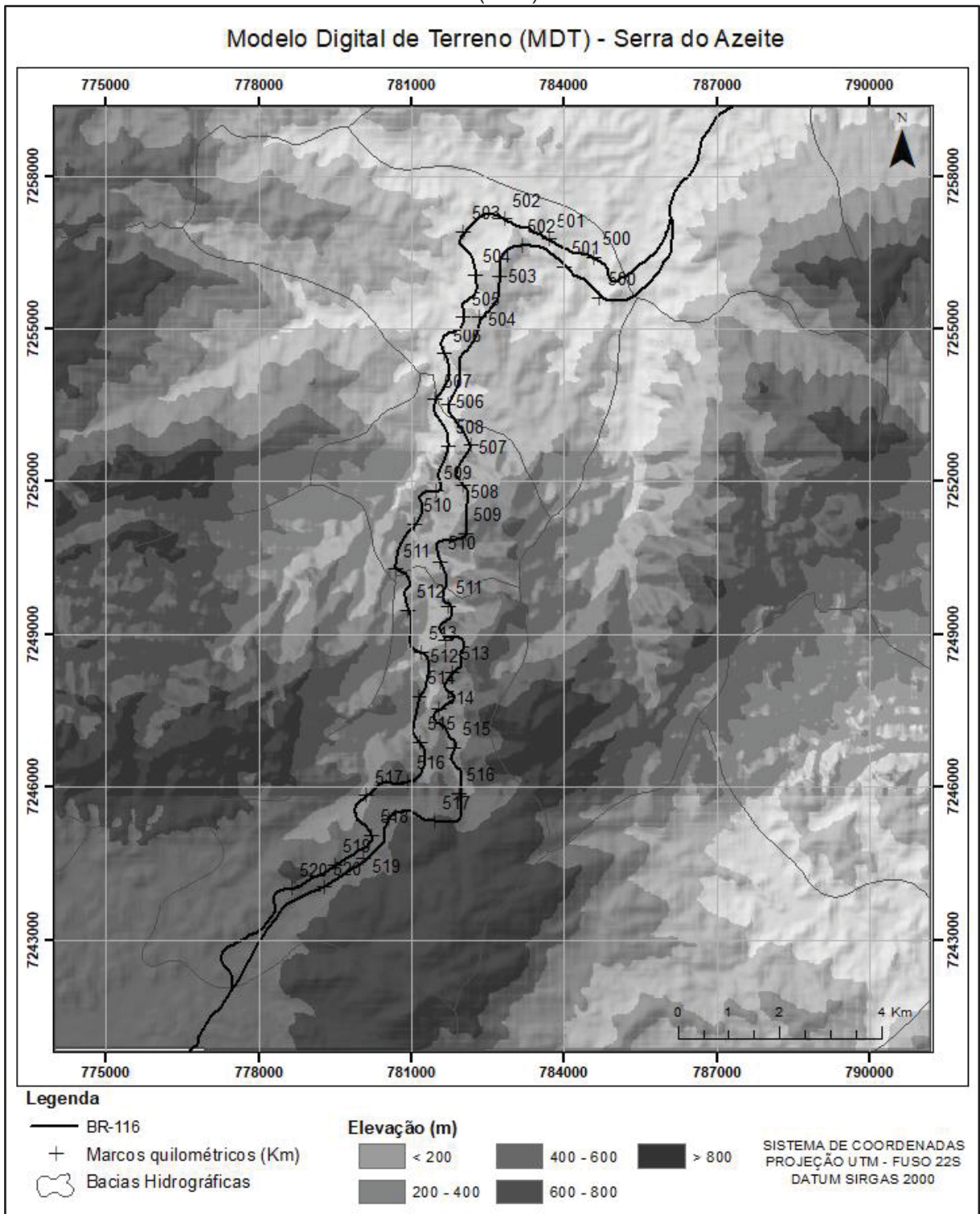
Através da técnica de sistema de informações geográficas (SIG), foram elaborados mapas temáticos para caracterização inicial da área, como modelo digital de elevação (MDE), declividade e curvatura das vertentes.

O Modelo Digital de Terreno (MDT), obtido a partir do banco de dados TOPODATA, foi processado através da ferramenta “*Topo to Raster*” do *software Arcgis 10.2* (ESRI, 2012). Este programa baseia-se na interpolação dos valores de elevação em matriz, com coordenadas planimétricas definidas, adotando um valor de pixel correspondente a cada ponto da matriz. Foi adotada para este modelo a resolução do pixel de 30 metros baseado na equidistância das curvas de nível. Foi também desenvolvido um MDT com resolução de 1 metro para a faixa de domínio da rodovia, elaborado a partir da restituição fotogramétrica em escala 1:1.000.

A partir destes MDT's foram definidos intervalos hipsométricos para a região da Serra do Azeite, divididos em cinco classes de altitude para uma melhor visualização das altitudes na área, com mínima de 51 m e máxima de 1249 m.

Observa-se que a rodovia se encontra delineada sobre altitudes de 600 a 800 m na porção sul, alcançando elevações menores que 200 m ao norte do trecho estudado (Figura 6). Para a faixa de domínio da rodovia, a elevação mínima é 43 m e a máxima 654 m, compreendendo grande parte do traçado da rodovia elevações menores que 200 m na porção norte e aumentando gradativamente as elevações ao sul do trecho. Foram elaborados mapas para a faixa de domínio da rodovia compreendendo trechos de 2 quilômetros de extensão para uma melhor visualização na escala dos dados, sendo gerado oito mapas que se encontram no Apêndice1.

FIGURA 6 - MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) PARA A REGIÃO DA SERRA DO AZEITE.

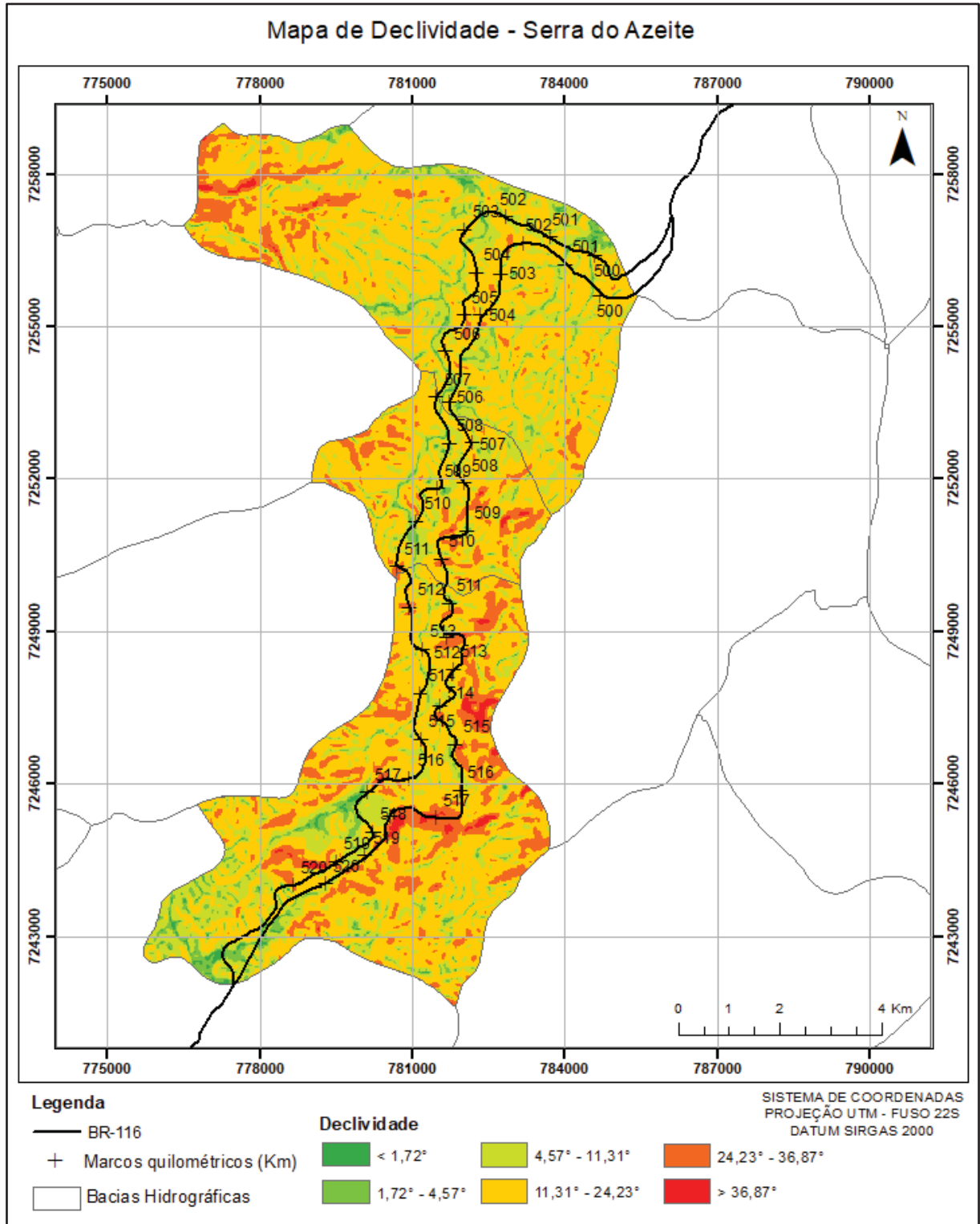


FONTE: a autora (2018).

Para o processamento dos atributos topográficos foi utilizado o método de janelas móveis 3X3 a partir da estrutura em *grid* do raster do MDT (SILVEIRA ET AL., 2014). É criada uma grade com distribuição e resolução definidas por cálculos entre as oito células vizinhas, resultando num conjunto de dados interligados por

espaçamentos definidos. Esses dados foram gerados a partir da ferramenta “Slope” do software Arcgis 10.2 (ESRI, 2012), que resulta na obtenção da declividade em graus para toda a extensão da Serra do Azeite (Figura 7) e para a faixa de domínio da rodovia (Apêndice 2).

FIGURA 7 - MAPA DE DECLIVIDADE PARA A REGIÃO DA SERRA DO AZEITE.



FONTE: a autora (2018).

O tipo de relevo que predomina na área, segundo as declividades obtidas a partir do MDT de 30 m de resolução, é o relevo forte ondulado (55%) e em seguida o relevo ondulado (21%). Já para a faixa de domínio da rodovia, elaborada a partir da base de dados de 1 m, observa-se a predominância do relevo forte ondulado e montanhoso (Tabela 3).

TABELA 3 - OCORRÊNCIA DAS CLASSES DE RELEVO NA SERRA DO AZEITE.

| Tipo de Relevo | Declividade Graus (°) | Ocorrência na região (%) | Ocorrência no trecho (%) |
|----------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| plano          | < 1,72                | 1                        | 5                        |
| suave ondulado | 1,72 - 4,57           | 5                        | 9                        |
| ondulado       | 4,57 - 11,31          | 21                       | 17                       |
| forte ondulado | 11,31 - 24,23         | 55                       | 32                       |
| montanhoso     | 24,23 - 36,87         | 16                       | 27                       |
| escarpado      | > 36,87               | 1                        | 10                       |

FONTE: a autora (2018).

O perfil de curvatura de uma vertente é o grau de concavidade ou convexidade da mesma, sendo positivas as convexas indicando fluxo divergente, e negativas as côncavas que indicam fluxo convergente, e valor igual a zero para superfícies retilíneas.

A curvatura foi gerada a partir da ferramenta “*Curvature*” do *software Arcgis 10.2* (ESRI, 2012), tendo como base o raster do MDT, e refere-se à forma da vertente e sentido de fluxo de água e sedimentos. Os dados obtidos por esse processamento foram discretizados em três classes, segundo proposto por Silveira et al. (2014), como sendo convergentes valores menores que  $-0,02$ , divergentes valores maiores que  $0,02$  e retilíneos os valores intermediários (Figura 8 e Apêndice 3).

A distribuição dos planos de curvatura na região e no trecho da rodovia demonstra uma maior quantidade de encostas divergentes, seguido de convergentes e em menor expressão encostas retilíneas (Tabela 4).

TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS PLANOS DE CURVATURA NA REGIÃO.

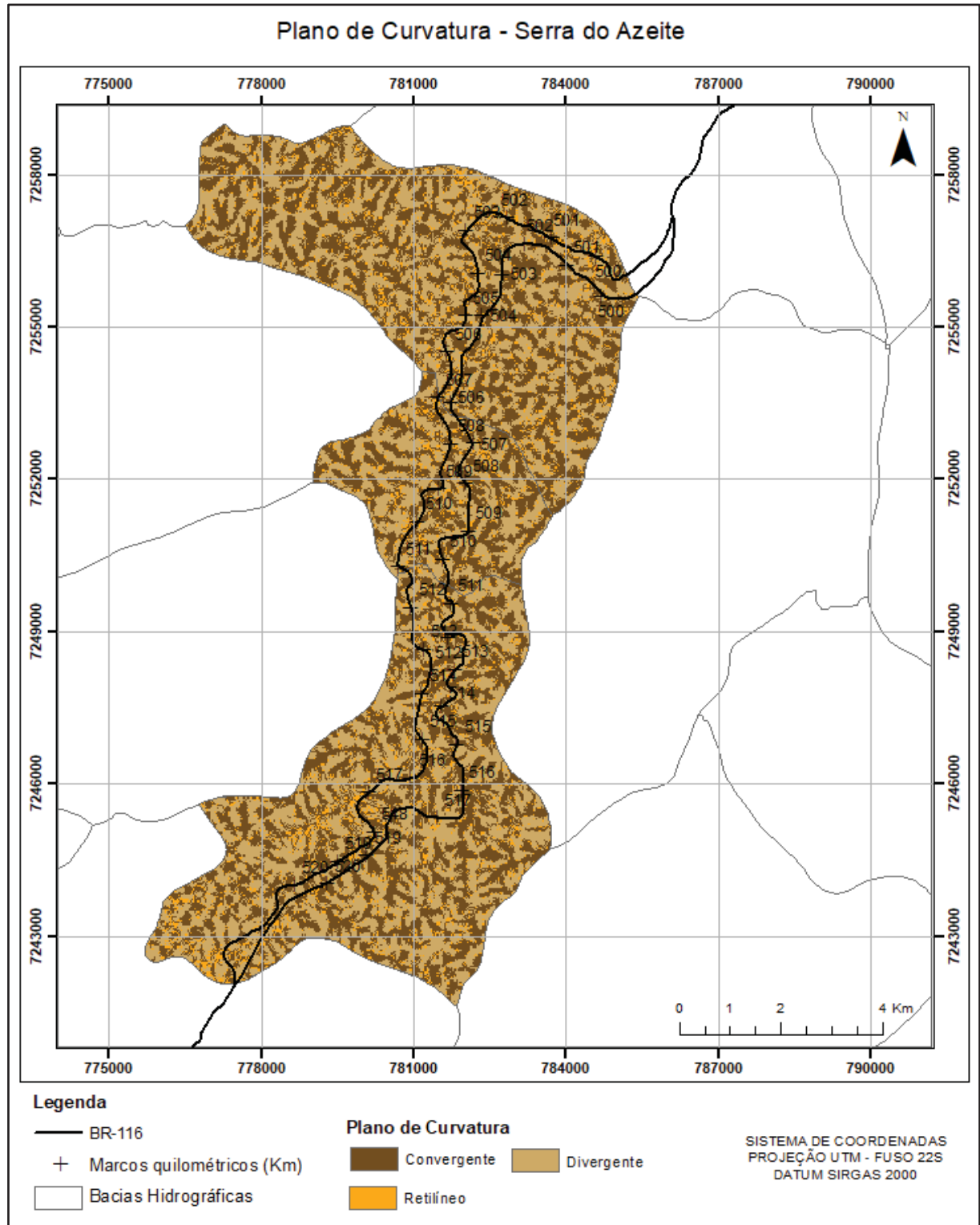
| Tipo de Curvatura | Ocorrência na região (%) | Ocorrência no trecho (%) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| Convergente       | 44                       | 47                       |
| Retilínea         | 9                        | 3                        |
| Divergente        | 47                       | 50                       |

FONTE: a autora (2018).

A declividade é o principal atributo topográfico que gera áreas instáveis e suscetíveis a movimentos de massas. Em declividades de 20 a 45° são as com maior

propensão de ocorrer eventos de escorregamentos, associado a encostas com plano de curvatura divergentes que retêm maior fluxo de água na vertente, potencializando o processo de movimentação do solo.

FIGURA 8 - PLANO DE CURVATURA PARA A REGIÃO DA SERRA DO AZEITE.



FONTE: a autora (2018).



#### 4.1.1 Análise do relevo

Os atributos topográficos do relevo são fatores importantes na predisposição de movimentos de massa, sendo muitas vezes fatores condicionantes a eventos instabilizadores. Estudos de movimentos de massa de um evento na Serra do Mar Paranaense mostraram que os principais atributos relacionados com os processos de movimentos de massa são hipsometria, declividade e plano de curvatura (SILVEIRA ET AL., 2014). Baseado na sobreposição desses atributos topográficos em análise espacial é realizado o mapa preliminar de suscetibilidade a movimentos de massa.

A partir da geração do MDT, obteve-se os mapas hipsométrico, declividades e plano de curvatura. Realizou-se a discretização dos atributos topográficos e combinação das classes geradas em plataforma SIG, somados no formato matricial, por meio da interface *Spatial Analyst* do software ArcGis. O resultado é uma combinação de três dígitos qualificados em intensidades de suscetibilidades. Na Tabela 5 segue os valores designados para cada classe dos atributos topográficos.

TABELA 5 - CLASSES DOS ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS.

| Hipsometria |     | Declividade |    | Plano de Curvatura |   |
|-------------|-----|-------------|----|--------------------|---|
| < 200 m     | 100 | < 8°        | 10 | Convergente        | 1 |
| 200 - 400 m | 200 | 8° - 20°    | 20 | Retilíneo          | 2 |
| 400 - 600 m | 300 | 20° - 45°   | 30 | Divergente         | 3 |
| 600 - 800 m | 400 |             |    |                    |   |
| > 800 m     | 500 |             |    |                    |   |

FONTE: a autora (2018).

A suscetibilidade a movimentos de massa foi dividida nas seguintes classes: baixa, moderada, alta e muito alta, baseada no histórico de ocorrências de instabilização na região e no método de classificação de áreas suscetíveis proposta por Silveira et al (2014).

As classes baixa e moderada suscetibilidade compreendem vertentes com declividades menores que 8°, sendo as encostas com plano de curvatura retilíneo classificadas em baixa ocorrência, e as com planos convergente ou divergente, na classe de moderada suscetibilidade. A alta propensão a escorregamentos engloba encostas com declividades entre 8° e 20°, e a de muito alta suscetibilidade com declividades entre 20° e 45°, contendo, em ambas as classes, vertentes convergentes a divergentes.

## 4.2 DADOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram feitos em duas etapas de quatro dias cada, sendo a primeira destinada à caracterização dos solos e análise dos escorregamentos, e a segunda para descrição litológica e coleta de dados estruturais. Realizou-se a identificação do tipo de solo onde ocorrem os escorregamentos, e determinou-se os locais para a coleta de quatro amostras indeformadas para os ensaios de caracterização geotécnica. Na outra etapa de campo, foi feita a descrição dos maciços rochosos dos taludes da BR-116 e suas adjacências, juntamente com a obtenção de dados estruturais, realizada com a bússola do tipo *Clar*.

No campo foi analisada a morfologia da paisagem, a fim de buscar correlação com os mapas topográficos obtidos, a validação das cicatrizes de escorregamentos identificadas nas imagens de satélites e também a observação das feições e geometria dos escorregamentos. Foi realizada a descrição das características geométricas e morfológicas dos escorregamentos, como extensão e direção do movimento, natureza do material envolvido, presença de superfície de movimentação e mecanismo de movimentação (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Para esse levantamento foram observadas feições diagnósticas de movimentos de massa, como a presença de blocos e matacões no sopé das vertentes, fendas de tração no topo dos taludes, blocos deslocados em massa de solo, cicatrizes de escorregamentos e afloramentos de rocha muito intemperizados. Também foi verificada a presença de estruturas nos taludes dos maciços rochosos que apresentam caimentos voltados para o corte da rodovia.

## 4.3 SONDAGENS

Foram realizadas na região, em estudos anteriores da APRB, 33 sondagens, sendo 18 delas à percussão e as outras 15 sondagens rotativas mistas. A sondagem à percussão é um método de investigação da subsuperfície, aplicado para a investigação de materiais inconsolidados, na qual é identificado o tipo de material, o nível do lençol freático e a resistência à penetração do material (CHIOSSI, 2013). A sondagem rotativa mista é um método aplicado para investigar em uma mesma sondagem os materiais rochosos e os inconsolidados, por meio da sonda rotativa e da percussão, respectivamente. Neste método, além da identificação do material e



nível do lençol freático, são obtidos, também, informações sobre o grau de faturamento e a alteração das rochas (CHIOSSI, 2013).

A resistência à penetração obtida a partir da sondagem à percussão é definida pela NBR 6484 (ABNT, 2001) como o número de golpes necessários para cravar 30 cm do amostrador, após a cravação dos primeiros 15 cm, utilizando-se uma corda de sisal para levantar o martelo padronizado.

A partir dos valores de resistência a penetração é possível obter o ângulo de atrito interno e coesão dos solos, em função da profundidade ( $z$ ) e  $N_{SPT}$  (número de golpes). Essa metodologia de cálculo a partir de sondagens à percussão (LIAO e WITHMAN, 1986) é amplamente utilizada devido a prática comum desse tipo de sondagem e a rapidez do resultado calculado, pois para obter os mesmos parâmetros a partir de ensaios de resistência exige-se um tempo maior de execução do ensaio.

Em estudos na Serra do Mar, Vaz (2014) comparou os valores de ângulo de atrito e coesão obtidos em ensaios de cisalhamento direto com os obtidos por meio do cálculo baseado no SPT, identificando valores próximos entre as duas metodologias executadas, sendo que o valor calculado a partir dos dados das sondagens foi utilizado no cálculo do fator de segurança por ser um pouco menor que o resultante do ensaio.

Para obter os parâmetros de resistência a partir dos dados da sondagem, é realizado primeiro a correção do  $N_{SPT}$  de uma tensão confinante para uma tensão de referência de 100 kPa ( $N_1$ ), através da determinação da tensão vertical efetiva ( $\sigma_v'$ ) e do coeficiente de correção (CN), conforme Liao e Withman (1986):

$$\sigma_v' = z \times \gamma_{nat} \quad (2)$$

$$N_1 = N_{spt} \times CN \quad (3)$$

$$CN = \sqrt{\frac{100}{\sigma_v'}} \quad (4)$$

Depois faz-se a correção do  $N_{SPT}$  para um valor de penetração de referência, normalizado com base no padrão americano de  $N_{60}$ , onde a energia liberada é de 60% (SCHNAID, 2000):

$$N_{60} = \frac{N_{spt} \times \text{energia aplicada}}{0,60} \quad (5)$$

Para materiais granulares é cometida uma correlação direta com o NSPT corrigido em relação à energia aplicada ao sistema e ao nível de tensões  $(N_1)_{60}$ , proposta por HATANAKA e UCHIDA (1996):

$$\phi = 20 + (15,4 \times (N_1)_{60})^{1/2} \quad (6)$$

E para materiais coesivos, é determinado a resistência não-drenada ( $S_u$ ), de acordo com STROUD (1989):

$$S_u = 5 \times N_{60} \text{ (kPa)} \quad (7)$$

A partir dessas equações é calculado o ângulo de atrito interno e a coesão:

$$\tau = \sigma_v' \times \tan \phi_{(N_1)60} \quad (8)$$

$$c' = \tau - \sigma_{v0}' \times \tan \phi \quad (9)$$

Os dados obtidos a partir das sondagens foram utilizados para a caracterização dos solos da área de estudo, e os parâmetros de resistência, calculados a partir das equações descritas anteriormente, foram usados como base para o cálculo do Fator de Segurança.

#### 4.3.1 Descrição dos perfis de sondagens

Foram realizadas anteriormente pela concessionária sondagens no Km 505+200 Pista Norte para implementação de cortina atirantada em aterro, sendo executadas 7 sondagens mistas. A partir da descrição dos perfis de sondagens, verificou-se que o talude é composto de silte argilo-arenoso a argila arenosa, de coloração marrom amarelado, variando de 1,30 a 20 metros de espessura, e com pedregulhos e matações de gnaiss. Em profundidade de 10 a 20 metros encontrou-se gnaiss e migmatito de textura fina.

A resistência à penetração é baixa, com  $N_{spt}$  de 6 a 7 nos primeiros metros, aumentando conforme a profundidade e presença de matações ao longo da perfuração. O nível de água varia de 1 a 2 metros de profundidade. Os parâmetros de resistência obtidos através dos cálculos, descritos anteriormente, apresentaram o menor valor de ângulo de atrito interno verificado nos 5 metros iniciais como sendo  $31^\circ$  e coesão variável de 1 a 16 kPa em profundidades rasas.

No Km 508+500 Pista Norte foram executadas sondagens para o retaludamento no local devido a um evento de escorregamento ocorrido em 2010. O talude é composto por silte arenoso com pedregulhos e matacões, com espessura de 7 metros. A resistência a penetração é baixa nos primeiros dois metros e aumenta significativamente devido à presença de matacões ao longo do perfil do solo. O menor ângulo de atrito calculado é 30° e coesão variando de 0,5 a 11 kPa.

Também foi realizada pela concessionária investigações no Km 508+700 Pista Sul por este local apresentar um viaduto com histórico de processos instabilizantes e conseqüentemente, algumas campanhas de sondagens foram executadas no local, sendo realizadas 12 sondagens à percussão e 8 sondagens mistas.

O solo é composto de silte argilo-arenoso intercalado com argila siltosa por vezes com pedregulhos e fragmentos de rocha. O nível de água encontra-se de 1 a 5 metros de profundidade e a espessura do solo varia de 6 a 38 metros. Em profundidade de 30 a 38 metros encontrou-se mica xisto e quartzito de textura fina intercalado com sericita filito. A resistência à penetração é muito baixa, com N<sub>spt</sub> 1 a 5 nos primeiros metros. O menor ângulo de atrito calculado varia de 24° a 30° e a coesão varia de 1 a 10 kPa nos primeiros 5 metros de perfuração.

No Km 517+700 Pista Sul há um histórico de movimentos de massa já estabilizados, e executadas 3 sondagens. O solo é composto por silte arenoso pouco argiloso a argila siltosa, com espessura de 8 a 34 metros. O nível de água encontra-se de 3 a 4 metros de profundidade. O menor ângulo de atrito calculado para os 5 primeiros metros é 26° - 29° e a coesão varia < 1 a 5 kPa em profundidades rasas.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Os solos foram classificados em campo segundo seu processo de formação e rocha de origem, tratando-se de uma classificação genética. Os solos gerados pela alteração da rocha matriz e diferenciação pedológica *"in situ"* são denominados residuais, e os solos transportados pela ação da gravidade são denominados coluvionares.

Na área de estudo os solos residuais são amarelos acastanhados a avermelhados, de granulometria média a grossa, evidenciando estruturas reliquias

da rocha matriz gnáissica, indicado pela intercalação de níveis esbranquiçados e avermelhados do bandamento composicional quartzo feldspático. Em outros locais o solo apresenta-se laminado e com grãos de quartzo resistentes e presença de micas, relíquias do micaxisto. Esses solos ocorrem nas encostas de maiores espessuras, em relevo ondulado.

Os solos coluvionares são marrons avermelhados a amarelados de composição argilo-arenosos com fragmentos de rocha. São encontrados em diversas espessuras nas porções inferiores das vertentes.

#### 4.4.1 Coleta de amostras e descrição dos solos in situ

Foram coletadas 4 amostras indeformadas e deformadas para os ensaios de caracterização (granulometria, densidade dos grãos e limites de Atterberg). Essa etapa de campo foi realizada nos dias 20 a 22 de junho de 2017 e compreendeu também a descrição tátil-visual dos solos de quatro taludes ao longo da rodovia. Os locais de coleta foram definidos baseado na delimitação de áreas suscetíveis à escorregamentos e outras com cicatrizes.

Através da abertura de trincheiras, retirou-se blocos cúbicos de solo de 30 cm moldados e cobertos por parafina e tecido para armazenamento e transporte em caixa de madeira. Foram coletados em profundidades de 0,60 m a 1 m, para que a vegetação e raízes não interferissem na coleta. A Tabela 6 apresenta a localização dos pontos de coleta de amostras e as profundidades nas quais foram realizadas as coletas.

TABELA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO.

| Amostra | Local                  | Latitude | Longitude | Elevação | Solo    | Rocha de Origem  | Prof. (m) |
|---------|------------------------|----------|-----------|----------|---------|------------------|-----------|
| 1       | Km 508+700 Pista Sul   | 7252007  | 781520    | 201      | colúvio | micaxisto        | 1,15      |
| 2       | Km 511+400 Pista Sul   | 7250068  | 780962    | 135      | colúvio | gnaisse          | 0,60      |
| 3       | Km 516+500 Pista Sul   | 7246098  | 780583    | 477      | colúvio | gnaisse          | 0,95      |
| 4       | Km 518+500 Pista Norte | 7245050  | 780476    | 584      | colúvio | gnaisse/milonito | 0,60      |

FONTE: a autora (2018).

No ponto Km 508+700 Pista Sul (Figura 9) ocorre um solo coluvionar argiloso com a presença de micas e com fragmentos de rocha de até 10 cm de diâmetro. No local observou-se presença de raízes até quase 1 m de profundidade e alta umidade. A camada de matéria orgânica de 10 cm se repete após 50 cm de escavação, indicando soterramento do solo natural.



FIGURA 9 - AMOSTRA 1 - KM 508+700 PISTA SUL.



FONTE: a autora (2018).

No ponto Km 511+400 Pista Sul (Figura 10) o solo é arenoso e apresenta coloração avermelhada e fragmentos de rocha. Há camada de matéria orgânica de 10 cm de espessura.

FIGURA 10 - AMOSTRA 2 – KM 511+400 PISTA SUL.



FONTE: a autora (2018).



No Km 516+500 Pista Sul (Figura 11) o solo é arenoso com uma fina camada de matéria orgânica e apresenta coloração amarelada.

FIGURA 11 - AMOSTRA 3 - KM 516+500 PISTA SUL.



FONTE: a autora (2018).

No ponto Km 518+500 Pista Norte (Figura 12) o solo é siltoso com fina camada de matéria orgânica e presença de raízes. Blocos de rocha xistosa observados durante a escavação.

FIGURA 12 - AMOSTRA 4 - KM 518+500 PISTA NORTE.



FONTE: a autora (2018).

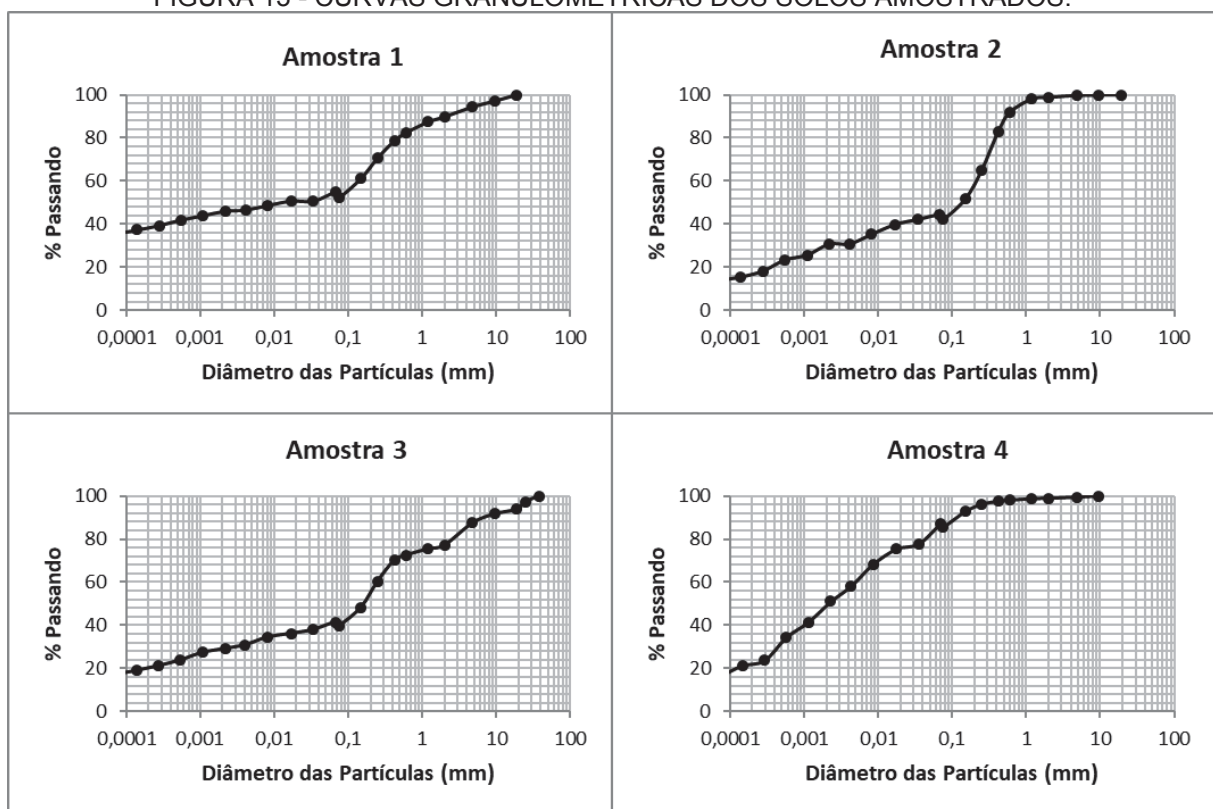


#### 4.4.2 Ensaios de laboratório

As propriedades físicas dos solos foram determinadas através dos ensaios de caracterização, realizados segundo as normas e orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios executados nas 4 amostras de solos foram a análise granulométrica (NBR 7181/2016), o limite de liquidez (NBR 6459/2016), o limite de plasticidade (NBR 7180/2016) e a umidade natural (NBR 6457/2016). A densidade real dos grãos foi determinada seguindo a norma do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens DNER-ME 093/94.

As amostras 1 e 4 apresentaram uma maior proporção de finos, sendo 45,7% de argila e 8,2% de silte no primeiro, e 48,7% de argila e 35,7% de silte no segundo. Já as amostras 2 e 3 contêm maior porcentagem de areia, sendo 55% e 36,4%, respectivamente. Na Figura 13 pode-se observar a curva de distribuição granulométrica para cada amostra.

FIGURA 13 - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DOS SOLOS AMOSTRADOS.



FONTE: a autora (2018).

Observam-se que os solos amostrados apresentam granulometria mal graduada, característica de solos coluvionares de sopé das vertentes. A densidade real dos grãos obtida através do ensaio está entre 2,47 e 2,65 g/cm<sup>3</sup>, e a umidade natural dos solos amostrados foi de 8,17% a 12,56%. O limite de liquidez está entre 31% e 43%, apresentando limite de plasticidade entre 22% e 38% nos solos finos, enquanto os arenosos são não plásticos. Na Tabela 7 é apresentado as propriedades físicas dos solos amostrados.

TABELA 7 - PROPRIEDADES FÍSICAS DOS SOLOS AMOSTRADOS.

| Parâmetros                                    | Amostras          |                   |                   |                   |      |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|
|   | 1 - KM 508+700 PS | 2 - KM 511+400 PS | 3 - KM 516+500 PS | 4 - KM 518+500 PN |      |
| Densidade Real dos Grãos (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,62              | 2,63              | 2,65              | 2,47              |      |
| Umidade Natural (%)                           | 12,56             | 10,33             | 8,17              | 10,25             |      |
| Limite de Liquidez (%)                        | 33,42             | 31,17             | 42,34             | 43,18             |      |
| Limite de Plasticidade (%)                    | 22,44             | não plástico      | não plástico      | 38,07             |      |
| Índice de Plasticidade                        | 10,98             | -                 | -                 | 5,11              |      |
| Granulometria (%)                             | argila            | 45,7              | 29,9              | 28,8              | 48,7 |
|   | silte             | 8,2               | 13,9              | 11,9              | 35,7 |
|   | areia             | 35,9              | 55,0              | 36,4              | 14,6 |
|   | pedregulho        | 4,6               | 0,9               | 10,3              | 0,5  |
|   | pedra             | 5,6               | 0,3               | 12,6              | 0,5  |
| Classificação ABNT (NBR 6502/1995)            | argila arenosa    | areia argilosa    | areia argilosa    | argila siltosa    |      |

FONTE: a autora (2018).

Obtidas as curvas granulométricas, os limites de plasticidade e de liquidez, e a densidade real dos grãos, os solos foram classificados de acordo com a norma ABNT NBR 6502/1995. Os solos são finos, argilo arenosos a argilo siltosos, e ainda, porções compostas por areia argilosa.

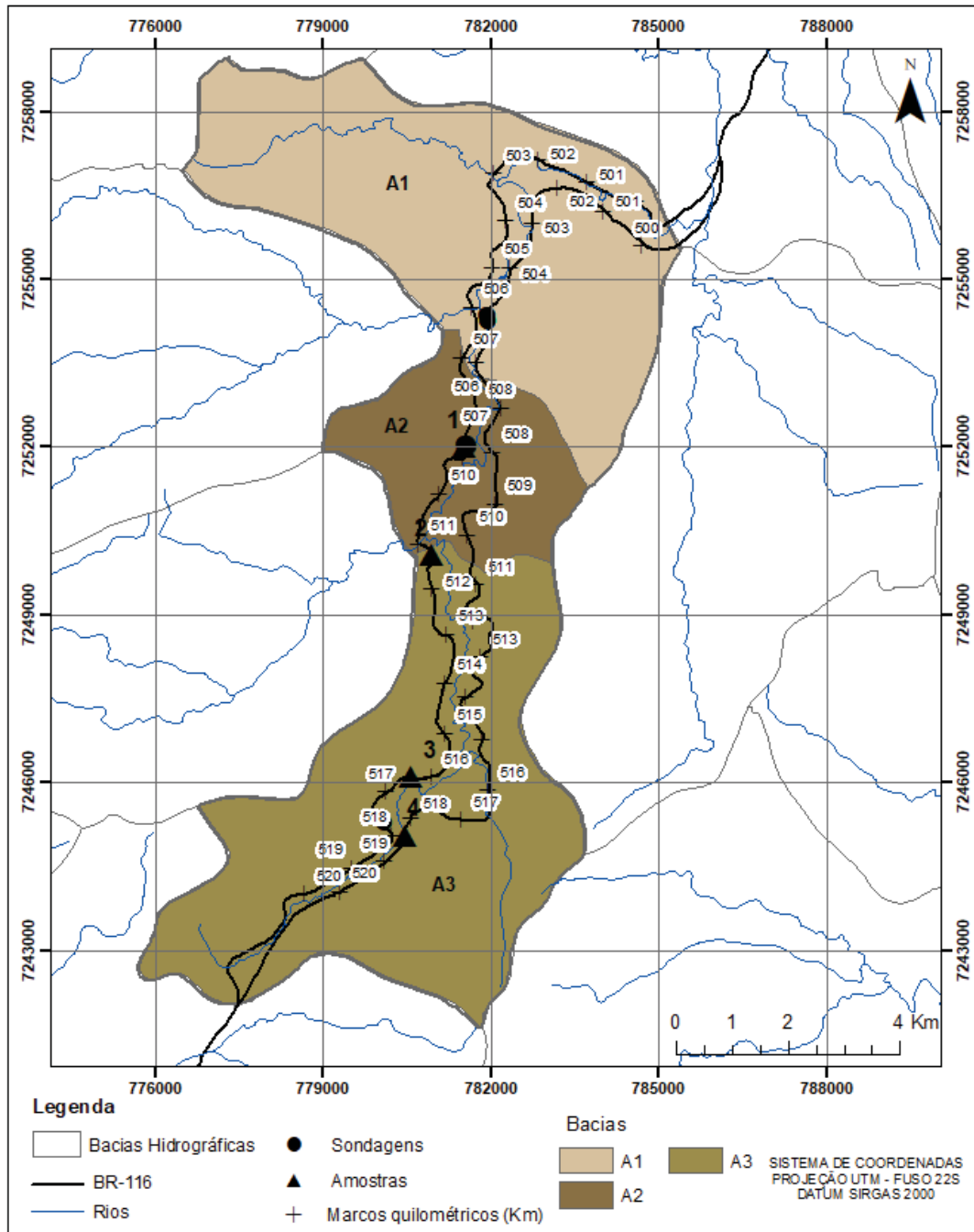
#### 4.4.3 Caracterização Geotécnica

A caracterização geotécnica dos solos da região da Serra do Azeite realizou-se a partir dos dados dos perfis de sondagens, dos resultados dos ensaios de caracterização e dos parâmetros de resistência dos solos, obtidos por meio de valores de resistência a penetração. A delimitação das áreas com características similares dos solos foi baseada nas áreas de contribuição hidrográfica, obtidas a partir da base hidrográfica Ottocodificada da Agência Nacional de Águas (ANA, 2007).

Na área correspondente ao trecho da BR-116 entre os Km 500 e 520 ocorrem três bacias hidrográficas, sendo denominadas bacias A1, A2 e A3. O principal rio presente na área de estudo é o Jacupiranguinha que segue quase que paralelamente

a rodovia, tendo extensão de 8,4 km no trecho passante pela área da bacia A1, 5,3 km na A2, e 11,5 km na bacia A3. O sentido de fluxo desse rio é para norte seguindo para desaguar no rio Jacupiranga, afluente do Rio Ribeira. No mapa da Figura 14 podem ser visualizados as bacias e a localização das sondagens e das amostras coletadas em campo.

FIGURA 14 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DA REGIÃO DA SERRA DO AZEITE.



FONTE: a autora (2018).

A bacia A1 corresponde a porção mais a norte da rodovia e compreende cerca de 32,38 Km<sup>2</sup>, estando em altitudes menores que 200 metros. A bacia está delineada em micaxistos e gnaisses bandados, contendo pequenos córregos que interceptam o rio principal no sentido leste. Observam-se solos argilo arenosos a silto argilo-arenosos, com pedregulhos e matações de gnaisse, apresentando baixa coesão (1 a 16 kPa) e ângulo de atrito de 31°.

Entre altitudes de 200 e 400 metros é delineada a bacia A2, que compreende uma área de 11,35 km<sup>2</sup>, abrangendo micaxistos e gnaisses bandados. Os córregos presentes são estreitos e desaguam a leste do Rio Jacupiranguinha. Nesta bacia verificou-se em campo que o solo no Km 508+700 Pista Sul é composto por argila areno-siltosa, com presença de pedregulhos e fragmentos de rocha, bem como apresenta micas, resquícios da rocha matriz xistosa. São solos pouco coesos (1 a 10 kPa), e com ângulo de atrito entre 24° a 30°.

Na porção sul da região encontra-se a bacia A3, com 34,84 km<sup>2</sup> e altitudes entre 400 e 600 metros, atingindo em algumas porções elevações maiores que 800 metros. É delineada em gnaisses bandados e localmente em maciços graníticos, apresentando pequeno córrego que deságua a oeste do rio Jacupiranguinha.

Os solos presentes nesta bacia são constituídos por areia argilo-siltosa a argila silto-arenosa, com fragmentos de rocha, apresentando cores amareladas a avermelhadas, de acordo com as amostras coletadas nos km 511+400 e 516+500 Pista Sul, e km 518+500 Pista Norte. Apresentam coesão muito baixa (1 a 5 kPa), e ângulo de atrito de 26° a 29°.

#### 4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS ROCHAS

Na área de estudo ocorrem maciços de gnaisse em sua maioria, e localmente micaxistos e maciços graníticos, os quais apresentam foliação milonítica penetrativa na maioria das vezes, bem como fraturas pervasivas ao longo de toda extensão aflorante. A Figura 15 contém a localização dos taludes rochosos e na Tabela 8 encontram-se as coordenadas e os locais dos afloramentos na rodovia.

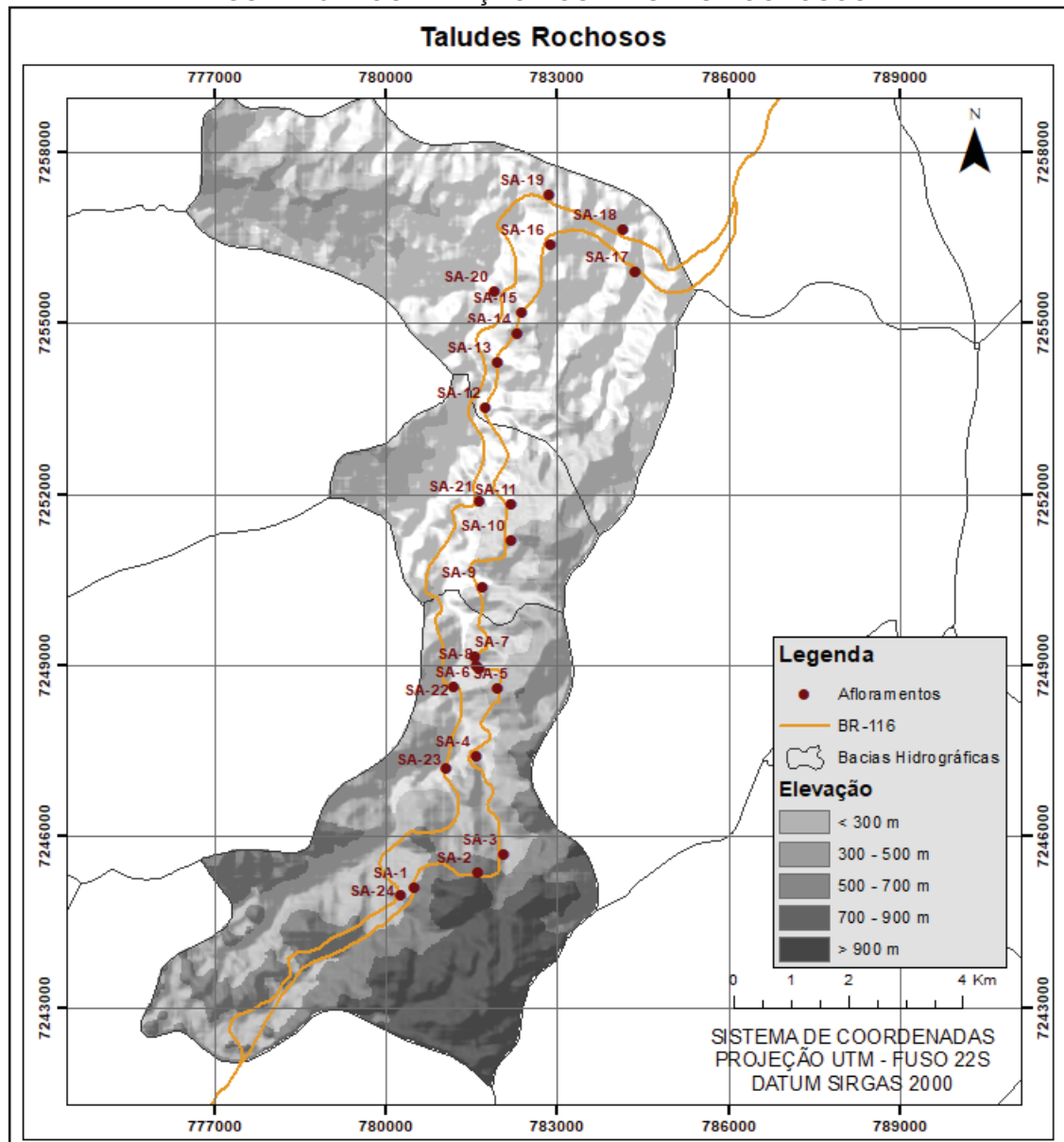
TABELA 8 - LITOLOGIAS E LOCALIZAÇÃO EM KM DOS TALUDES.

| Ponto | Coordenadas |        | *Local - Km  | Litologia         | Ponto | Coordenadas |        | *Local - Km  | Litologia       |
|-------|-------------|--------|--------------|-------------------|-------|-------------|--------|--------------|-----------------|
|       | N           | E      |              |                   |       | N           | E      |              |                 |
| SA-1  | 7245107     | 780511 | 518+300 - PN | gnaisse bandado   | SA-13 | 7254325     | 781957 | 504+800 - PN | paragnaisse     |
| SA-2  | 7245377     | 781615 | 516+800 - PN | milonito          | SA-14 | 7254825     | 782304 | 504+500 - PN | granito gnaisse |
| SA-3  | 7245695     | 782071 | 516+200 - PN | blocos de granito | SA-15 | 7255194     | 782390 | 504 - PN     | gnaisse bandado |
| SA-4  | 7247424     | 781590 | 514-513 - PN | gnaisse bandado   | SA-16 | 7256389     | 782887 | 503 - PN     | micaxisto       |
| SA-5  | 7248597     | 781953 | 512+600 - PN | gnaisse bandado   | SA-17 | 7255908     | 784358 | 500+400 - PN | micaxisto       |
| SA-6  | 7249013     | 781590 | 512+200 - PN | gnaisse bandado   | SA-18 | 7256640     | 784148 | 500+500 - PS | micaxisto       |
| SA-7  | 7249156     | 781566 | 511+800 - PN | gnaisse bandado   | SA-19 | 7257247     | 782866 | 502 - PS     | micaxisto       |
| SA-8  | 7248950     | 781640 | 511+200 - PN | gnaisse bandado   | SA-20 | 7255567     | 781911 | 504+200 - PS | gnaisse bandado |
| SA-9  | 7250380     | 781688 | 510 - PN     | gnaisse bandado   | SA-21 | 7251878     | 781635 | 508+700 - PS | micaxisto       |
| SA-10 | 7251203     | 782190 | 509+100 - PN | gnaisse bandado   | SA-22 | 7248642     | 781199 | 513 - PS     | gnaisse bandado |
| SA-11 | 7251830     | 782210 | 508 - PN     | gnaisse bandado   | SA-23 | 7247209     | 781076 | 514+800 - PS | gnaisse bandado |
| SA-12 | 7253531     | 781757 | 507+200 - PN | gnaisse bandado   | SA-24 | 7244987     | 780272 | 518 - PS     | granito         |

\*Localização em km da rodovia BR-116: PN - pista norte, PS - pista sul.

FONTE: a autora (2018).

FIGURA 15 - LOCALIZAÇÃO DOS TALUDES ROCHOSOS.



FONTE: a autora (2018).

Ao longo do trecho da Serra do Azeite afloram gnaisses bandados de cor cinza claro a escuro de granulação fina a média, localmente grossa, compostos por quartzo e plagioclásio nos níveis claros e hornblenda e subordinadamente biotita nos níveis escuros. O bandamento gnáissico é bem definido, variando de milimétrico a centimétrico. A rocha apresenta foliação milonítica paralela ao bandamento, bem desenvolvida e contínua, indicada pela lineação de estiramento mineral e estruturas de pares SC.

Ocorrem ainda veios quartzo-feldspáticos centimétricos paralelos ou truncando a foliação. Localmente há porções com intensa milonitização, com a rocha apresentando-se muito dura e maciça, com granulação muito fina, bem como estrias de atrito com inclinações entre 20° e 30° indicando falha com deslocamento no sentido anti-horário.

Na área também ocorrem paragnaisses cinza de granulação fina a média com bandamento centimétrico, sendo comum a presença de dobras intrafoliares isoclinais e boudans ultramáficos com até 10 cm de comprimento.

A norte da área ocorrem micaxistos cinza esverdeados de granulação fina a média, constituídos por quartzo, muscovita e biotita. Possuem foliação milonítica penetrativa e contínua paralela ao acamamento sedimentar, definida pela intercalação de níveis quartzosos e micáceos, e também a presença de lineação de estiramento mineral bem desenvolvido nesses planos.

Os maciços graníticos são de colorações rosas acinzentados, compostos por quartzo, feldspato e biotita, de granulação fina a média e textura maciça, apresentando foliação milonítica insipiente e fraturas pervasivas ao longo do maciço. Localmente foram encontrados nesse maciço enclaves de gnaiss e migmatitos foliados.

#### 4.6 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM SOLOS

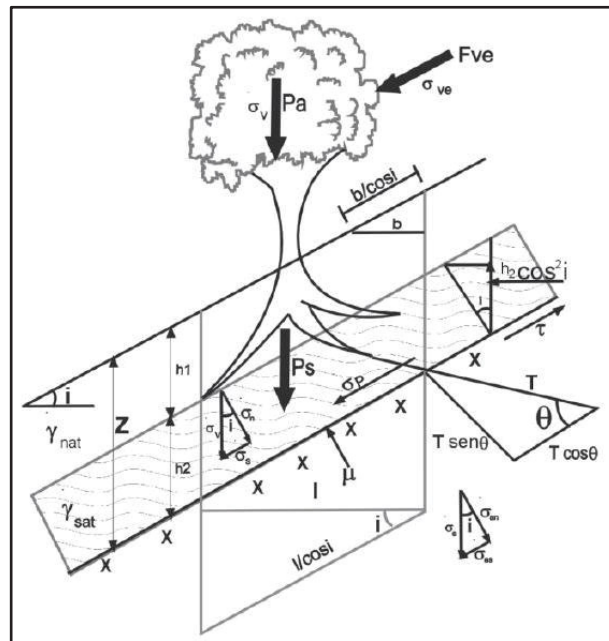
A estabilidade de uma vertente é analisada em função das forças resistentes ao movimento e das forças solicitantes, sendo determinado um Fator de Segurança para o talude, com o qual é avaliado a possibilidade de ruptura do solo. Essa análise envolve muitos fatores para que seja possível uma determinação consistente com a situação de estabilidade do talude. Há vários métodos de cálculos do Fator de



Segurança expostos por FIORI e CARMIGNANI (2015), baseados nos parâmetros que serão considerados para o estudo da vertente.

Para essa pesquisa, utilizou-se a equação que considera as vertentes de extensão ilimitada, com percolação de água paralelamente ao talude, e com vegetação. Nesse modelo é analisado o perfil de solo homogêneo, e estimado os efeitos da água dentro da vertente através da pressão de percolação e da pressão neutra. O efeito da presença de cobertura vegetal na análise é feito levando em conta a força do vento que atua sobre a copa das árvores ( $F_{ve}$ ), a força exercida pelo peso das árvores no solo ( $\sigma_a$ ) e o efeito de tirantes das raízes. Na Figura 16 pode-se observar os principais fatores que influenciam na análise da estabilidade.

FIGURA 16 - PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE VERTENTES.



FONTE: Fiori e Carmignani (2015).

O peso das árvores é dado por  $Pa = \sigma_a \cos i$ , sendo  $1/\cos i$  a área da seção da vertente, ou seja, o número de árvores por unidade da área da vertente corresponde ao peso exercido pelas árvores sob o solo. A pressão ( $\sigma_a$ ) exercida sobre a vertente pelo peso das árvores é obtida dividindo o peso das árvores ( $Pa$ ) pela área de abrangência das raízes. E a pressão exercida pelo vento ( $\sigma_{ve}$ ) nas copas das árvores é calculada por (Equação 10):

$$F_{ve} = \sigma_{ve} \cos i \quad (10)$$

As raízes são consideradas como um reforço do sistema solo-raíz, contribuindo para coesão do solo e conseqüente aumento de sua resistência à ruptura, sendo a coesão do solo total ( $c$ ) dada por  $c = c_s + S_r$ , onde  $c_s$  é a contribuição do solo e  $S_r$  a contribuição das raízes para a coesão.

Wolle e Pedrosa (1981), em estudos na Serra do Mar, determinaram o valor de 3 kPa para a pressão da árvore exercida sob a vertente, e Nunes (2002) obteve a pressão do vento ( $\sigma_{ve}$ ) em torno de 1 kPa. Estes dados serão utilizados como base para a análise da estabilidade dos taludes com a influência de vegetação.

Para o cálculo do Fator de Segurança (Equação 11), são usados os parâmetros de resistência dos solos (ângulo de atrito interno -  $\phi$  - e coesão -  $c$ ), a espessura de solo, a declividade da encosta e cobertura vegetal, onde serão consideradas a ação da força do vento e o peso das árvores, conforme a seguinte equação (FIORI e CARMIGNANI, 2015):

$$F_S = \frac{C_s + \left[ \left( \gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i \right] \operatorname{tg} \phi}{(h \gamma_{nat} + \sigma_a) \operatorname{sen} i + \sigma_{ve}} \quad (11)$$

Onde:

$F_S$  = Fator de segurança;

$C_s$  = Coesão do solo (kPa);

$\gamma_{nat}$  = Peso específico natural do solo (kN/m<sup>3</sup>);

$h_w$  = Altura da zona de solo saturado, perpendicular à vertente (m);

$h$  = Altura da zona de solo não saturado, perpendicular à vertente (m);

$\gamma_a$  = Peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>);

$i$  = Inclinação da vertente (graus);

$\sigma_a$  = Pressão exercida sobre a vertente pelo peso das árvores (kPa);

$\phi$  = Ângulo de atrito interno do solo (graus)

$\sigma_{ve}$  = Pressão exercida pelo vento na cobertura vegetal (kPa).

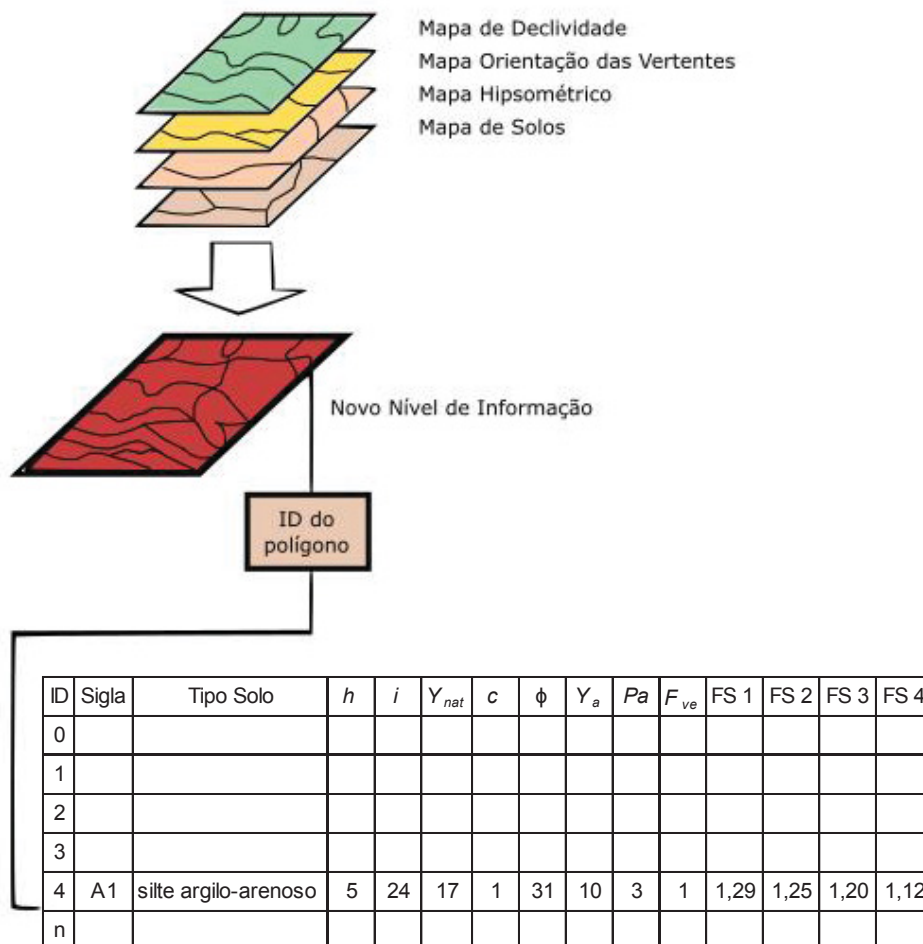
Por falta de dados adequados, geralmente o efeito de tirante das raízes no modelo acima não é levado em conta nas análises de Fator de Segurança. Isto implica em menor resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, o Fator de Segurança calculado pela equação sem o efeito de tirantes das raízes apresentará índices menores.

#### 4.6.1 Mapas de Fatores de Segurança

Os mapas de Fator de Segurança foram gerados a partir da base topográfica em escala 1:50.000 da área total, e na escala 1:1.000 na faixa de domínio da rodovia, que compreende 200 m de ambos os lados da rodovia e se estende por 17 quilômetros.

Os dados obtidos com o cálculo do Fator de Segurança foram espacializados através de um SIG, com a criação de um banco de dados, utilizando-se o *software* ArcGis 10.2 (ESRI, 2012), que armazena os dados em uma estrutura em camadas (Figura 17), por meio da sobreposição de informações obtidas dos mapas temáticos (declividade, orientação de vertentes, elevação e solos).

FIGURA 17 - ESQUEMA DO USO DO SIG PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA.



FONTE: modificado de Kozciak (2005).

A espacialização do Fator de Segurança é feita através da ferramenta “*Raster Calculator*” que adequa a fórmula do fator de segurança para a linguagem de álgebras de mapas, conforme exemplificação abaixo:

$$FS = \left( \frac{C_s + (Y_{nat} - H_w * Y_a) * espessura * \cos(\text{inclinação} * (\pi / 180.0)) + \sigma_a * \cos(\text{inclinação} * (\pi / 180.0)) * \tan(\phi * (\pi / 180.0))}{(espessura * Y_{nat} + \sigma_a) * \sin(\text{inclinação} * (\pi / 180.0)) + \sigma_{ve}} \right)$$

A base de dados para o cálculo do Fator de Segurança engloba: o peso específico ( $Y_{nat}$ ) médio dos solos da região; o menor valor de coesão ( $c$ ) e de ângulo de atrito ( $\phi$ ) calculados nos 5 metros iniciais ( $h$ ) dos perfis de sondagens, definido para cada bacia; o peso das árvores ( $Pa$ ) e a pressão do vento ( $F_{ve}$ ) obtidos de referências bibliográficas de estudos na Serra do Mar; o peso específico da água ( $Y_a$ ); e a inclinação da vertente ( $i$ ) obtida pelo MDE. Na Tabela 9 é apresentado os dados de entrada para o cálculo do Fator de Segurança dos taludes em solo.

TABELA 9 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA.

| Bacia | Tipo Solo            | $h$<br>(m) | $Y_{nat}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $c$<br>(Kpa) | $\phi$<br>(°) | $Y_a$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $Pa$<br>(kPa) | $F_{ve}$<br>(kgf) | $i$<br>(°) | FS 1 | FS 2 | FS 3 | FS 4 |
|-------|----------------------|------------|-----------------------------------|--------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------|------------|------|------|------|------|
| A1    | silte argilo-arenoso | 5          | 17                                | 1            | 31            | 10                            | 3             | 1                 | 28         | 1,20 | 1,17 | 1,14 | 1,09 |
| A2    | argila areno-siltosa | 5          | 17                                | 1            | 24            | 10                            | 3             | 1                 | 30         | 1,52 | 1,46 | 1,37 | 1,21 |
| A3    | areia argilo-siltosa | 5          | 17                                | 1            | 26            | 10                            | 3             | 1                 | 35         | 1,75 | 1,66 | 1,53 | 1,32 |

FONTE: a autora (2018).

A partir das variáveis que influenciam na estabilidade dos taludes, foram determinados quatro cenários para cálculo do Fator de Segurança em taludes de solos: seco (FS 1), 20% (FS 2), 50% (FS 3) e 100% de saturação (FS 4), a fim de melhor caracterizar a estabilidade das vertentes frente a diferentes situações de umidade. Foram elaborados mapas com o fator de segurança para os taludes presentes na faixa de domínio da rodovia para cada um dos cenários.

As classes de Fator de Segurança foram definidas como baixo (< 1,0), moderado (1,0 – 1,5), alto (1,5 – 2,0) e muito alto (> 2,0), sendo correlacionados com a suscetibilidade da área a escorregamentos, conforme a Tabela 10:

TABELA 10 - CLASSES DE FATOR DE SEGURANÇA.

| Fator de Segurança |            | Suscetibilidade a Escorregamentos |
|--------------------|------------|-----------------------------------|
| Índice             | Classe     |                                   |
| < 1,0              | baixo      | muito alta                        |
| 1,0 - 1,5          | moderado   | alta                              |
| 1,5 - 2,0          | alto       | moderada                          |
| > 2,0              | muito alto | baixa                             |

FONTE: a autora (2018).

#### 4.7 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS

Os taludes rochosos são potencialmente instáveis, mesmo quando não estão alterados pelo intemperismo. Pelo fato de serem susceptíveis a escorregamentos e quedas de blocos, podem causar interrupção de tráfego nas rodovias e até mesmo acidentes. Para avaliar a estabilidade desses taludes é fundamental conhecer a geometria dos blocos rochosos, que depende do padrão da orientação espacial das descontinuidades presentes no maciço rochoso, bem como do tipo de rocha e da direção das seções dos taludes.

A análise da estabilidade de maciços rochosos baseia-se no levantamento de dados estruturais, como fraturas, xistosidade, acamamento, foliação etc., e a representação desses dados através da projeção estereográfica, permite a visualização espacial dos diversos planos e sua relação com a face livre do talude, uma vez que a ruptura somente poderá ocorrer como consequência de movimento em direção à face livre do talude. Os movimentos de blocos em maciços rochosos podem ser divididos em escorregamentos planares, escorregamentos em cunha e tombamentos de blocos (*toppling*).

Os escorregamentos planares ocorrem ao longo de superfícies paralelas ou subparalelas que estejam aflorantes e inclinadas na direção da face livre do talude a um ângulo superior que a do ângulo de fricção daquele plano e a um ângulo menor que o da inclinação da superfície livre do talude (Fiori e Carmignani, 2015).

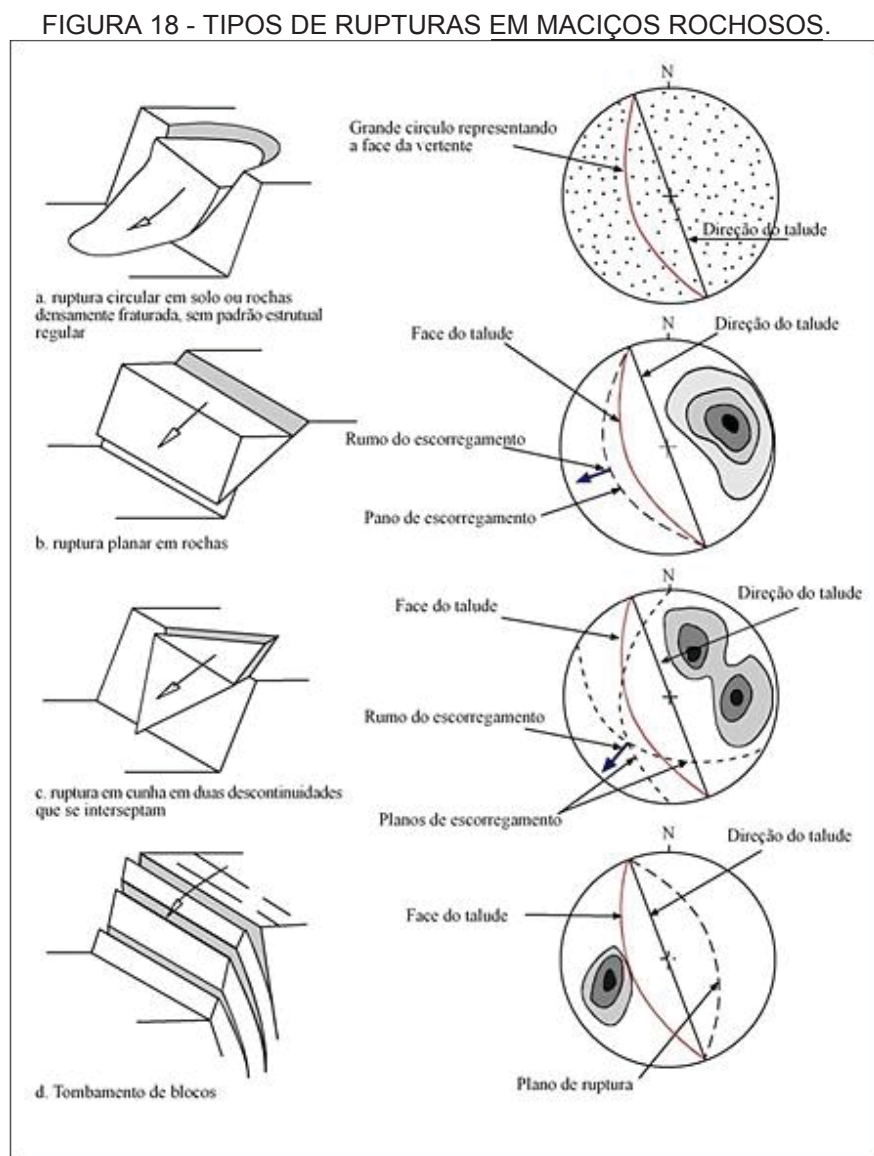
O deslizamento ocorrerá na direção do mergulho, admitindo-se uma variação de 20° para mais ou para menos em torno dessa direção. A movimentação de blocos pode variar em função das dimensões das estruturas planares, desde juntas menores que controlam deslizamentos de dezenas de metros cúbicos de rocha a grandes deslizamentos translacionais, que envolvem dezenas de milhares de metros cúbicos.

Os escorregamentos em cunha decorrem da movimentação ao longo da intersecção de dois planos, sendo fundamental que a linha de intersecção aflore na superfície livre do talude, a uma inclinação superior ao ângulo de fricção e com uma inclinação inferior ao ângulo de mergulho do talude (Fiori e Carmignani, 2015). Esta linha de intersecção representa a direção do deslizamento e pode envolver mais de dois planos de ruptura.

O tombamento de blocos (*toppling*) depende da presença de planos estruturais bem definidos e ocorre quando blocos individuais, ou um conjunto de

blocos tombam sobre a face livre da vertente. As condições mais favoráveis aparecem quando duas famílias de juntas se entrecruzam, uma delas mergulhando a altos ângulos contra a face livre da vertente, e outra mergulhando no mesmo sentido da vertente, porém a baixos ângulos (Fiori e Carmignani, 2015).

Na Figura 18 são apresentados os tipos de rupturas em maciços rochosos e as suas representações estereográficas, indicando o modelo estrutural que rege o comportamento mecânico do maciço.



FONTE: modificado de Fiori e Carmignani (2015).

Taludes rochosos são considerados taludes finitos, contendo altura, base e topo definidos, tendo a sua estabilidade dependente da resistência ao cisalhamento ao longo do plano em que ocorrerá o escorregamento, fundamentado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb, se tem que:



$$\tau = c + \sigma'_n \operatorname{tg} \phi \quad (12)$$

Onde,

$\tau$  = resistência ao cisalhamento

$c$  = coesão

$\sigma'_n$  = tensão normal efetiva

$\phi$  = ângulo de atrito interno

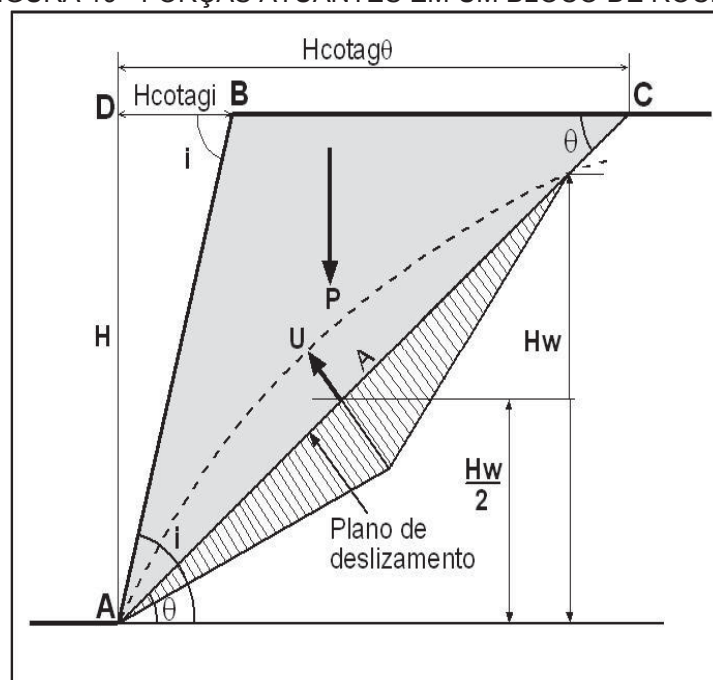
Quando a tensão de cisalhamento ultrapassa a resistência dos materiais ou esta diminui, os materiais perdem sua estabilidade e ocorre o deslocamento, gerando os movimentos de massa (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Segundo Fiori (2016) considerando-se as forças atuantes em um bloco de rocha, tem-se:  $i$  o ângulo de inclinação média do talude,  $\theta$  o ângulo de inclinação da superfície de escorregamento,  $A$  a área dessa superfície de escorregamento e  $P$  o peso do bloco apoiado na superfície. Decompondo-se as forças atuantes no bloco obtém-se:

$$\sigma_n = \frac{P \cos \theta}{A} \quad (13)$$

$$\sigma_s = \frac{P \operatorname{sen} \theta}{A} \quad (14)$$

FIGURA 19 - FORÇAS ATUANTES EM UM BLOCO DE ROCHA.



FONTE: Fiori (2016).

Tem-se que a resistência ao cisalhamento é dada por:

$$\tau = \frac{c + P \cos \theta \tan \phi}{A} \quad (15)$$

$$\tau A = cA + P \cos \theta \tan \phi \quad (16)$$

Sendo assim, o fator de segurança é definido como a razão entre as forças resistentes e as forças mobilizantes:

$$F_s = \frac{cA + P \cos \theta \tan \phi}{P \sin \theta} \quad (17)$$

Considerando taludes sem fenda de tração e com água, tem-se:

- a área A do plano de escorregamento:

$$A = \frac{H_w}{\sin \theta} \quad (18)$$

- O peso do bloco instável, obtido pela multiplicação do volume pelo peso específico do material:

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\cotg \theta - \cotg i) \quad (19)$$

- A força neutra U da água atuante na base do bloco, dada pela área baseada na altura correspondente a pressão máxima da água sobre a descontinuidade, multiplicada pelo peso específico da água:

$$U = \frac{1}{4} \gamma_a H_w^2 \operatorname{cosec} \theta \quad (20)$$

Portanto, o Fator de Segurança é dado por:

$$F_s = \frac{cA + (P \cos \theta - U) \tan \phi}{P \sin \theta} \quad (21)$$

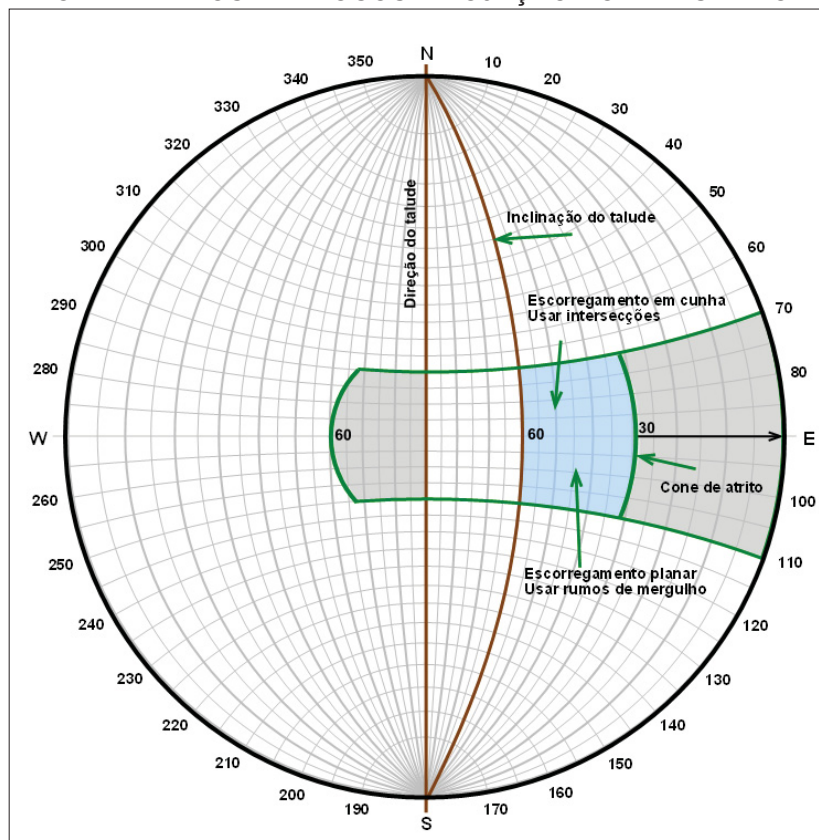
Neste cálculo considerou-se um ângulo de atrito de 30°, normalmente adotado para rochas cristalinas, a exemplo de gnaisses, granitos e migmatitos, e da boa qualidade dos maciços rochosos analisados. A coesão e o peso específico dos maciços utilizados para o cálculo foi, respectivamente, de 40 kPa e 27 kN/m<sup>3</sup>, que são valores médios empregados em rochas cristalinas. O Fator de Segurança para rupturas em cunha foi calculado com o auxílio do programa Wedge Failure Analysis (KROEGER, 1999), devido a análise ser mais complexa do ponto de vista matemático,

pois considera a variação da coesão e da pressão da água atuantes ao longo dos planos de escorregamento, permitindo assim uma avaliação mais precisa do Fator de Segurança.

Para a análise da estabilidade de taludes envolvendo blocos de rocha foi elaborado um diagrama de interpretação contendo as direções da face livre do talude e dos planos de descontinuidades representados ciclograficamente, e o cone de atrito dimensionado em função do ângulo de fricção, da face livre do talude e de uma variação de  $20^\circ$  para mais ou para menos em torno do rumo do plano.

No diagrama de interpretação da Figura 20, as áreas em cinza representam áreas de instabilidades para tombamentos de blocos e aquelas em azul, as áreas com possibilidade de escorregamentos planares e em cunha.

FIGURA 20 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA ESCORREGAMENTOS PLANARES, EM CUNHA E TOMBAMENTOS DE BLOCOS. PROJEÇÃO NO HEMISFÉRIO INFERIOR.



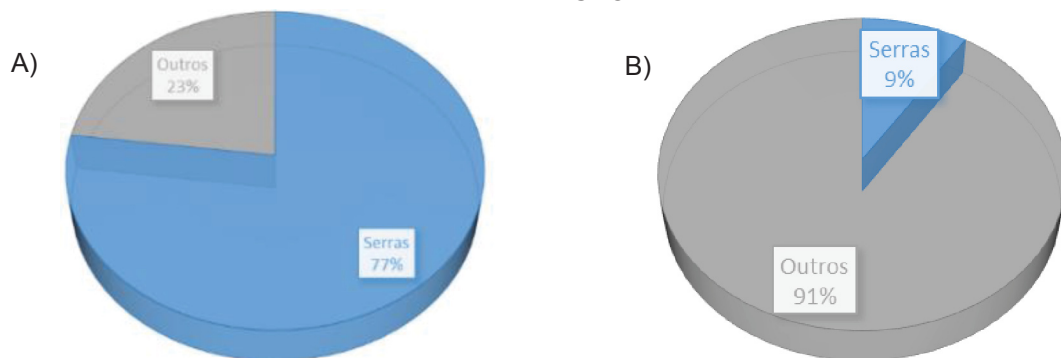
FONTE: modificado de Fiori (2016).

Esta análise de estabilidade é feita em taludes que tenha extensão suficiente para que se possa tomar as atitudes das estruturas aflorantes. Sendo assim, foram analisados somente 12 taludes ao longo deste trecho da BR-116 que compreende da Serra do Azeite.

## 5 HISTÓRICO DE EVENTOS DE INSTABILIZAÇÃO NA REGIÃO

Na Serra do Azeite há um histórico de instabilização, processos erosivos, ocorrência de trincas e/ou desprendimento de blocos e ainda áreas já estabilizadas. Segundo levantamento realizado pela Autopista Régis Bittencourt (APRB, 2015), na região que compreende a Serra Pelada, localizada no município de Barra do Turvo/SP, e a Serra do Azeite, em Cajati/SP, 23% dos dados analisados de instabilização encontram-se na região das serras, enquanto que sua extensão corresponde a menos de 10% do trecho da BR-116 entre Curitiba e São Paulo. Em relação ao número de ocorrências proporcionalmente à extensão, 77% das mesmas ocorrem na área correspondentes às serras (Figura 21).

FIGURA 21 - (A) PERCENTUAL DE EXTENSÃO DAS SERRAS DENTRO DO TRECHO ESTUDADO, (B) PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA NAS SERRAS PROPORCIONAL À SUA EXTENSÃO.

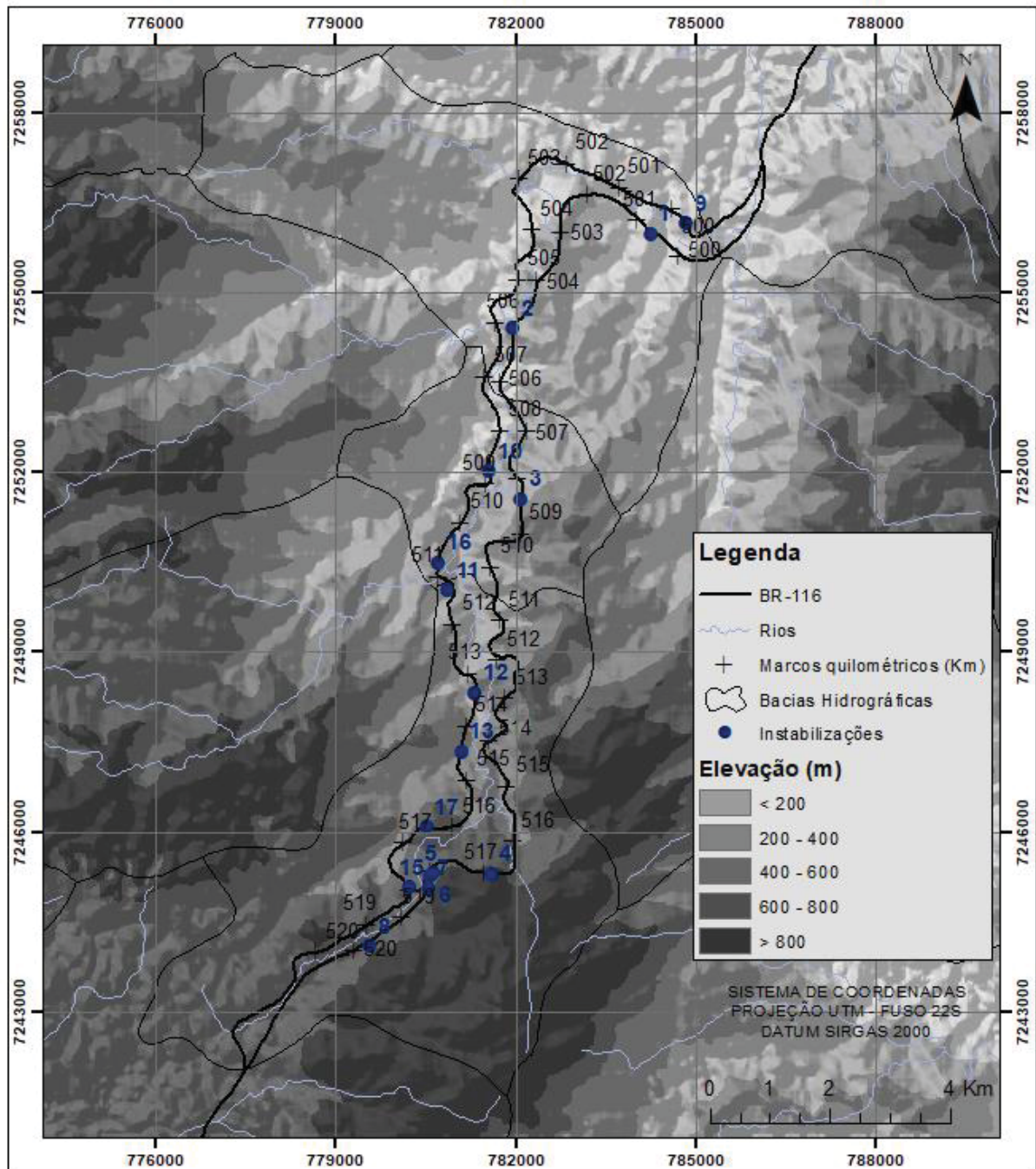


FONTE: APRB (2015).

Em 2013, a APRB analisou as informações do monitoramento de contenções e terraplenos de 284 pontos vistoriados, e verificou que 21% desses locais encontram-se nos quilômetros pertencentes às serras. A concessionária realizou uma análise proporcional do número de ocorrências em relação à extensão para os pontos cadastrados nesses relatórios, e constatou que há uma predominância de locais instáveis pertencentes à serra.

Através de imagens de satélites foram identificadas cicatrizes de escorregamentos e processos erosivos, e posteriormente realizada a validação dos mesmos com observações feitas em campo e discussões complementares com professores. Na Figura 22 é possível observar a localização das ocorrências dessas instabilizações.

FIGURA 22 - MAPA COM A LOCALIZAÇÃO DAS OCORRÊNCIAS DE INSTABILIZAÇÕES.



FONTE: a autora (2018).

Para esse levantamento foram observadas feições diagnósticas de movimentos de massa como a presença de blocos e matacões no sopé das vertentes, fendas de tração no topo dos taludes, blocos deslocados em massa de solo e cicatrizes de escorregamentos. Em conjunto com o mapeamento das cicatrizes, realizou-se o inventário de instabilizações relatadas pela concessionária, conforme dados das ocorrências (Tabela 11).



TABELA 11 - HISTÓRICO DE INSTABILIZAÇÕES NA ÁREA DE ESTUDO.

| Ponto | Local         | Eventos Instabilizadores   |
|-------|---------------|--|
| 1     | Km 500+500 PN | trinca em corte de talude  |
| 2     | Km 505+100 PN | solo residual com indício de movimentos de massa                 |
| 3     | Km 508+500 PN | retaludamento no local devido a escorregamento antigo            |
| 4     | Km 516+800 PN | talude rochoso com histórico de escorregamento e queda de blocos |
| 5     | Km 518+000 PN | erosão no canal de drenagem                                      |
| 6     | Km 518+100 PN | cicatriz de escorregamento em solo                               |
| 7     | Km 518+500 PN | cicatriz de escorregamento em solo                               |
| 8     | Km 519+500 PN | erosão em talude de corte  |
| 9     | Km 499+700 PS | escorregamento em talude de corte                                |
| 10    | Km 508+700 PS | ruptura em aterro – viaduto                                      |
| 11    | Km 511+300 PS | erosão e indícios de movimentação no talude                      |
| 12    | Km 513+500 PS | ruptura em corte de talude                                       |
| 13    | Km 514+500 PS | ruptura em aterro relatado pela empresa                          |
| 14    | Km 515+900 PS | escorregamento em aterro   |
| 15    | Km 517+900 PS | ruptura em aterro  |
| 16    | Km 510+800 PS | cicatriz de movimento de massa                                   |
| 17    | Km 516+000 PS | local com histórico de movimentos de massa já estabilizados      |

FONTE: a autora (2018).

Foram identificadas cicatrizes de escorregamento translacional (Figura 23) de extensão de até 30 metros em solos residuais e com direção do movimento paralela as descontinuidades dos maciços rochosos, e muitas vezes essas cicatrizes ocorrem acima dos taludes rochosos.

FIGURA 23 - CICATRIZ DE ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL EM SOLO NO KM 518+500. A) VISTA DA MARGEM DA RODOVIA NORTE. B) VISTA DO OUTRO LADO DA RODOVIA SUL.



FONTE: a autora (2018).

Ocorre também material coluvionar movimentado em direção ao sopé do talude, com extensões de até 15 metros, apresentando blocos de rocha e galhos retorcidos em meio ao material escorregado (Figura 24).

FIGURA 24 - CICATRIZ EM MATERIAL COLUVIONAR NO KM 518+100.



FONTE: a autora (2018).

O histórico de imagens das ocorrências de instabilizações na região da Serra do Azeite foi obtido através do software Google Earth, disponíveis para visualização em dois períodos, 4 de junho de 2016 e 8 de novembro de 2013.

Os dados das ocorrências de instabilizações são provenientes do relatório de monitoramento de contenções e terra-plenos do ano de 2013 e 2015/2016, realizados pela concessionária Arteris (APRB). A seguir é mostrado o histórico de imagens para cada uma das ocorrências relatadas pela concessionária.



- 1- Km 500+500 PN: trinca em corte de talude, com indício de evento de movimento de massa.

FIGURA 25 - IMAGENS DO KM 500+500.



FONTE: Google Earth (2018).

- 2 - Km 505+100 PN: solo residual com indício de movimentos de massa localizado acima do talude rochoso.

FIGURA 26 - IMAGENS DO KM 505+100 PN.



FONTE: Google Earth (2018).



- 3 - Km 508+500 PN: retaludamento no local devido a escorregamento antigo.

FIGURA 27 - IMAGENS DO KM 508+500 PN.



FONTE: Google Earth (2018).

- 4 - Km 516+800 PN: talude rochoso com histórico de escorregamento e queda de blocos.

FIGURA 28 - IMAGENS DO KM 516+800 PN.



FONTE: Google Earth (2018).



- 5 - Km 518+000 PN: erosão no canal de drenagem.

FIGURA 29 - IMAGENS DO KM 518+00 PN.



FONTE: Google Earth (2018).

- 6 – Km 518+100 PN: cicatriz de escorregamento em solo.

FIGURA 30 - IMAGENS DO KM 518+100 PN.



FONTE: Google Earth (2018).



- 7 – Km 518+500 PN: cicatriz de escorregamento translacional em solo localizado acima do talude rochoso.

FIGURA 31 - IMAGENS DO KM 518+500 PN.



FONTE: Google Earth (2018).

- 8 – Km 519+500 PN: erosão em talude de corte.

FIGURA 32 - IMAGENS DO KM 519+500 PN.



FONTE: Google Earth (2018).



- 9 – Km 499+700 PS: escorregamento translacional em talude de corte.

FIGURA 33 - IMAGENS DO KM 499+700 PS.



FONTE: Google Earth (2018).

- 10 – Km 508+700 PS: ruptura em aterro – viaduto.

FIGURA 34 - IMAGENS DO KM 508+700 PS.



FONTE: Google Earth (2018).



- 11 – Km 511+300 PS: erosão e indícios de movimentação no talude.

FIGURA 35 - IMAGENS DO KM 511+300 PS.



FONTE: Google Earth (2018).

- 12 – Km 513+500 PS: ruptura em corte de talude.

FIGURA 36 - IMAGENS DO KM 513+500 PS.



FONTE: Google Earth (2018).



- 13 – Km 514+500 PS: ruptura em aterro.

FIGURA 37 - IMAGENS DO KM 514+500 PS.



FONTE: Google Earth (2018).

- 14 – Km 515+900 PS: escorregamento em aterro.

FIGURA 38 - IMAGENS DO KM 515+900 PS.



FONTE: Google Earth (2018).



- 15 – Km 517+900 PS: ruptura em aterro.

FIGURA 39 - IMAGENS DO KM 517+900 PS.



FONTE: Google Earth (2018).

- 16 – Km 510+800 PS: cicatriz de movimento de massa.

FIGURA 40 - IMAGENS DO KM 510+800 PS.



FONTE: Google Earth (2018).



- 17 – Km 516 - 516+900 PS: local com histórico de movimentos de massa já estabilizados pela empresa.

FIGURA 41 - IMAGENS DO KM 516 - 516+900 PS.



FONTE: Google Earth (2018).

A partir do histórico de imagens observou-se que alguns pontos apresentam cicatrizes de movimentos de massa, e em outros só é possível observar o retaludamento realizado pela concessionária, não apresentando indícios de eventos instabilizadores. Os locais que apresentaram as cicatrizes de escorregamentos foram comparados com o mapa de suscetibilidade a escorregamento e com o índice do fator de segurança, que serão discutidos no próximo capítulo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos subitens deste capítulo é discutido os resultados obtidos com esta pesquisa, e, também, apresentado na forma de artigo científico, conforme orientação do programa de pós-graduação. Os resultados foram divididos em dois temas: um com foco no método de determinação da suscetibilidade a escorregamentos em taludes de solo, e o outro na avaliação de escorregamentos em taludes rochosos.

### 6.1 SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM TALUDES DE SOLO

A suscetibilidade a escorregamentos das vertentes está relacionada principalmente ao regime pluviométrico e tipo de solo. Porém, outro fator preponderante de grande importância para a deflagração destes movimentos são os atributos topográficos do relevo, como a declividade, o plano de curvatura e a hipsometria da região.

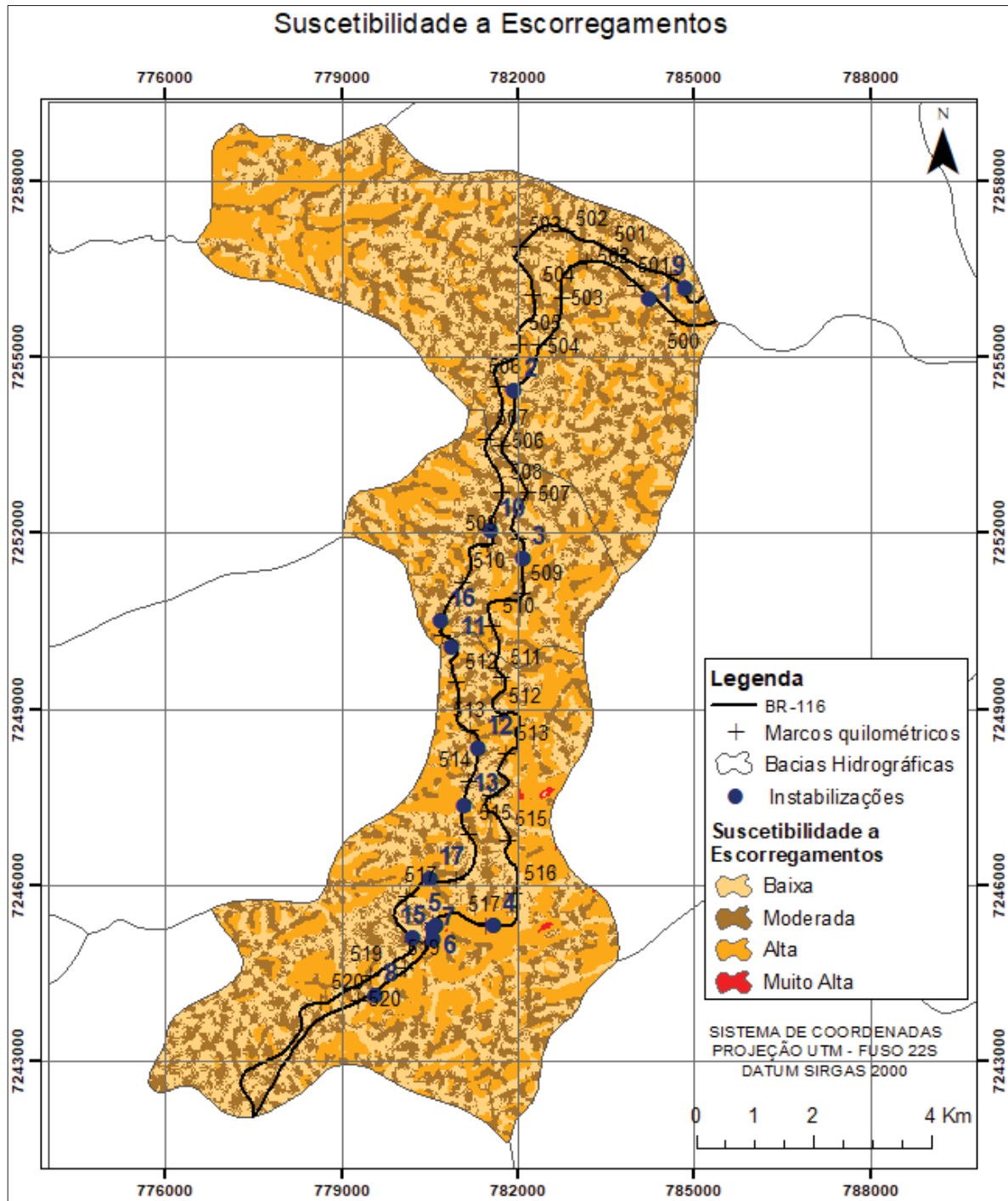
As classes de suscetibilidade são influenciadas prioritariamente pela declividade, sendo localizadas as áreas de muito alta suscetibilidade em declividades maior que 20°, e áreas com alta propensão a escorregamentos em declividades entre 8° e 20°. As classes moderada e baixa suscetibilidade englobam vertentes com declividades menores que 8°, apresentando menor suscetibilidade as encostas convergentes e retilíneas, do que as que possuem planos divergentes que retêm maior fluxo de água.

Na Serra do Azeite, as classes alta e muito alta suscetibilidade a escorregamentos podem ocorrer tanto em vertentes divergentes, como em convergentes e retilíneas. A Figura 42 mostra o mapa de suscetibilidade a escorregamentos para a área de contribuição hidrográfica, e para a faixa de domínio da rodovia os mapas encontram-se no Apêndice 4.

Verificou-se no mapa de suscetibilidade a escorregamentos para a área das bacias hidrográficas, que as maiores porcentagens de ocorrências das classes alta e muito alta são na área da bacia a sul do trecho estudado (bacia A3), conforme a Tabela 12.



FIGURA 42 - MAPA DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS.



FONTE: a autora (2018).

TABELA 12 - OCORRÊNCIAS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS.

| Suscetibilidade | Ocorrência na Bacia (%) |       |       |
|-----------------|-------------------------|-------|-------|
|                 | A 1                     | A 2   | A 3   |
| Baixa           | 41,74                   | 38,63 | 36,16 |
| Moderada        | 35,68                   | 31,89 | 30,44 |
| Alta            | 22,58                   | 29,48 | 33,20 |
| Muito Alta      | 0,00                    | 0,00  | 0,20  |

FONTE: a autora (2018).

Localizando as ocorrências de escorregamentos, discutidas na Tabela 3 de eventos de instabilizações na região, no mapa de suscetibilidade a escorregamentos, observa-se que a maior parte das ocorrências estão concentradas na área da bacia a sul da região.

Para a faixa de domínio da rodovia, verificou-se que todo o trecho estudado apresenta porcentagens elevadas de muito alta suscetibilidade (Tabela 13). Isto decorre de o corte dos taludes ao longo da rodovia terem inclinações altas, e na análise topográfica detalhada não foi possível separar as áreas com retaludamento dos taludes, sendo, portanto, não representativo da estabilidade da área.

TABELA 13 - OCORRÊNCIAS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA.

| Suscetibilidade | Ocorrência na Bacia (%) |       |       |
|-----------------|-------------------------|-------|-------|
|                 | A 1                     | A 2   | A 3   |
| Baixa           | 13,87                   | 8,95  | 7,77  |
| Moderada        | 13,34                   | 8,46  | 7,66  |
| Alta            | 33,08                   | 30,17 | 26,19 |
| Muito Alta      | 39,71                   | 52,43 | 58,38 |

FONTE: a autora (2018).

## 6.2 SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM TALUDES ROCHOSOS

Os taludes rochosos apresentam estruturas intrínsecas a sua formação que condicionam o desenvolvimento de planos de fraqueza, e que são suscetíveis a escorregamentos quando a resistência ao cisalhamento é atingida. Para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos realizou-se uma análise da compartimentação estrutural do maciço, mapeando as principais estruturas aflorantes ao longo do talude, como a foliação e as famílias de fraturas presentes nas rochas da Serra do Azeite.

Realizou-se a análise para 12 taludes presentes ao longo da BR-116, determinando-se a suscetibilidade a escorregamentos planares e em cunha. A seguir são listados os taludes analisados, com uma breve descrição litológica e seus respectivos estereogramas dos planos de descontinuidades e diagramas de interpretação.

- **SA-1**

Este talude se localiza no Km 518+300 da Pista Norte da rodovia BR-116, com altura de aproximadamente 18 metros. Apresenta extensa cobertura vegetal e solo residual no topo da vertente. Próximo a este talude observa-se cicatriz de escorregamento translacional, conforme citado anteriormente no capítulo de histórico de instabilizações este local corresponde ao ponto 7. Na Figura 43 é possível observar a extensão do talude e a cicatriz de escorregamento.

FIGURA 43 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-1.



FONTE: Google Earth (2018).

A rocha do ponto SA-1 é um gnaiss cinza escuro, com bandamento gnáissico milimétrico (0,3 - 0,5 mm) a centimétrico (1 - 2 cm) bem desenvolvido e contínuo. Ocorrem veios de quartzo centimétricos paralelos ao bandamento e localmente observa-se uma porção moderadamente alterada de cor castanha e intensa milonitização (Figura 44).

O bandamento gnáissico é definido pelos níveis claros compostos por quartzo e feldspato, e níveis escuros de hornblenda. Paralelamente ao bandamento observa-se foliação milonítica (S<sub>n</sub>) penetrativa, definida pela orientação dos minerais, apresentando direção N70-85E e mergulhando 70° para NW.



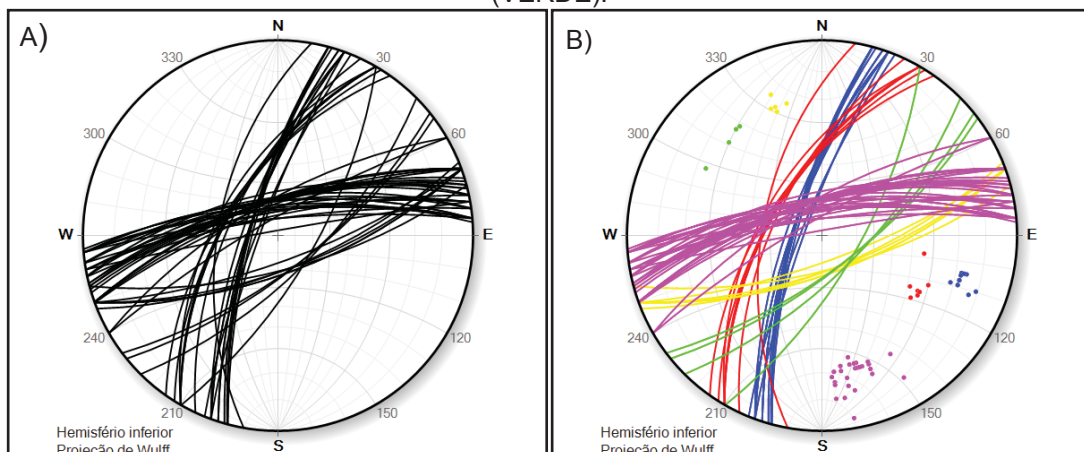
FIGURA 44 - TALUDE SA-1. A) BANDAMENTO GNÁISSICO; B) ROCHA MODERADAMENTE ALTERADA COM FOLIAÇÃO MILONÍTICA.



FONTE: a autora (2018).

Nesse talude há duas famílias de fraturas principais de direção N20E (família 1) e N30E (família 2) com mergulhos de 80° e 60° para NW, respectivamente, e em menor expressão as famílias 3 e 4 de direção N50-70E com mergulhos de 70° para SE (Figura 45).

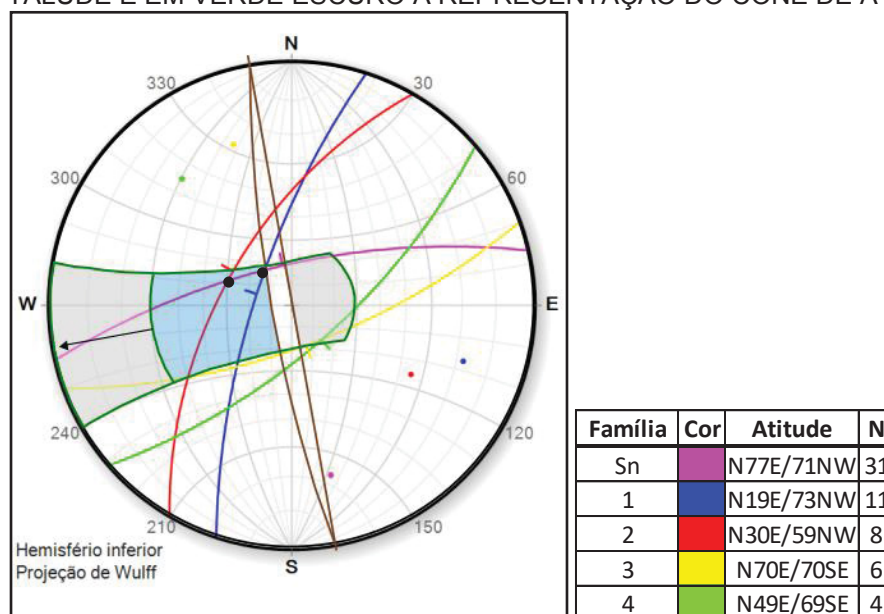
FIGURA 45 - A) ESTEREOGRAMA DOS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-1; B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO), 3 (AMARELO) E 4 (VERDE).



FONTE: a autora (2018).

O diagrama de interpretação para o ponto SA-1 (Figura 46), apresenta a direção do talude, N10W com a face livre voltada para SW, e os planos médios de fraturas e foliação obtidos no afloramento. Observa-se no diagrama que há risco de escorregamento planar, associado a família 1, e possibilidade de cunha associado à intersecção da família 2 com a foliação. Não foi considerada a intersecção da família 1 com a foliação devido ao ponto se situar na borda do cone de atrito, não havendo a formação de cunha. Neste talude não há risco de tombamentos de blocos.

FIGURA 46 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-1. EM MARROM A ATITUDE DO TALUDE E EM VERDE ESCURO A REPRESENTAÇÃO DO CONE DE ATRITO.



FONTE: a autora (2018).

- **SA-2**

O talude está situado no Km 516+800 Pista Norte da BR-116 em ambos os lados da rodovia (Figura 47). Possui 30 metros de altura do lado direito da rodovia e 25 metros no lado esquerdo, apresentando vegetação rasteira ao longo de sua superfície.

Neste talude a rocha é um milonito cinza escuro, muito duro e maciço (Figura 48), com foliação milonítica (Sn) definida pela orientação dos minerais, apresentando direção N70-85E e mergulhando 70° para NW. Observam-se estrias de atrito com inclinações de 20°, indicando sentido de movimentação da falha anti-horário.

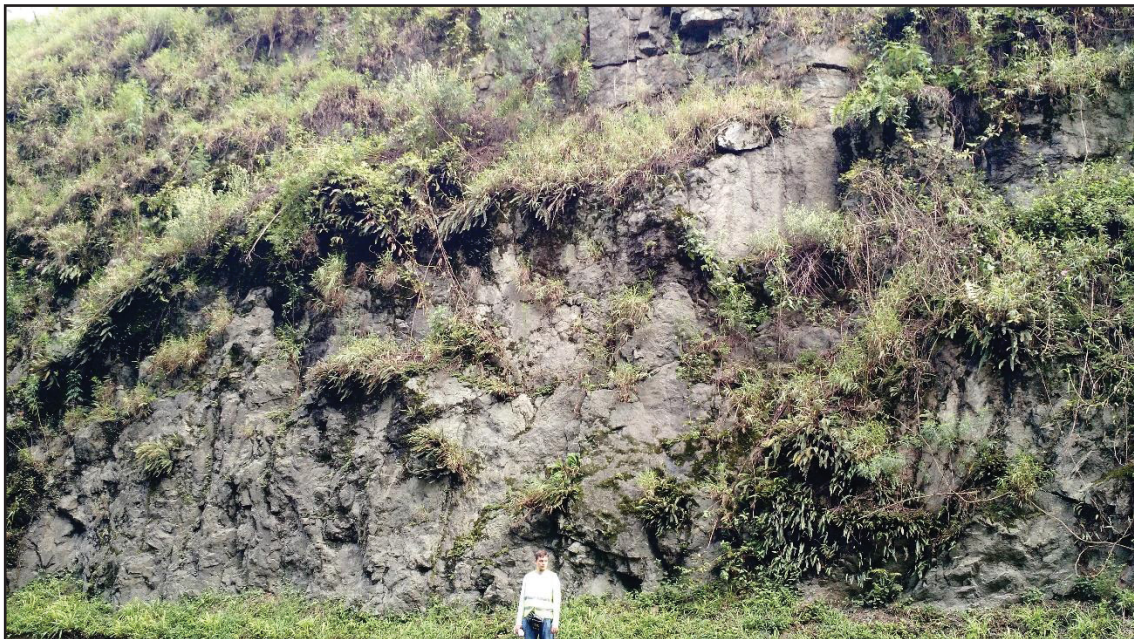


FIGURA 47 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-2.



FONTE: Google Earth (2018).

FIGURA 48 - VISTA DO TALUDE CONSTITUÍDO POR MILONITO.



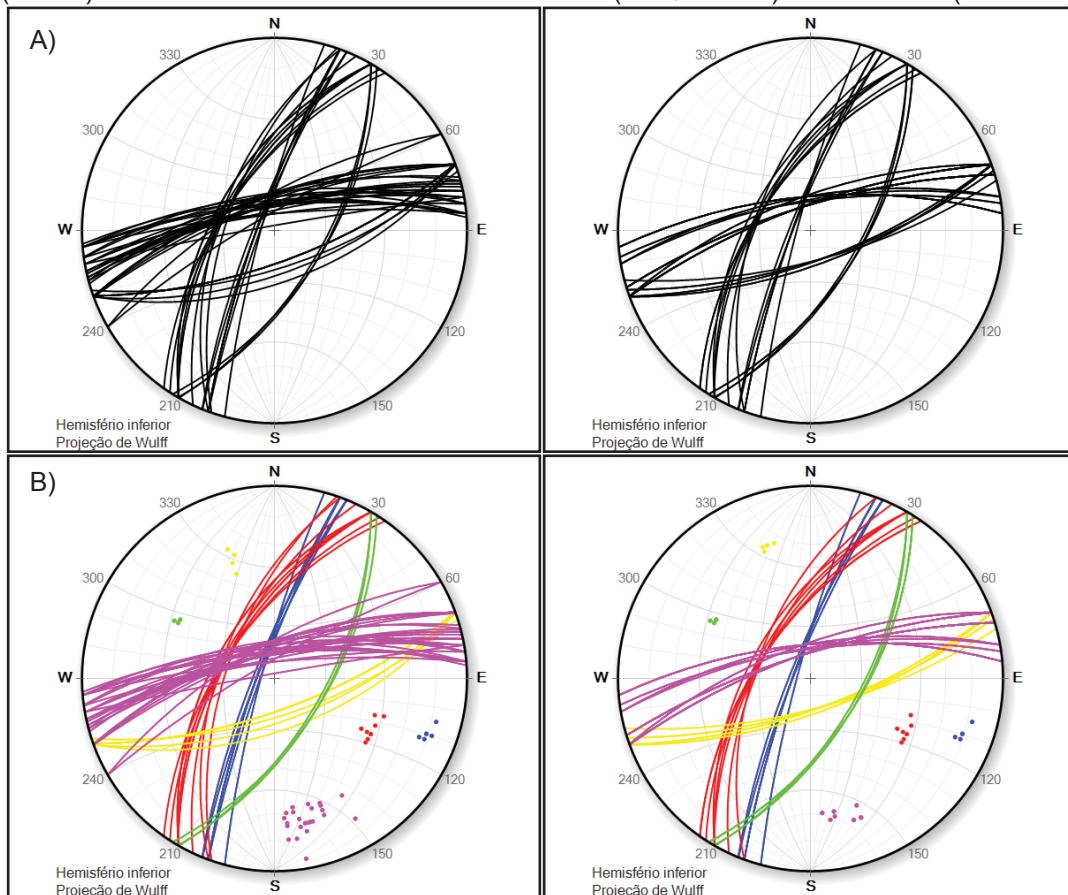
FONTE: a autora (2018).

O ponto SA-2 é composto por dois taludes de direção EW um com a face voltada para norte e outro para sul. Nesses taludes ocorrem uma família de fratura de direção N20E (família 1) com mergulhos de 80° para NW e outra de direção N30E (família 2) mergulhando 60° para NW.



Ocorre ainda duas famílias de fraturas menos expressivas ao longo dos taludes, de direção N30-70E mergulhando 60° para SE. A Figura 49 apresenta os estereogramas com as famílias de fraturas e foliação para cada talude deste ponto.

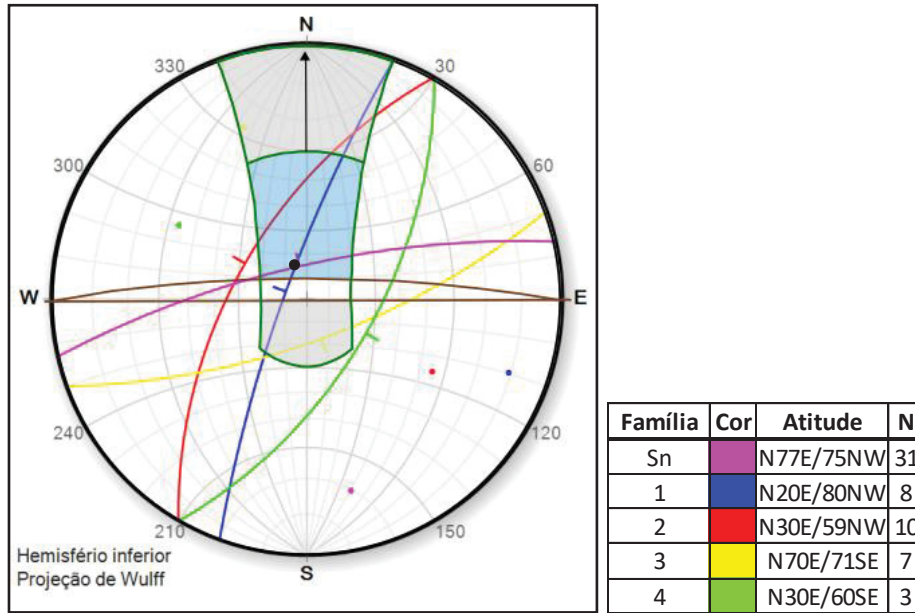
FIGURA 49 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA OS TALUDES COM FACE VOLTADA PARA NORTE (ESQUERDA) E FACE VOLTADA PARA SUL (DIREITA); B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO), 3 (AMARELO), 4 (VERDE) E FOLIAÇÃO (ROSA) DOS TALUDES VOLTADO PARA NORTE (ESQUERDA) E PARA SUL (DIREITA).



FONTE: a autora (2018).

Para a análise de estabilidade foi realizado um diagrama de interpretação para cada face do talude, contendo os planos médios das fraturas e foliação levantadas em cada face. Observa-se que para o talude com face livre voltada para norte há possibilidade de escorregamento planar associado à foliação (Sn) e escorregamento em cunha na intersecção da família 1 com a foliação (Figura 50).

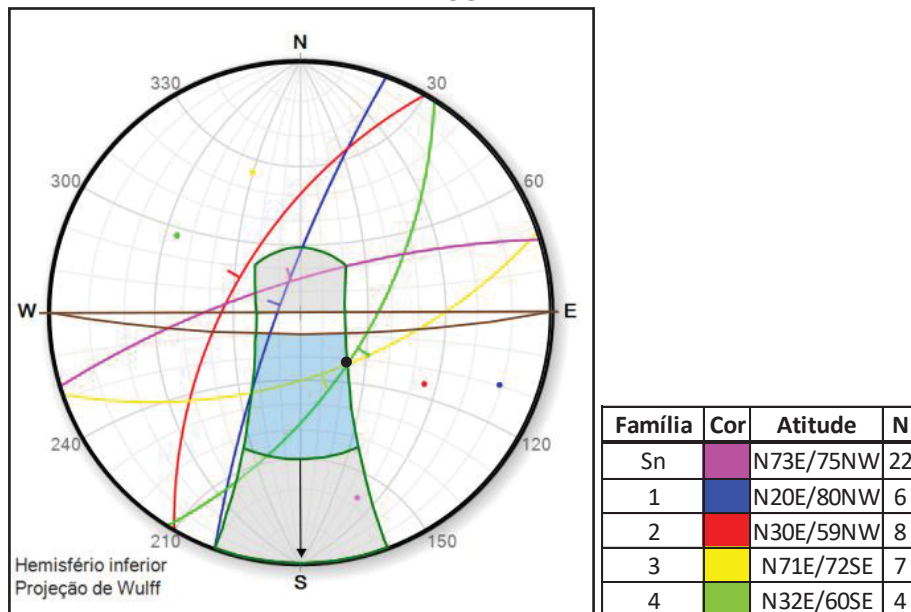
FIGURA 50 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE COM FACE VOLTADA PARA O NORTE.



FONTE: a autora (2018).

Já no talude com a face livre voltada para sul, há risco de deslizamento planar associado a família 3 de direção nordeste, e sem possibilidades de cunha, devido a intersecção das famílias 3 e 4 estar na borda do cone de atrito, conforme pode ser observado na Figura 51. Em ambos os taludes não há risco de tombamento de blocos.

FIGURA 51 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE COM FACE VOLTADA PARA O SUL.



FONTE: a autora (2018).

- **SA-4**

Este talude se localiza no Km 514 da Pista Norte da BR-116, apresentando aproximadamente 17 metros de altura. Possui vegetação rasteira dispersa ao longo de sua superfície. A figura 52 mostra a localização do talude na rodovia.

FIGURA 52 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-4.



FONTE: Google Earth (2018).

A rocha neste talude é um gnaiss cinza rosado bem fraturado, com bandamento gnáissico bem definido e contínuo, apresentando espessuras centimétricas (Figura 53). Paralelamente ao bandamento observam-se minerais orientados, definindo a foliação milonítica ( $S_n$ ), com direção N70-80E mergulhando 70° para NW.

FIGURA 53 - TALUDE DE GNAISSE NO PONTO SA-4.

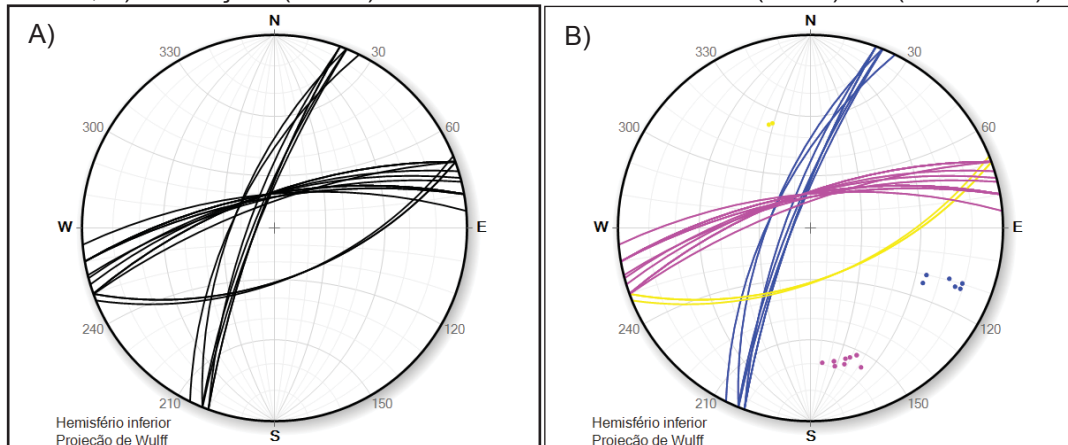


FONTE: a autora (2018).



Ocorrem fraturas pervasivas de direção N20-30E com mergulho 80° para NW (família 1), e ainda em menor expressão a família 3 de direção N70E mergulhando 60° para SE. Na Figura 54 são apresentados os estereogramas com os planos de fraturas e foliação obtidos no afloramento.

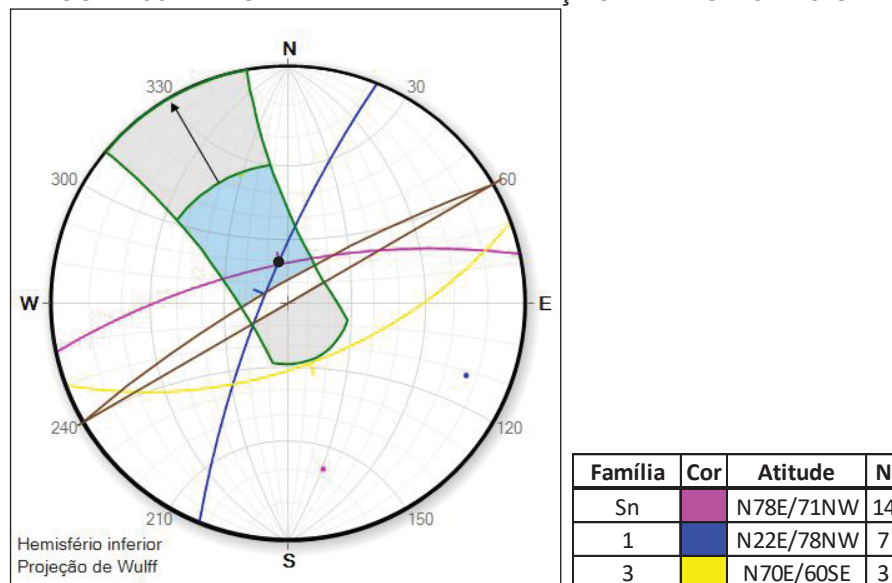
FIGURA 54 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-4; B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL) E 3 (AMARELO).



FONTE: a autora (2018).

O talude do ponto SA-4 tem direção N60E com face livre voltada para NW, sendo representado no diagrama de interpretação, juntamente com os planos médios das discontinuidades presentes no talude (Figura 55).

FIGURA 55 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-4.



FONTE: a autora (2018).

Observa-se no diagrama que há possibilidade de escorregamento em cunha associado à intersecção da foliação com a família 1, e deslizamento planar associado ao plano da foliação. O rumo da família 1 não foi considerado na análise devido a este se situar na borda do diagrama, não havendo escorregamento planar associado a este plano de fratura. Já a queda de blocos não há risco de ocorrer neste talude.

- **SA-5**

O talude está situado no Km 512+600 da Pista Norte da BR-116, estando em ambos os lados da rodovia. Possui aproximadamente 27 metros de altura no talude do lado direito da pista, e 23 metros do lado esquerdo. Na Figura 56 é possível visualizar a posição dos taludes analisados.

FIGURA 56 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-5.



FONTE: Google Earth (2018).

Nesse ponto a rocha é um gnaisse cinza claro, com fraturas pervasivas e bandamento gnáissico centimétrico penetrativo e contínuo. Apresenta foliação milonítica (Sn) paralela ao bandamento, de direção N50-70E mergulhando para SE. Possui veios graníticos rosados paralelos ao bandamento. No local há dois taludes de direção N10W um com a face voltada para SW e outro para NE (Figura 57).



FIGURA 57 - TALUDES NO PONTO SA-5. A) FACE VOLTADA PARA SW, B) FACE VOLTADA PARA NE.

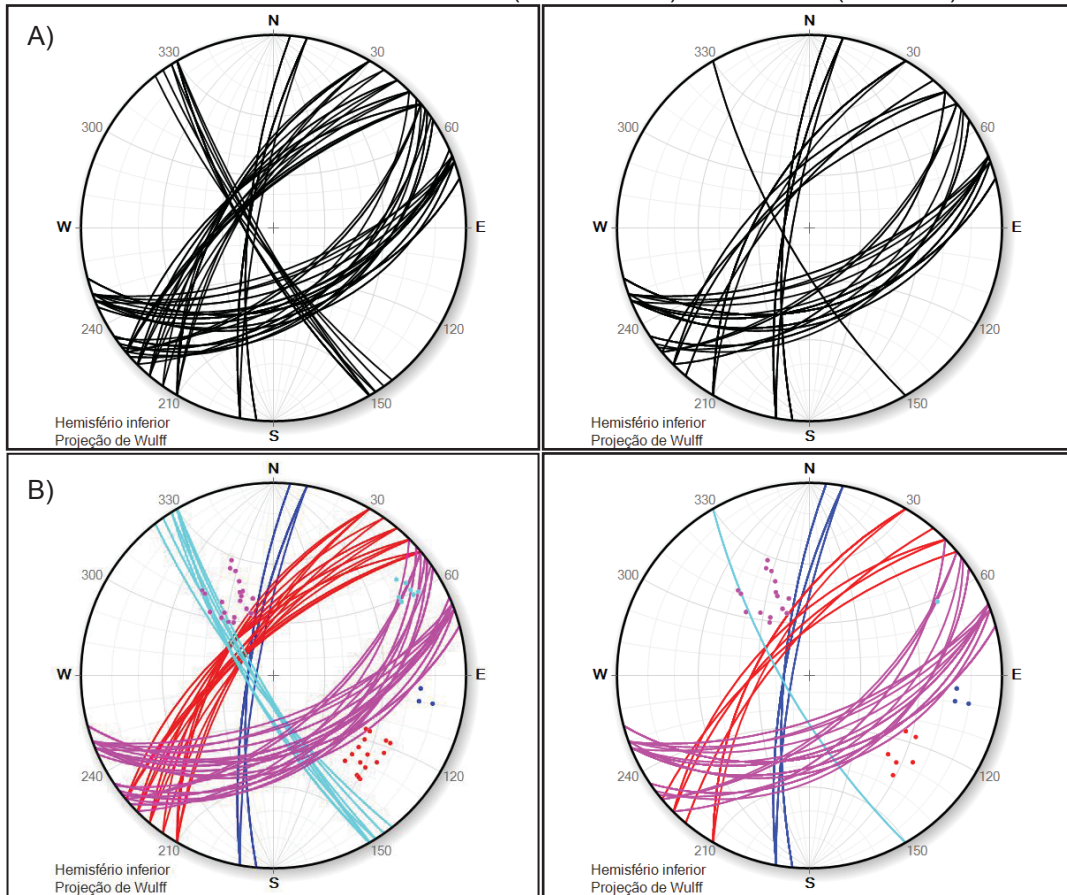


FONTE: a autora (2018).

Em ambas as faces do talude ocorrem duas famílias de fraturas principais com direção N10-40E, mergulhando para NW, e ainda a família 5 de direção N30W com mergulhos para SW. A Figura 58 apresenta os estereogramas com as famílias de fraturas e foliação para cada talude deste ponto.



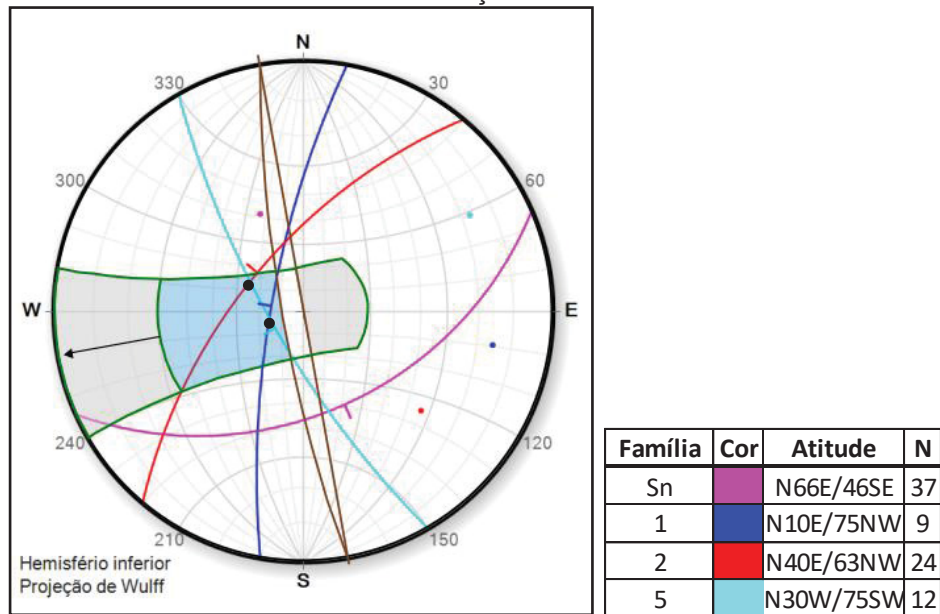
FIGURA 58 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O TALUDE COM FACE VOLTADA PARA SW (ESQUERDA) E FACE VOLTADA PARA NE (DIREITA); B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO), 5 (VERDE) E FOLIAÇÃO (ROSA) DOS TALUDES VOLTADO PARA SW (ESQUERDA) E PARA NE (DIREITA).



FONTE: a autora (2018).

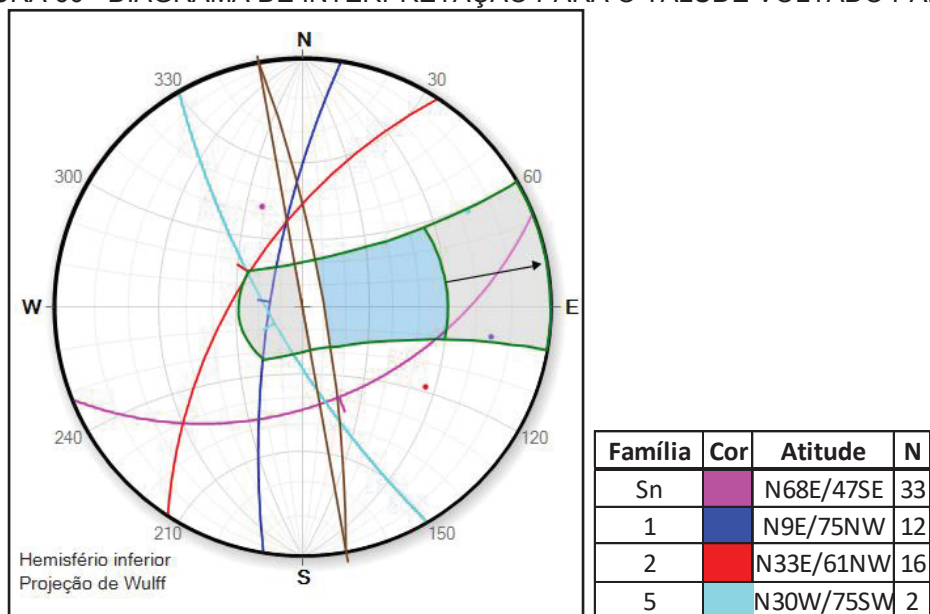
Foi realizado um diagrama de interpretação para cada face do talude, com os planos médios das fraturas e foliação presentes no afloramento. No diagrama para o talude com face livre voltada para SW (Figura 59), observa-se que há possibilidade de escorregamentos planares associados à família 1 e 5, bem como risco de escorregamentos em cunha associados a intersecção da família 5 com as famílias 1 e 2. Já o talude com a face livre voltada para NE (Figura 60), não há risco de escorregamento planar nem em cunha. Para ambos os taludes não há risco de tombamentos de blocos.

FIGURA 59 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA SW.



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 60 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA NE.



FONTE: a autora (2018).

- **SA-6 e SA-7**

Os taludes SA-6 e SA-7 estão localizados no Km 512+400 e 511+800 da BR-116 Pista Norte, respectivamente, apresentando alturas de 24 e 20 metros na mesma ordem. A Figura 61 mostra a localização desses taludes na rodovia.

FIGURA 61 - LOCALIZAÇÃO DOS TALUDES SA-6 E SA-7.



FONTE: Google Earth (2018).

Nesses pontos a rocha é um gnaiss cinza claro, com fraturas pervasivas e bandamento gnáissico milimétrico contínuo. Possuem veios graníticos rosados paralelos ao bandamento, e foliação milonítica ( $S_n$ ), de direção N50-70E mergulhando para SE. São taludes moderadamente alterados intempericamente, apresentando extensa vegetação rasteira ao longo das faces do afloramento (Figura 62).

FIGURA 62 - DETALHE DO TALUDE SA-7.

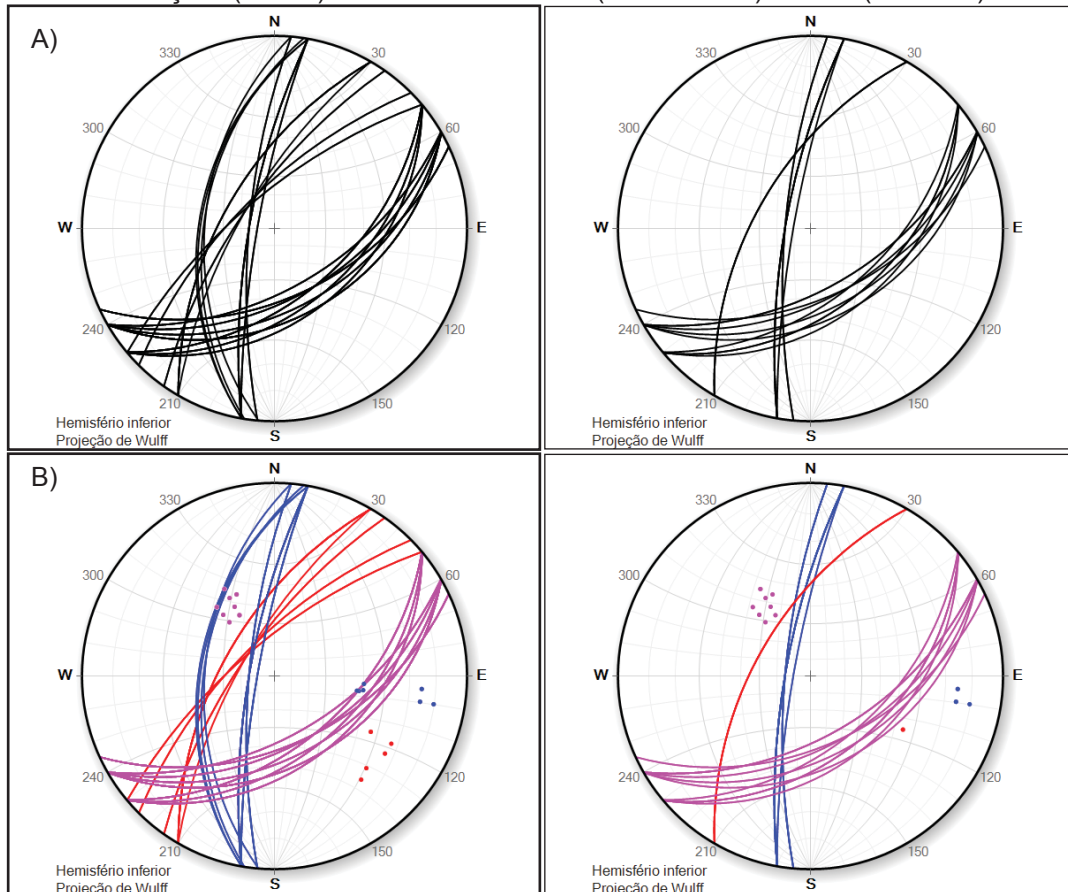


FONTE: a autora (2018).



Ocorrem duas famílias de fraturas em ambos os taludes, com direção N10-40E e mergulhando para NW. Nos estereogramas da Figura 63 é representado os planos de foliação e as famílias de descontinuidades presentes nos taludes dos pontos SA-6 e SA-7.

FIGURA 63 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA OS TALUDES SA-6 (ESQUERDA) E SA-7 (DIREITA); B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 2 (VERMELHO) E FOLIAÇÃO (ROSA) DOS TALUDES SA-6 (ESQUERDA) E SA-7 (DIREITA).



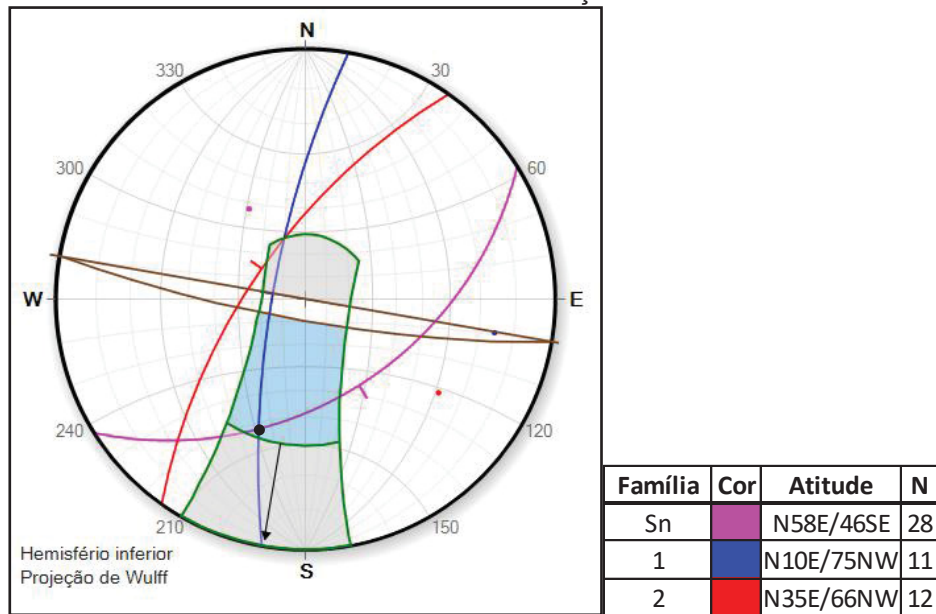
FONTE: a autora (2018).

No diagrama de interpretação para o ponto SA-6 o talude tem direção N80W com face livre voltada para SW (Figura 64), e observa-se que há possibilidade de escorregamento em cunha associado à intersecção da foliação com a família 1. Não há risco de deslizamentos planares nem de tombamentos de blocos ao longo do talude.

Para o ponto SA-7 o talude tem direção N10W com face livre voltada para SW, e no diagrama de interpretação (Figura 65) observa-se que há possibilidade de escorregamento planar associado à família 1, não havendo risco de escorregamento em cunha e nem de tombamento de blocos.

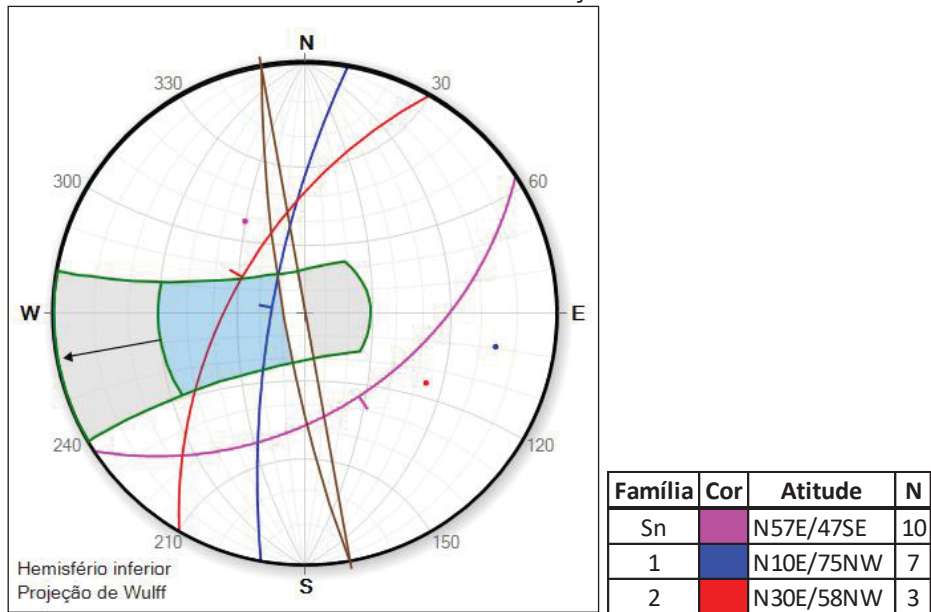


FIGURA 64 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-6.



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 65 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-7.



FONTE: a autora (2018).

- SA-8

Esse talude se localiza no Km 511+500 da rodovia BR-116, apresentando aproximadamente 20 metros de altura, possuindo vegetação rasteira ao longo de toda a sua superfície. A Figura 66 mostra a localização deste talude na rodovia.

FIGURA 66 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-8.



FONTE: Google Earth (2018).

O talude SA-8 é composto por gnaisse cinza escuro com bandamento gnáissico centimétrico, bem definido e contínuo. Apresenta foliação milonítica paralela ao bandamento e que mergulham contra a rodovia, de direção N35-55E para SE, possibilitando a ocorrência de taludes negativos (Figura 67). Observam-se veios pegmatíticos de feldspato alcalino e quartzo paralelos ao bandamento.

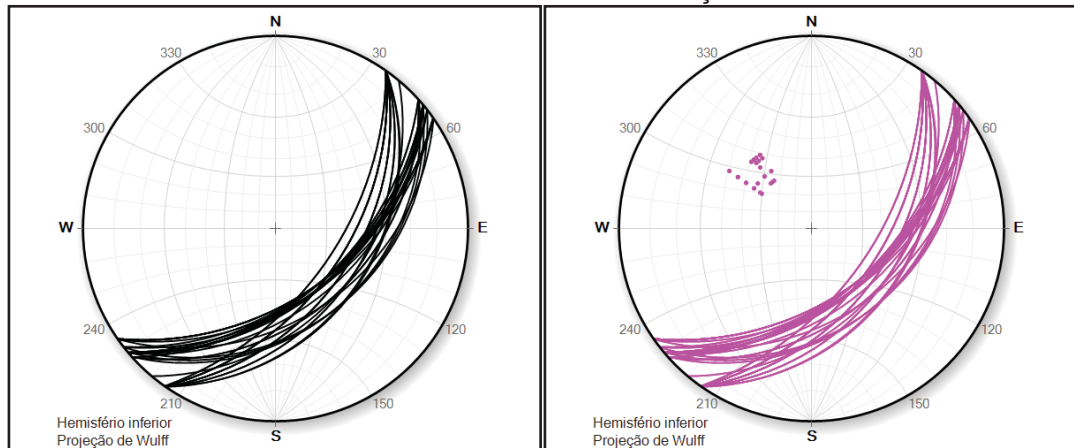
FIGURA 67 - GNAISSE BANDADO NO PONTO SA-8.



FONTE: a autora (2018).

No estereograma representado na Figura 68 pode-se observar a família de descontinuidade bem marcada, com mergulhos para SE, sendo caracterizada como foliação milonítica, definida pela orientação dos minerais.

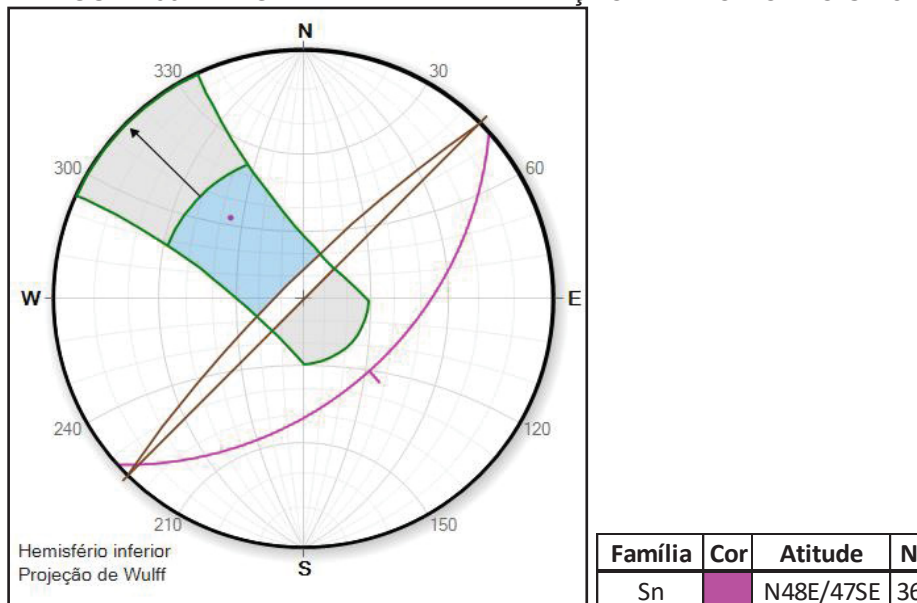
FIGURA 68 - ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE FOLIAÇÃO PARA O PONTO SA-8.



FONTE: a autora (2018).

Este talude tem direção N45E com face livre voltada para NW (Figura 69), e através do diagrama de interpretação observa-se que não há risco de escorregamento em cunha e nem planar, porém há possibilidade de desprendimento de blocos devido a formação de taludes negativos.

FIGURA 69 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-8.



FONTE: a autora (2018).



- **SA-10**

Este talude está situado no Km 509+100 da Pista Norte da BR-116, com 16 metros de altura, apresentando vegetação rasteira ao longo de sua superfície. Na Figura 70 pode ser vista a localização do talude na rodovia.

FIGURA 70 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-10.



FONTE: Google Earth (2018).

No ponto SA-10 a rocha é cinza claro com bandamento gnáissico contínuo (Figura 71) e foliação milonítica paralela ao bandamento, de direção N84E mergulhando 70° para NW. Intercalado ao gnaiss aparece uma camada de metaconglomerado formado por clastos de granitoide e quartzito.

FIGURA 71 - VISTA DO TALUDE SA-10.

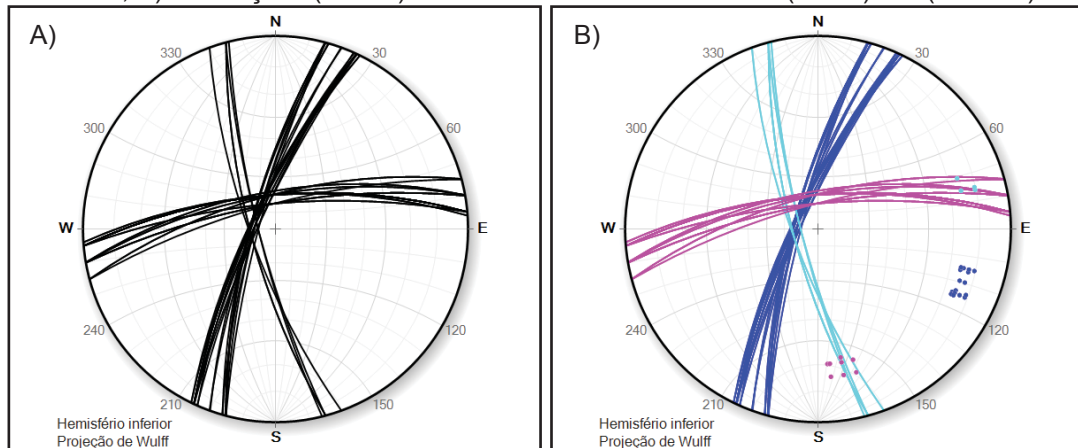


FONTE: a autora (2018).



Neste talude ocorrem fraturas pervasivas de direção N15-25E mergulhando 80° para NW, e esporadicamente de direção N15-25W com mergulhos para SW. Nos estereogramas da Figura 72 são representados os planos de fraturas e foliação levantados no afloramento.

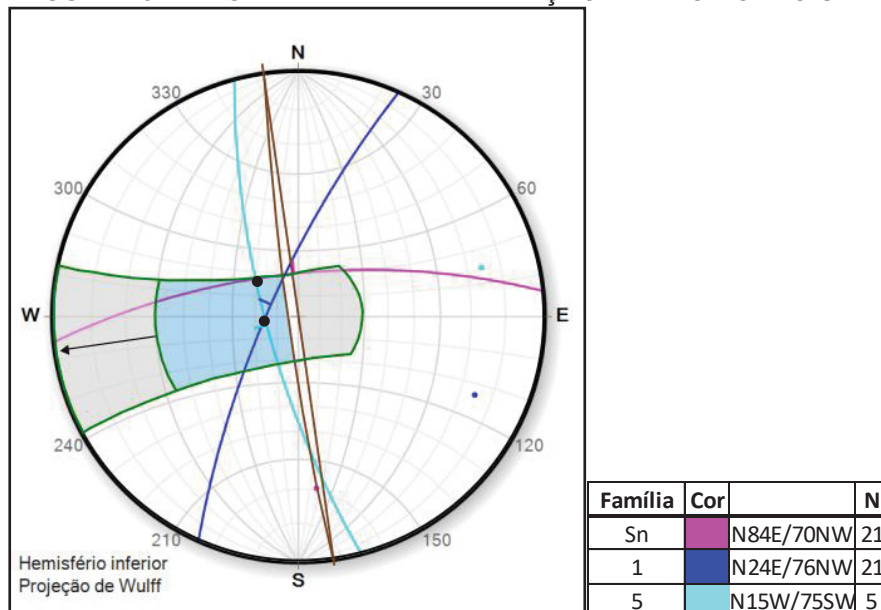
FIGURA 72 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-10, B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL) E 5 (VERDE).



FONTE: a autora (2018).

O talude SA-10 representado no diagrama de interpretação tem direção N8W com face livre voltada para SW (Figura 73), e mostra os planos médios das fraturas e foliação aflorantes. Observa-se no diagrama que há possibilidade de escorregamentos planares associados às famílias 1 e 5, e risco de escorregamentos em cunha associados as intersecções das famílias 1 com 5 e da foliação com a família 5. Neste talude não há risco de tombamento de blocos.

FIGURA 73 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-10.



FONTE: a autora (2018).

- **SA-13**

Esse talude está localizado no Km 504+800 da Pista Norte da BR-116 lado direito, apresentando 22 metros de altura, tendo vegetação rasteira esparsa ao longo de sua superfície. A Figura 74 mostra a localização deste talude na rodovia.

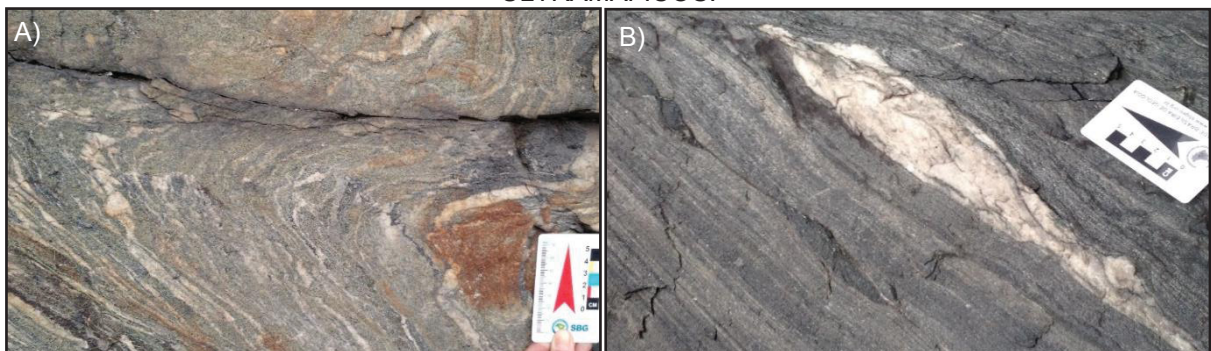
FIGURA 74 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-13.



FONTE: Google Earth (2018).

O ponto SA-13 é composto por paragneisse caracterizado por camadas de diferentes composições e espessuras centimétricas, dispostas subverticais em relação à rodovia. Apresenta dobras intrafoliares isoclinais e observa-se boudans de quartzo e ultramáficos centimétricos (Figura 75).

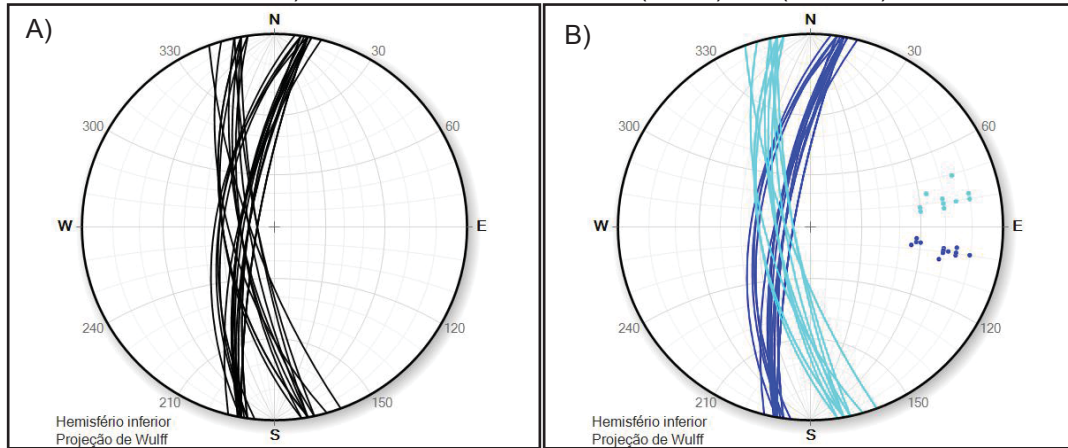
FIGURA 75 - A) PARAGNAISSE COM DOBRAS INTRAFOLIARES; B) BOUDANS DE QUARTZO E ULTRAMÁFICOS.



FONTE: a autora (2018).

O talude apresenta fraturas de direção N10W a N10E, mergulhando 70° para SW e NW, respectivamente. Na Figura 76 é representado os estereogramas com os planos de fraturas presentes neste ponto.

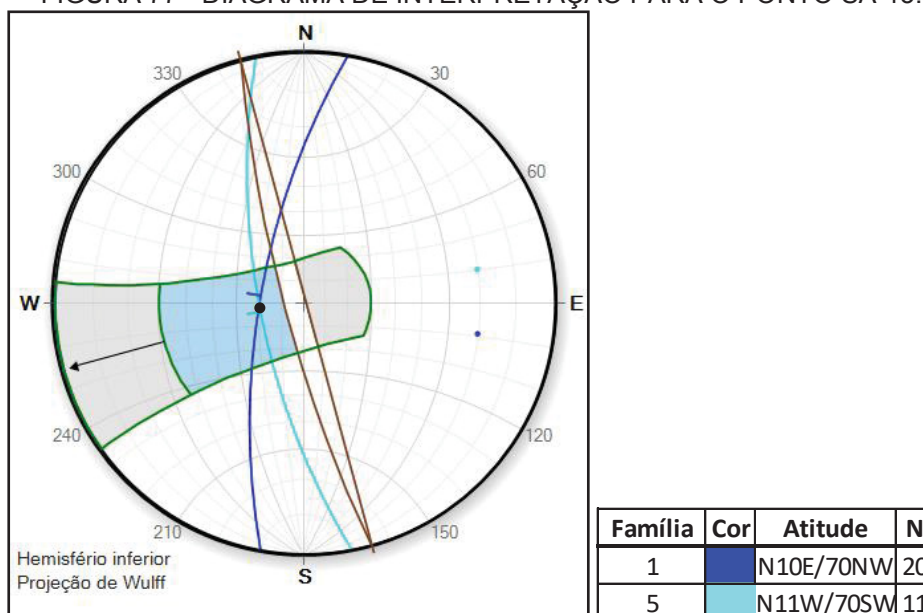
FIGURA 76 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-13, B) FAMÍLIA DE FRATURAS 1 (AZUL) E 5 (VERDE).



FONTE: a autora (2018).

No diagrama de interpretação para o ponto SA-13 é representado o talude de direção N15W com face livre voltada para SW, e os planos médios das duas famílias de fraturas presentes no afloramento (Figura 77). Observa-se no diagrama que há possibilidade de escorregamentos planares associados às famílias 1 e 5, bem como escorregamento em cunha associado à intersecção das famílias 1 e 5. Não há risco de tombamento de blocos neste talude.

FIGURA 77 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-13.



FONTE: a autora (2018).



- **SA-14**

O talude está localizado no Km 504+400 da Pista Norte da BR-116, em ambos os lados da rodovia. Apresenta altura de 20 metros no lado direito da pista e 14 metros no lado esquerdo. Na Figura 78 pode ser vista a localização deste talude na rodovia.

FIGURA 78 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-14.



FONTE: Google Earth (2018).

Neste talude a rocha é um granito gnaissado cinza rosado de granulometria fina a média com enclaves de migmatitos ou gnaisses (Figura 79). Possui bandamento gnáissico incipiente e apresenta fraturas pervasivas. O ponto SA-14 é composto por dois taludes de direção N10E um com a face voltada para NW e outro para SE.

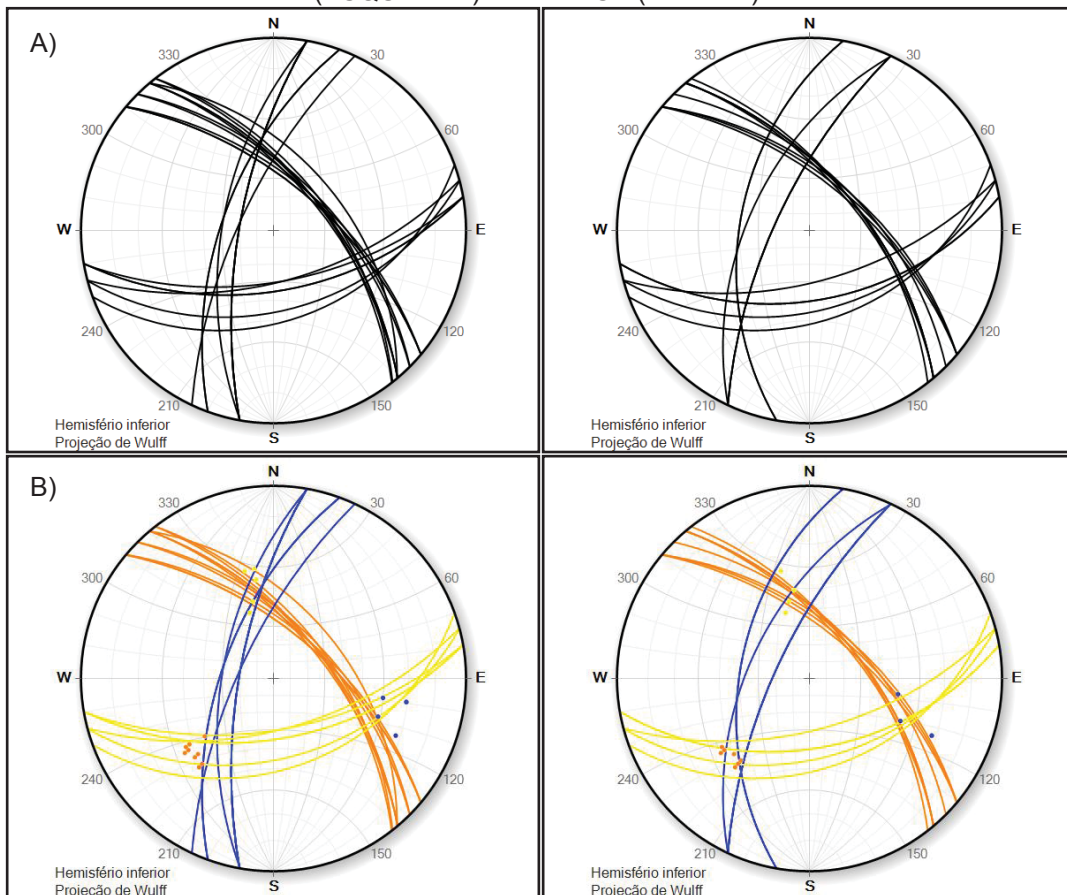
FIGURA 79 - VISTA DO TALUDE COMPOSTO POR GRANITO GNAISSE.



FONTE: a autora (2018).

Ambos os taludes apresentam uma família de fraturas de direção N10-25E mergulhando para NW e outra de direção N80E com mergulhos para SE. Esporadicamente observa-se uma família de fraturas de direção N40W com mergulhos para NE. Na Figura 80 são representados os estereogramas com os planos de discontinuidades presentes em cada face do talude.

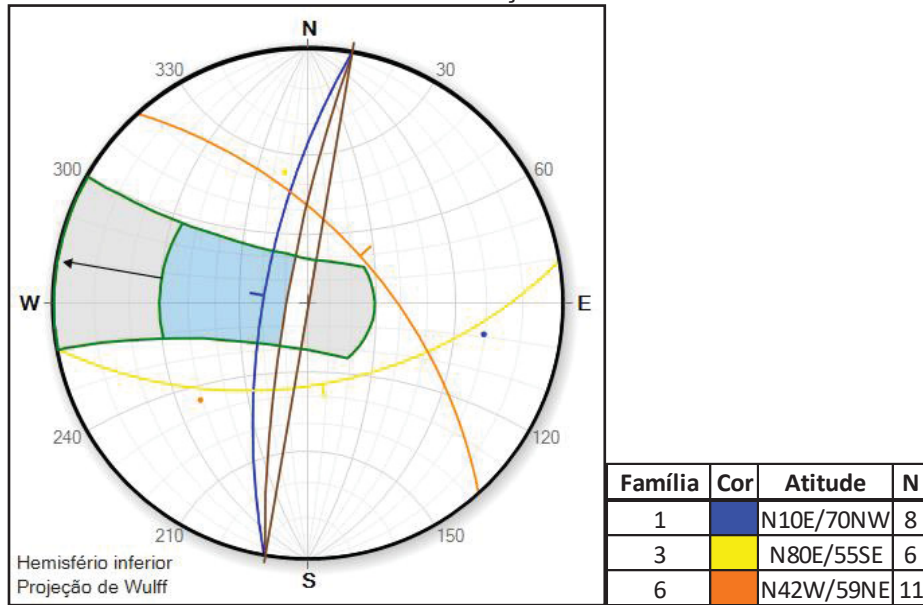
FIGURA 80 - A) ESTEREOGRAMAS COM PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O TALUDE COM A FACE VOLTADA PARA NW (ESQUERDA) E PARA SE (DIREITA). B) FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (AZUL), 3 (AMARELO) E 6 (LARANJA) DO TALUDE COM FACE VOLTADA PARA NW (ESQUERDA) E PARA SE (DIREITA).



FONTE: a autora (2018).

Foi feito um diagrama de interpretação para cada face do talude, e observa-se que para o talude com face livre voltada para NW (Figura 81) há possibilidade de escorregamento planar associado à família 1, e sem riscos de escorregamentos em cunha e tombamento de blocos.

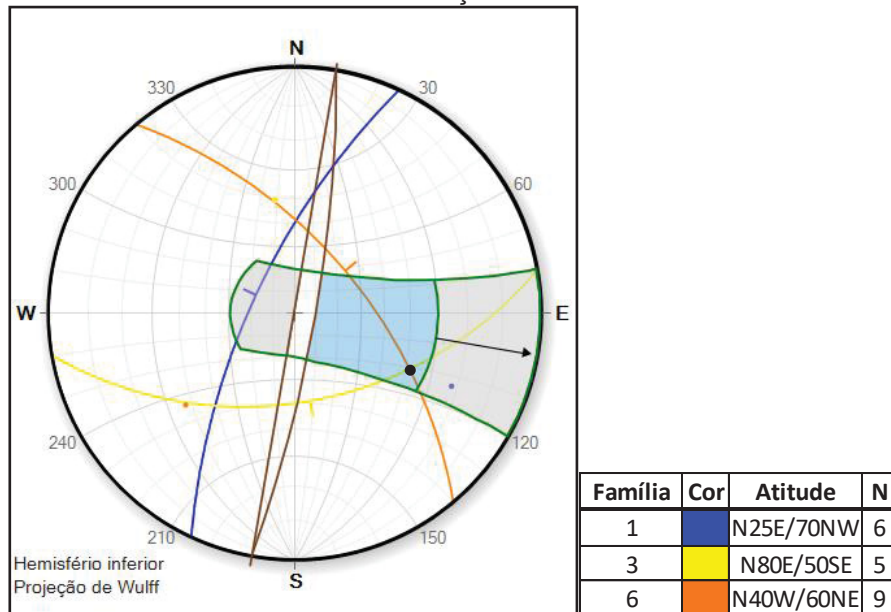
FIGURA 81 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA NW.



FONTE: a autora (2018).

Já o talude com a face livre voltada para SE (Figura 82), não há risco de escorregamento planar e nem de tombamento de blocos, mas sim possibilidade de escorregamento em cunha associado a intersecção das famílias de fraturas 3 e 6.

FIGURA 82 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O TALUDE VOLTADO PARA SE.



FONTE: a autora (2018).

- **SA-22**

Este ponto está situado no Km 513 da Pista Sul da BR-116, em ambos os lados da rodovia e outro talude transversal a pista. Os do talude do lado direito e esquerdo apresentam alturas de aproximadamente 40 metros, já o talude transversal



possui cerca de 15 metros de altura. Na Figura 83 podem ser observados a localização desses taludes na rodovia.

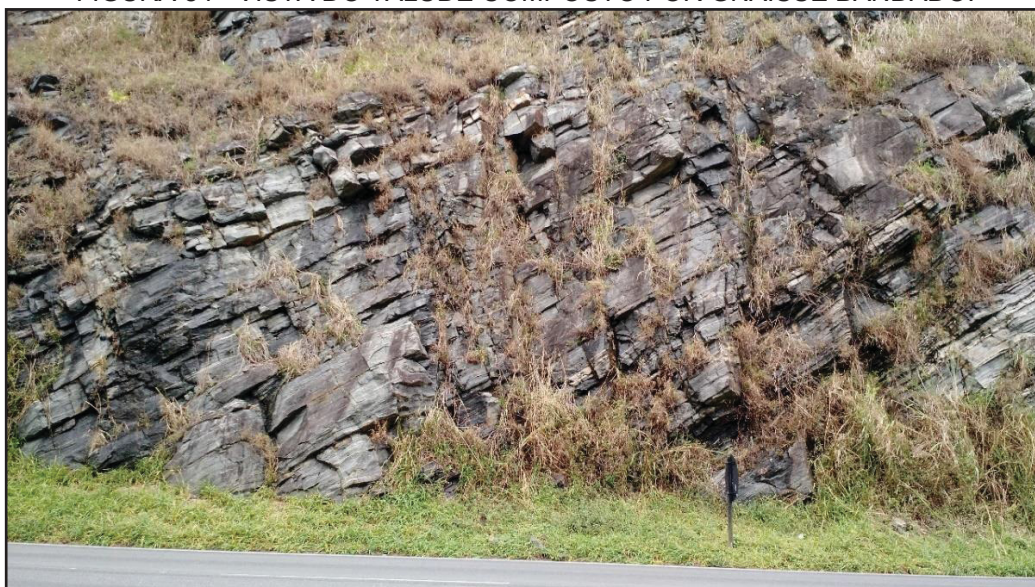
FIGURA 83 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-22.



FONTE: Google Earth (2018).

No ponto SA-22 o gnaíse possui bandamento centimétrico (2 – 10 cm), bem marcado e contínuo, com camadas de 40-50 cm de espessura (Figura 84). Apresenta foliação milonítica paralela ao bandamento de direção N45-60E com mergulhos baixos para SE. Ocorrem veios graníticos rosados e quartzosos paralelos ao bandamento gnaíssico e truncando o mesmo.

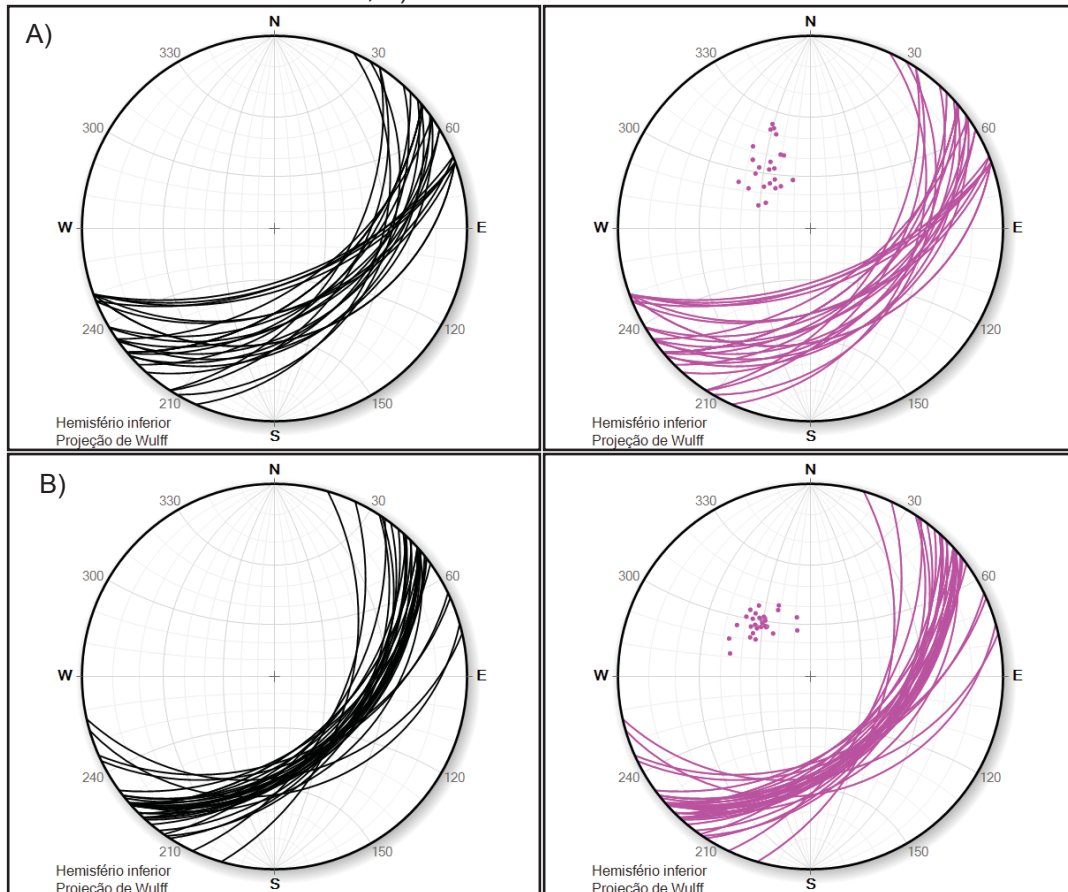
FIGURA 84 - VISTA DO TALUDE COMPOSTO POR GNAISSE BANDADO.



FONTE: a autora (2018).

No local há dois taludes de direção N70W um com a face voltada para SW e outro para NE. Foi realizado o levantamento estrutural dos afloramentos, e representou-se os planos de foliação nos estereogramas para cada face do talude (Figura 85).

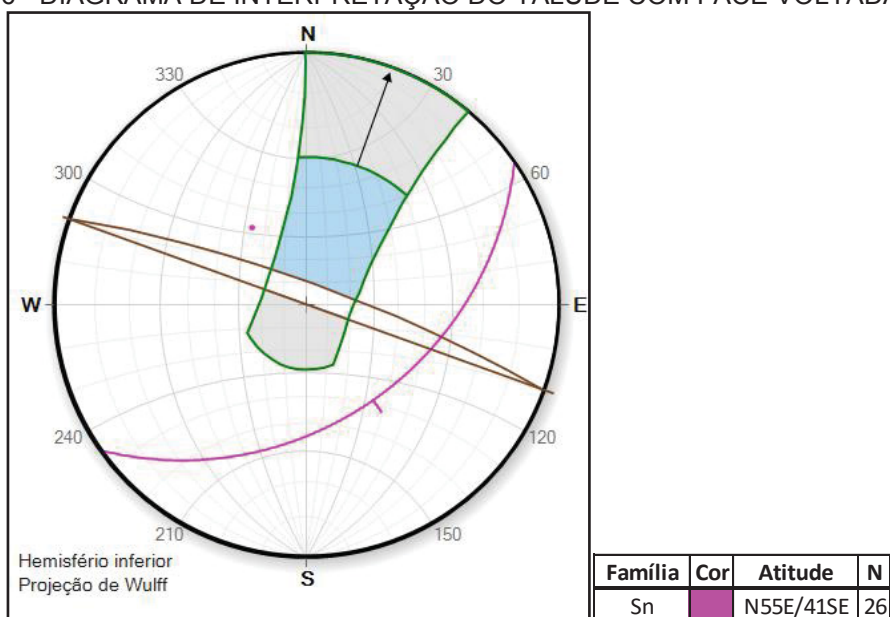
FIGURA 85 - ESTEREOGRAMAS COM OS PLANOS DE FOLIAÇÃO. A) TALUDE COM A FACE VOLTADA PARA NE; B) TALUDE COM A FACE VOLTADA PARA SW.



FONTE: a autora (2018).

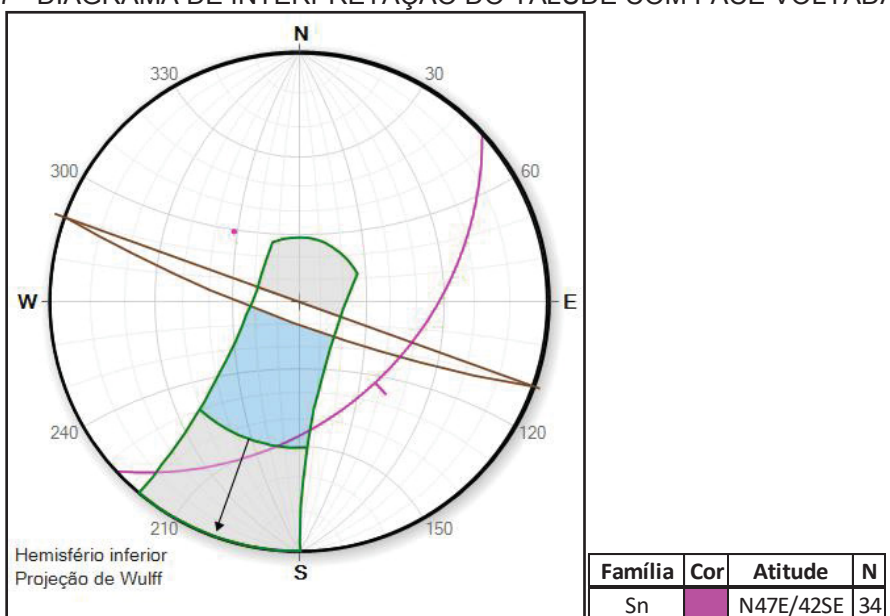
Foi feito um diagrama de interpretação para cada face do talude (Figuras 86 e 87), apresentando o plano médio da foliação. Observa-se que não há risco de escorregamento planar e nem em cunha para ambos os taludes, bem como também não há possibilidade de tombamento de blocos.

FIGURA 86 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DO TALUDE COM FACE VOLTADA PARA NE.



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 87 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DO TALUDE COM FACE VOLTADA PARA SW.



FONTE: a autora (2018).

No mesmo ponto observa-se um talude transversal a rodovia, composto por micaxisto (metassedimento) castanho acinzentado, com intercalação de níveis quartzosos e micáceos, e esporadicamente níveis conglomeráticos (Figura 88).



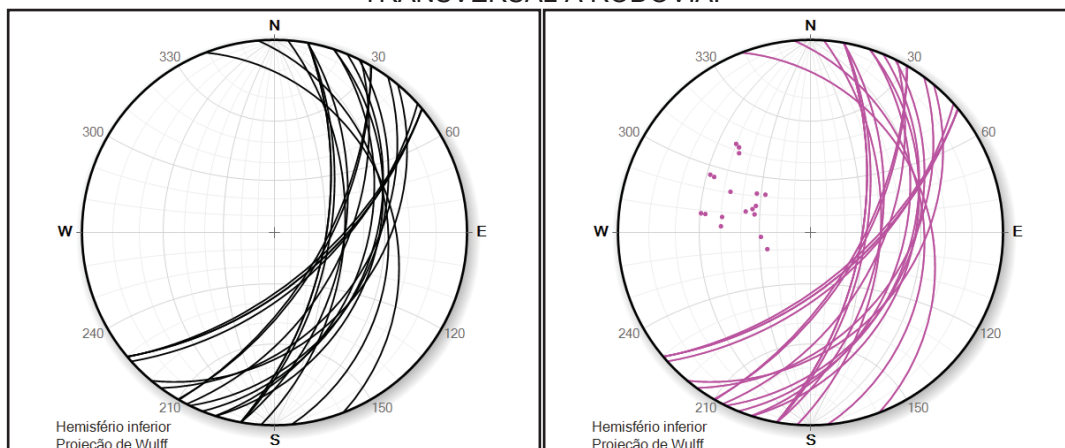
FIGURA 88 - MICAXISTO.



FONTE: a autora (2018).

No talude observa-se foliação milonítica penetrativa e contínua, paralela ao acamamento sedimentar de direção N20-30E com mergulhos baixos para SE. Possui lineação de estiramento mineral bem desenvolvida sobre os planos de foliação. No estereogramas da Figura 89 é representado os planos de foliação levantados no afloramento.

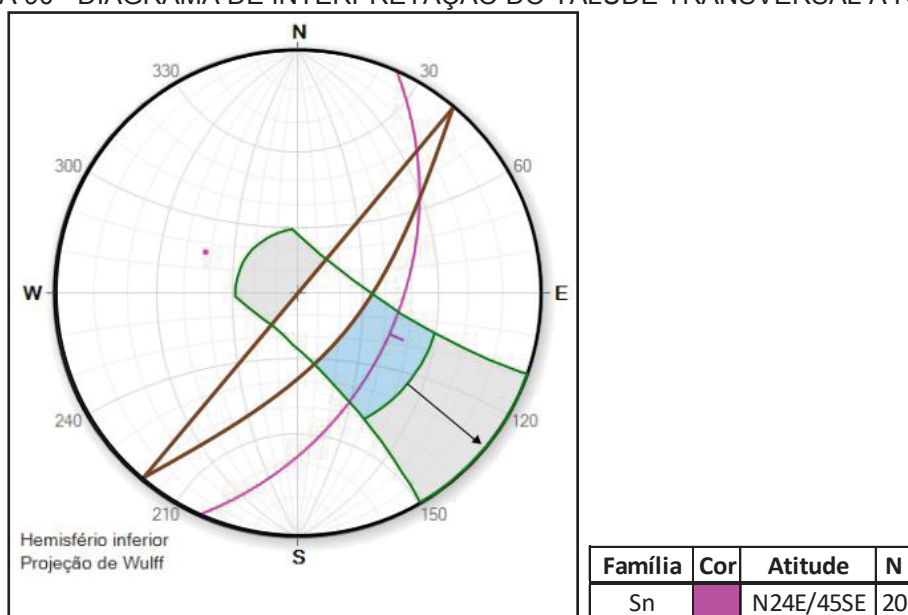
FIGURA 89 - ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE FOLIAÇÃO PARA O TALUDE TRANSVERSAL A RODOVIA.



FONTE: a autora (2018).

O talude transversal a rodovia tem direção N40E com face livre voltada para SE, e no diagrama de interpretação (Figura 90), observa-se que há possibilidade de escorregamento planar associado a foliação.

FIGURA 90 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DO TALUDE TRANSVERSAL A RODOVIA.



FONTE: a autora (2018).

- **SA-24**

Este talude se localiza no Km 518+200 da Pista Sul da BR-116, apresentando cerca de 20 metros de altura, possuindo vegetação rasteira ao longo de toda a sua superfície. A Figura 91 mostra a localização deste talude na rodovia.

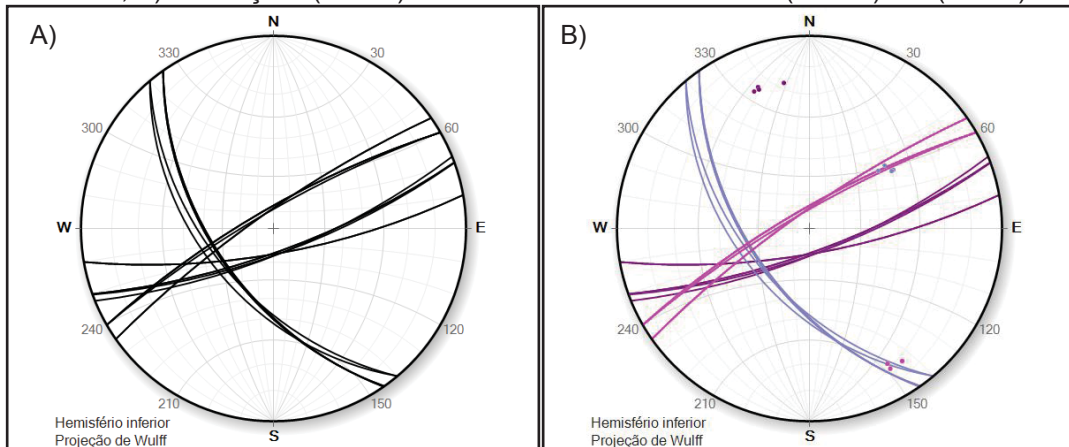
FIGURA 91 - LOCALIZAÇÃO DO TALUDE SA-24.



FONTE: Google Earth (2018).

Neste talude a rocha é um granito rosado composto por quartzo, feldspato e biotita orientados e foliação incipiente de direção N60E mergulhando para NW. Apresenta uma família de fraturas de direção N70E com mergulhos para SE e N35W mergulhando para SW (Figura 92).

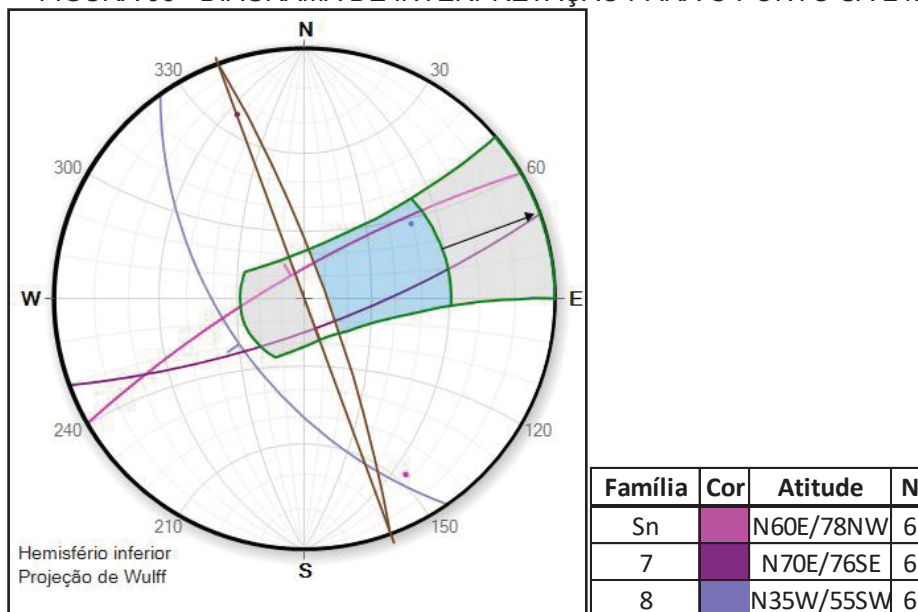
FIGURA 92 - A) ESTEREOGRAMA COM OS PLANOS DE DESCONTINUIDADES PARA O PONTO SA-24, B) FOLIAÇÃO (ROSA) E FAMÍLIAS DE FRATURAS 1 (ROXO) E 2 (LILÁS).



FONTE: a autora (2018).

O talude tem direção N20W com face livre voltada para NE (Figura 93). Observa-se que não há risco de escorregamento planar e nem em cunha, como também não há possibilidade de tombamento de blocos.

FIGURA 93 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO PARA O PONTO SA-24.



FONTE: a autora (2018).



Com base na análise de estabilidade realizada através do diagrama de interpretação, os taludes que são suscetíveis a escorregamentos planares são associados principalmente aos planos da família de fratura 1 de atitude N10-20E/75NW (taludes SA-1, SA-5, SA-7, SA-10, SA-13 e SA-14), e aos planos da família 5 N15-30W/75SW (taludes SA-5, SA-10 e SA-13). Os planos de foliação também estão suscetíveis a escorregamentos planares nos taludes SA-2 e SA-4, e em menor expressão a família 3 de atitude N71E/72SE no talude SA-2.

Os escorregamentos em cunha são associados às intersecções dos planos da família 1 (N10-20E/75NW) com a foliação nos taludes SA-2, SA-4 e SA-6, e intersecção com a família 5 (N15-30W/75SW) nos taludes SA-5, SA-10 e SA-13. A família 5 também intersecta a família 2 (N40E/63NW) e a foliação, gerando cunhas nos taludes SA-5 e SA-10 respectivamente. A intersecção entre as famílias 3 (N80E/50SE) e 6 (N40W/60NE) no talude SA-14 também tem risco de formar cunhas. Em nenhum dos diagramas analisados apresentaram risco de tombamentos de blocos.

### 6.3 FATOR DE SEGURANÇA PARA TALUDES EM SOLO

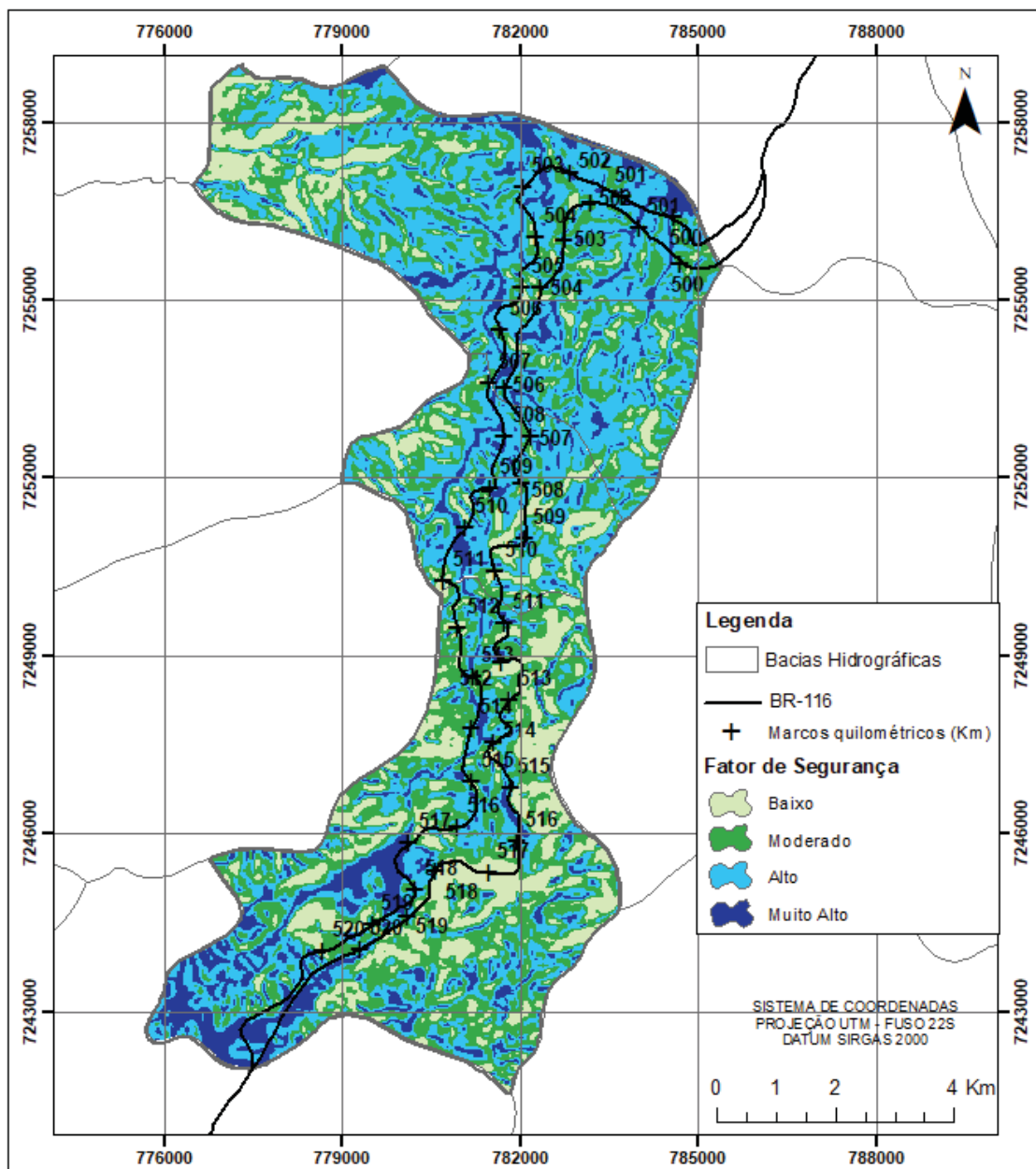
O uso de SIG como ferramenta de cálculo para o Fator de Segurança e como método de espacialização do resultado, permitiu realizar uma análise dinâmica dos dados e apresentar os locais que contenham taludes suscetíveis a baixos índices de segurança.

Na análise da estabilidade para a região da Serra do Azeite considerou-se três grupos de entrada de dados, baseados na delimitação de áreas de contribuição hidrográfica das bacias, denominados A1, A2 e A3. Para cada bacia caracterizou-se o tipo de solo e seus parâmetros de resistência, apresentando valores de ângulo de atrito de 31° para a bacia A1, 24° para a A2 e 26° para a A3. A coesão considerada nos cálculos foi de 1kPa, sendo analisado como o pior cenário.

Para cada bacia, verificou-se a estabilidade dos taludes sob quatro estágios de saturação: seco, 20%, 50% e saturado. Os mapas de Fatores de Segurança gerados para cada um dos cenários contemplaram duas escalas de mapas, uma que abrange as áreas de contribuição hidrográfica das bacias da Serra do Azeite e outra a faixa de domínio da rodovia.

No cenário que considera o solo seco, observam-se que as áreas A1 e A2 apresentam predominância de Fatores de Segurança alto, e em locais esparsos fatores moderados. A noroeste da bacia A1 ocorre localmente uma área com maior propensão a instabilidade, devido as maiores declividades encontradas nessa região da serra. Já ao sul da Serra do Azeite, ocorrem fatores de alto a moderado em sua maioria, apresentando nas porções de altas declividades índices de segurança menores que 1. Na Figura 94 pode-se observar a distribuição dos Fatores de Segurança para o solo seco.

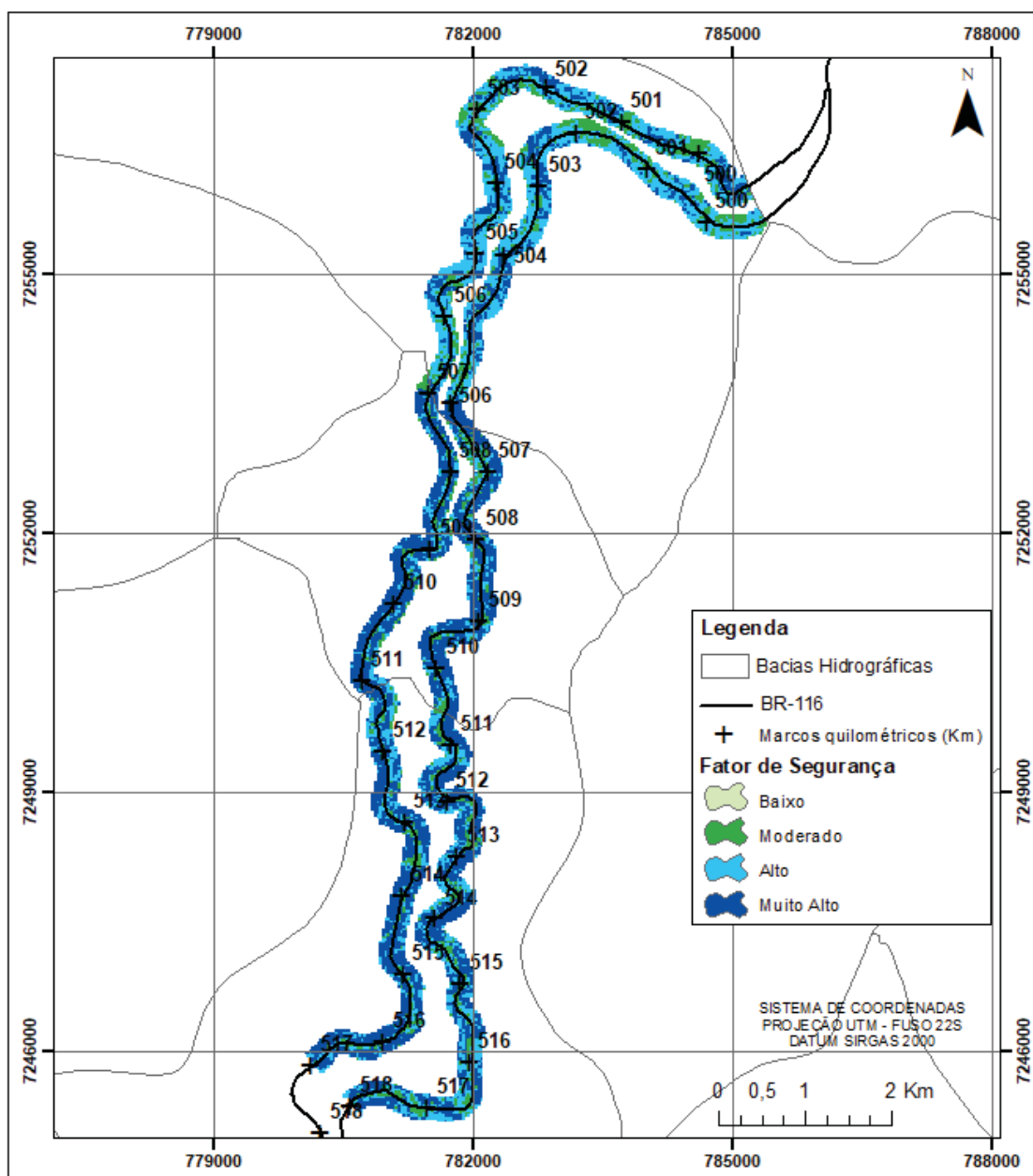
FIGURA 94 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO SECO.



FONTE: a autora (2018).

O mapa de Fator de Segurança para a faixa de domínio da rodovia, no cenário seco (Figura 95), apresentou áreas com maior estabilidade, predominando fatores altos na bacia A1, e muito altos na A2 e A3. Localmente, observa-se alta suscetibilidade a escorregamentos nas áreas de maior declividade, porém, não ocorrem índices menores do que 1 (muito alta suscetibilidade) nos taludes ao longo da rodovia.

FIGURA 95 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA, PARA CENÁRIO SECO.

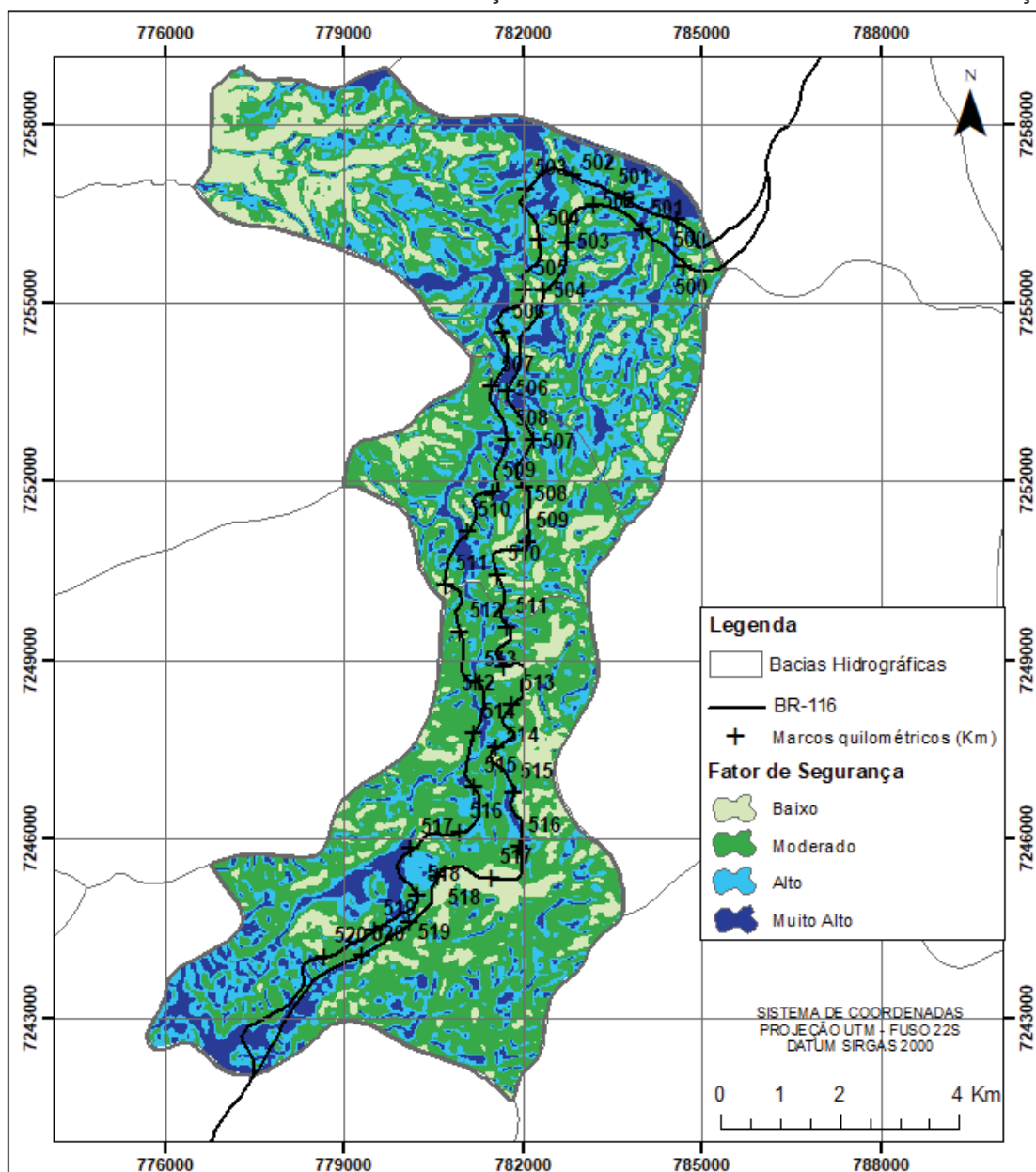


FONTE: a autora (2018).



No cenário com 20% do solo saturado, verificou-se a predominância do Fator de Segurança moderado em todas as bacias, e, pontualmente índices baixos nas áreas com maior declividade. Houve uma diminuição dos locais com baixa a moderada suscetibilidade. Na Figura 96 pode-se observar a distribuição desses índices para o cenário com 20% de saturação.

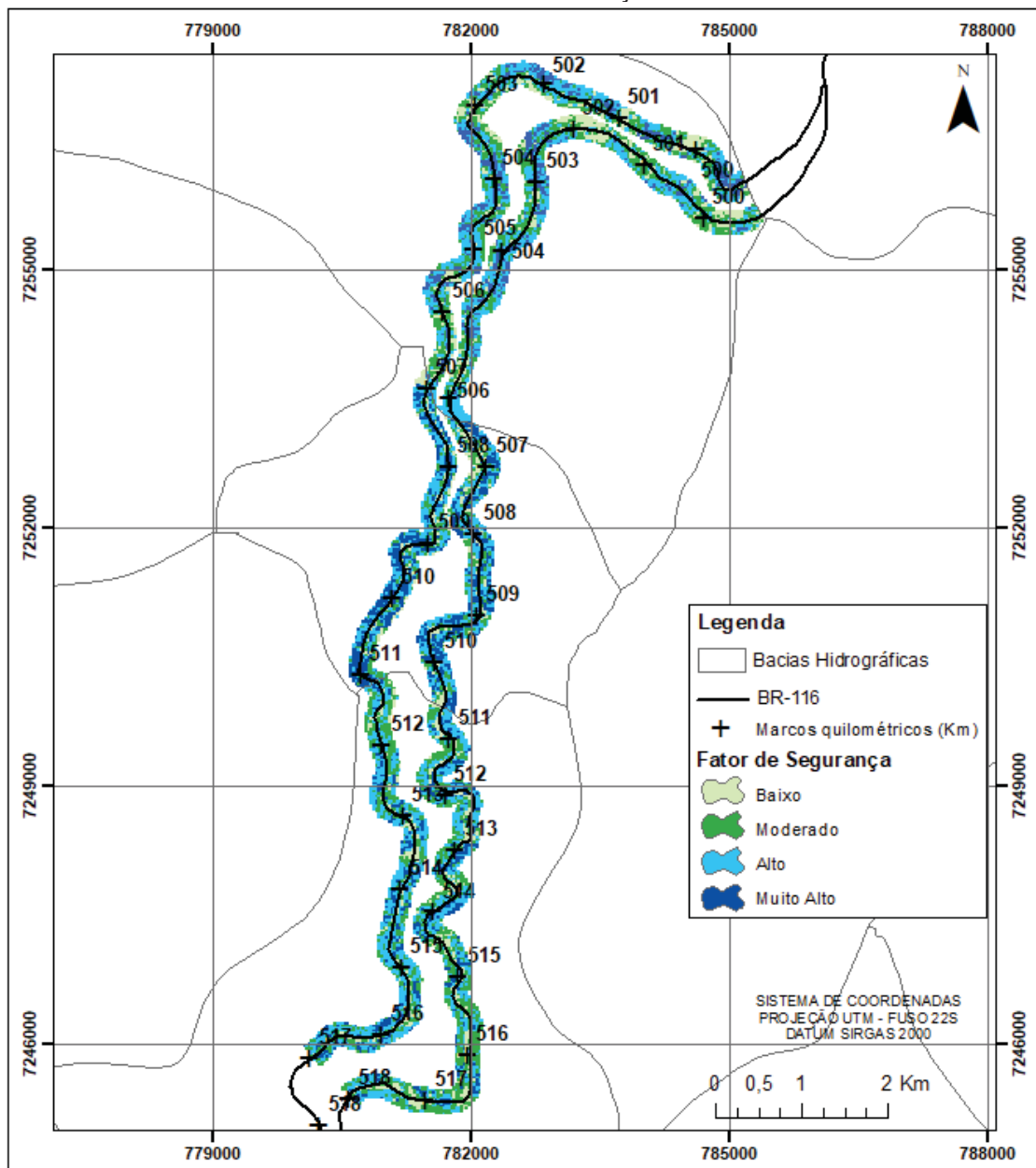
FIGURA 96 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO COM 20% DE SATURAÇÃO.



FONTE: a autora (2018).

Na faixa de domínio da rodovia, o solo com 20% de saturação indicou também a predominância de Fatores de Segurança moderados a altos nas bacias. Assim como ocorre uma diminuição das áreas com fatores muito altos, e localmente áreas de índices baixos em toda a região da Serra do Azeite. A distribuição desses índices pode ser visualizada na Figura 97.

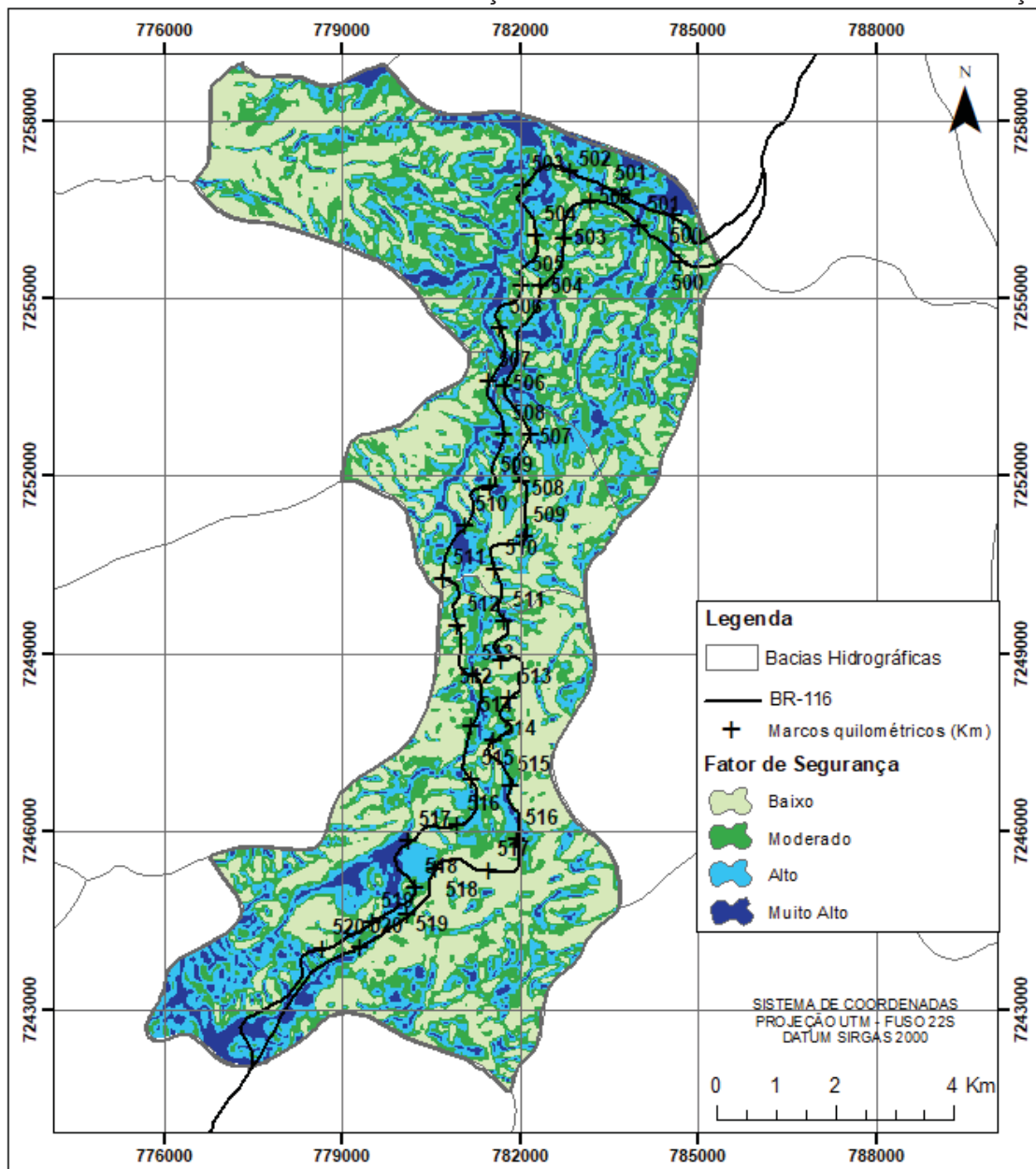
FIGURA 97 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA, COM 20% DE SATURAÇÃO.



FONTE: a autora (2018).

O cenário que considera o solo 50% saturado, mostra uma diminuição nos índices de segurança, apresentando áreas com fatores moderados a baixos na maior parte das bacias. Nas regiões com altas declividades ocorrem muito alta suscetibilidade a escorregamentos, assim como em algumas áreas com declividades moderadas. Na Figura 98 pode-se observar o mapa com os índices de segurança para o cenário com solo 50% saturado.

FIGURA 98 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA O CENÁRIO COM 50% DE SATURAÇÃO.

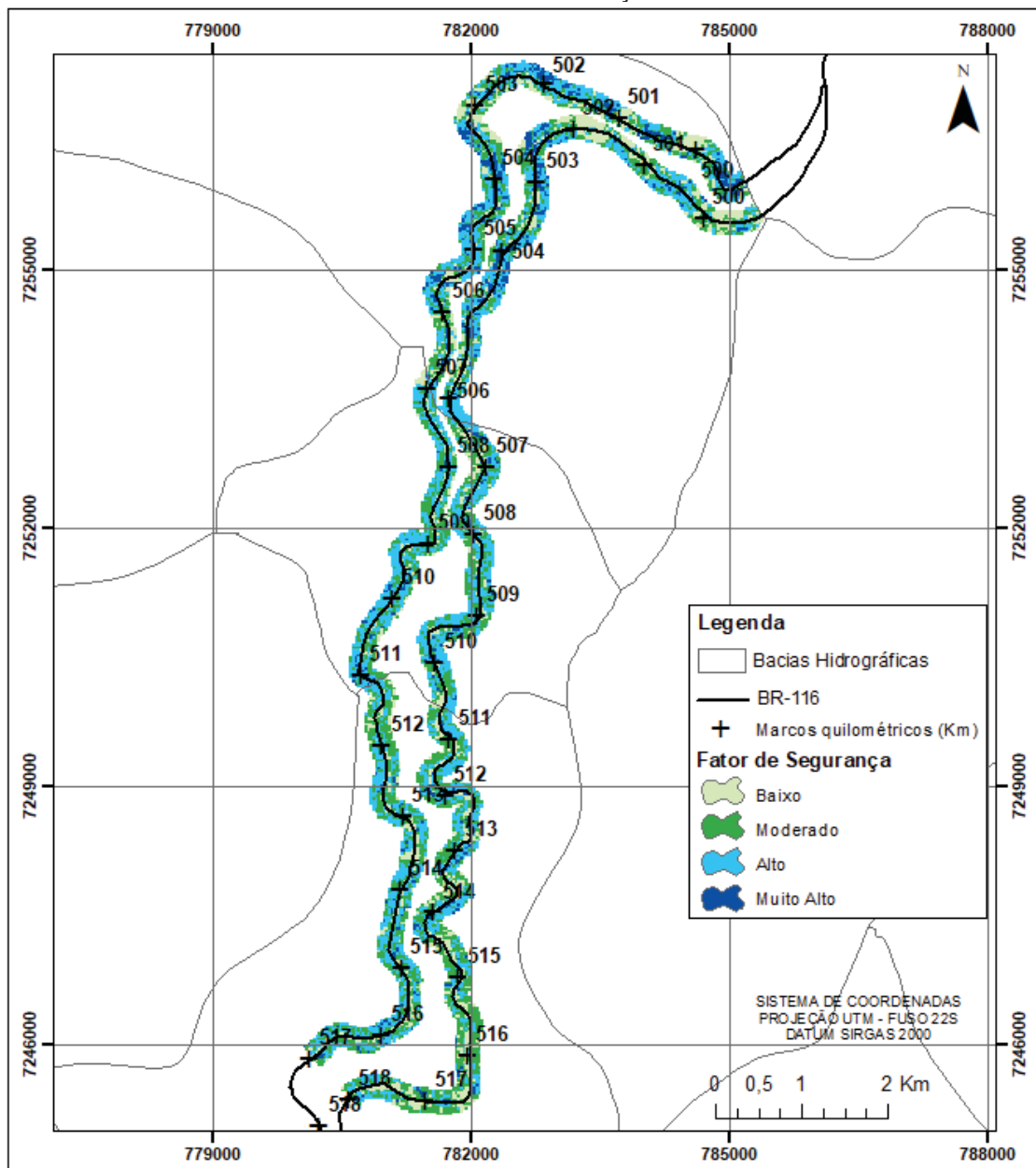


FONTE: a autora (2018).



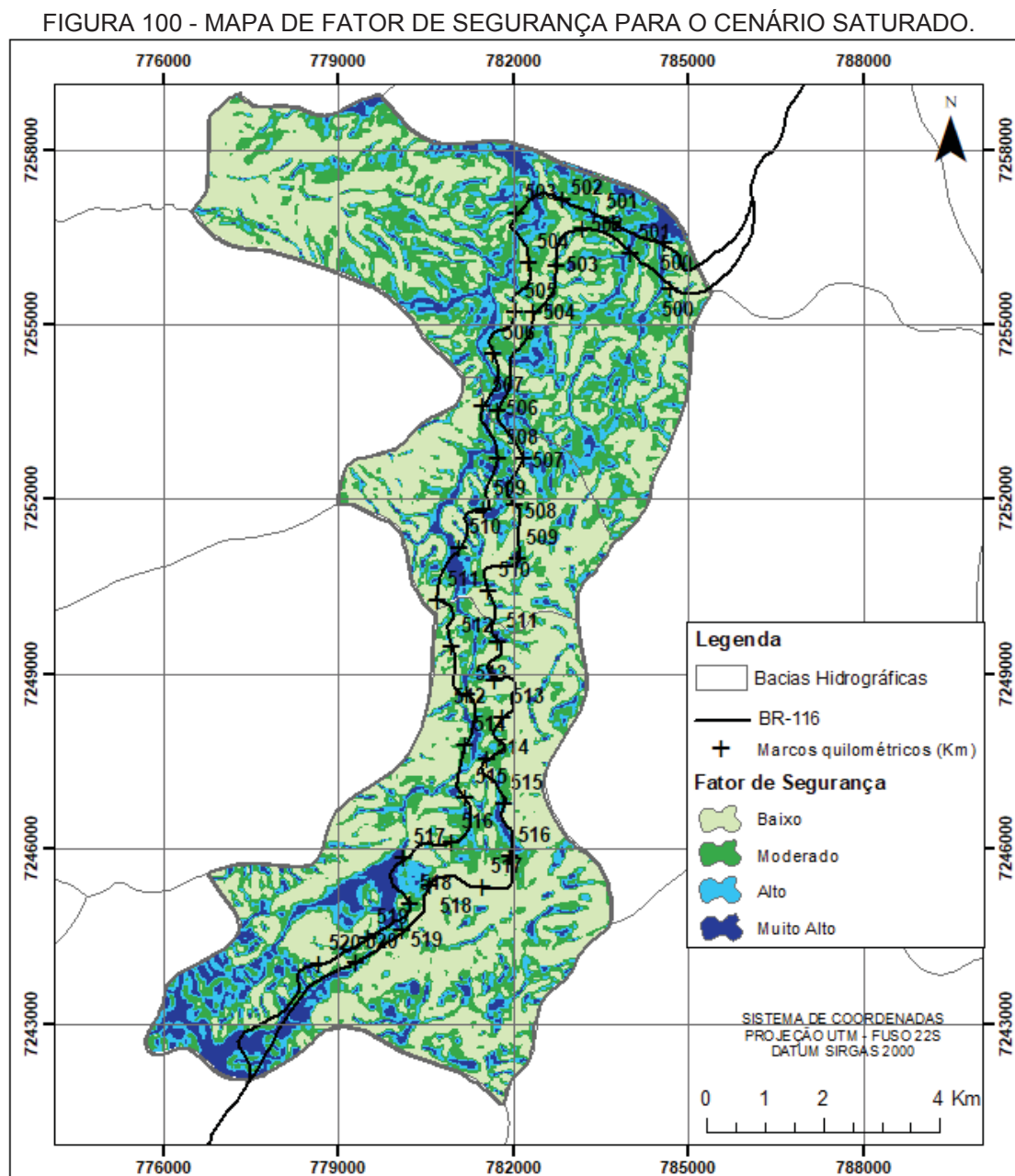
Para a faixa de domínio da rodovia, o mapa de Fator de Segurança em solo com 50% de saturação (Figura 99) apresentou-se com índices muito semelhantes aos calculados para o solo 20% saturado nas áreas A1 e A3. Ocorre uma diminuição sucinta nos índices de segurança, predominando fatores moderados a altos. Na bacia A2 há a redução de áreas com fatores muito altos, e aumento de índices moderados.

FIGURA 99 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA, COM 50% DE SATURAÇÃO.



FONTE: a autora (2018).

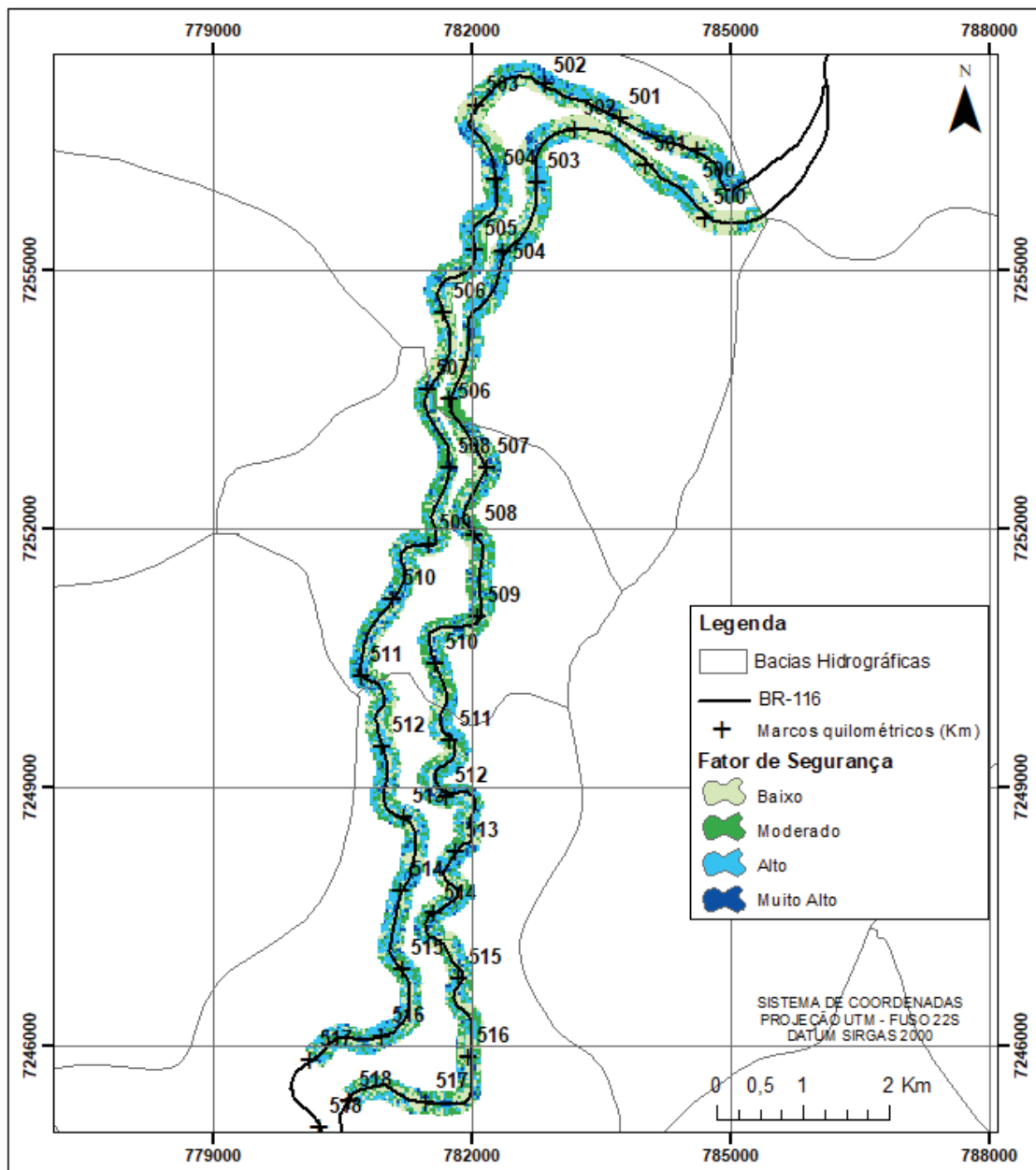
A análise de estabilidade para o solo saturado, apresentou uma redução nos Fatores de Segurança para toda a região da Serra do Azeite, exibindo muito alta suscetibilidade a escorregamentos em todas as bacias, e, ainda, mostrando locais com índices moderados a muito altos. Na Figura 100 pode-se observar a distribuição dos índices para o cenário saturado.



FONTE: a autora (2018).

Na faixa de domínio da rodovia, os Fatores de Segurança para solo saturado são predominantemente moderados a baixos nas bacias A1 e A2, e altos na A3. Observa-se uma diminuição nos índices de segurança em toda a extensão da rodovia, apresentando localmente fatores baixos. A distribuição dos fatores de segurança para solo saturado ao longo da rodovia pode ser visualizada na Figura 101.

FIGURA 101 - MAPA DE FATOR DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA, PARA O CENÁRIO SATURADO.



FONTE: a autora (2018).



Em resumo, observou-se que os Fatores de Segurança calculados para as áreas das bacias, no estado de solo seco, apresentam índices maiores que 1,5 na maior parte das bacias A1 e A2, e menor que 1,5 na bacia A3. Para o solo com 20% de saturação, o Fator de Segurança que predomina em todas as bacias é o moderado. Já quando o solo apresenta 50% de saturação, o fator determinante é o baixo, e, com o solo saturado, há pouca diferenciação nos valores dos índices de segurança em relação ao calculado com a saturação de 50%. Na Tabela 14 pode-se observar a distribuição dos índices de segurança nas bacias.

TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SEGURANÇA NAS BACIAS.

| Bacia | FS                   | Saturação |       |       |          |
|-------|----------------------|-----------|-------|-------|----------|
|       |                      | Seco      | 20%   | 50%   | Saturado |
| A1    | muito alto (> 2,0)   | 10,56     | 14,92 | 10,67 | 7,39     |
|       | alto (1,5 - 2,0)     | 48,42     | 28,33 | 23,61 | 16,33    |
|       | moderado (1,0 - 1,5) | 28,73     | 36,54 | 30,20 | 35,26    |
|       | baixo (<1,0)         | 12,29     | 20,21 | 35,52 | 41,02    |
| A2    | muito alto (> 2,0)   | 8,67      | 8,68  | 5,94  | 6,57     |
|       | alto (1,5 - 2,0)     | 47,30     | 20,72 | 23,46 | 15,30    |
|       | moderado (1,0 - 1,5) | 27,43     | 54,00 | 26,57 | 23,78    |
|       | baixo (<1,0)         | 16,60     | 16,60 | 44,03 | 54,35    |
| A3    | muito alto (> 2,0)   | 15,35     | 11,45 | 8,22  | 11,44    |
|       | alto (1,5 - 2,0)     | 27,80     | 20,47 | 23,70 | 14,01    |
|       | moderado (1,0 - 1,5) | 34,90     | 55,14 | 27,18 | 24,64    |
|       | baixo (<1,0)         | 21,95     | 12,94 | 40,91 | 49,91    |

FONTE: a autora (2018).

Na faixa de domínio da rodovia, o Fator de Segurança para o solo seco apresenta índices maiores que 1,5, e pontualmente índices entre 1,0 e 1,5. Para o solo com 20% e 50% de saturação, não há variação significativa nos valores de Fatores de Segurança entre os dois mapas, ocorrendo em ambos uma diminuição nos índices e apresentando localmente fatores baixos. Já com o solo saturado há a predominância de locais com fator de segurança entre baixo a moderado. Na Tabela 15 pode-se observar a distribuição dos índices de segurança para a faixa de domínio da rodovia.

TABELA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS ÍNDICES DE SEGURANÇA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA.

| Bacia | FS                   | Saturação |       |       |          |
|-------|----------------------|-----------|-------|-------|----------|
|       |                      | Seco      | 20%   | 50%   | Saturado |
| A1    | muito alto (> 2,0)   | 25,23     | 16,65 | 15,08 | 6,57     |
|       | alto (1,5 - 2,0)     | 55,24     | 35,05 | 35,14 | 32,78    |
|       | moderado (1,0 - 1,5) | 19,53     | 31,98 | 27,47 | 36,72    |
|       | baixo (<1,0)         | 0,00      | 16,32 | 22,31 | 23,93    |
| A2    | muito alto (> 2,0)   | 67,59     | 34,61 | 11,49 | 9,03     |
|       | alto (1,5 - 2,0)     | 20,23     | 35,14 | 38,48 | 29,67    |
|       | moderado (1,0 - 1,5) | 12,18     | 18,07 | 35,90 | 34,52    |
|       | baixo (<1,0)         | 0,00      | 12,18 | 14,13 | 26,78    |
| A3    | muito alto (> 2,0)   | 58,35     | 14,35 | 11,95 | 6,17     |
|       | alto (1,5 - 2,0)     | 29,82     | 39,24 | 36,26 | 36,27    |
|       | moderado (1,0 - 1,5) | 11,83     | 34,55 | 32,80 | 27,98    |
|       | baixo (<1,0)         | 0,00      | 11,86 | 18,99 | 29,58    |

FONTE: a autora (2018).

Para vertentes secas os Fatores de Segurança que predominam na faixa de domínio da rodovia são alto a muito alto, apresentando suscetibilidade a escorregamentos baixa a moderada nas áreas das bacias. Porém, quando o grau de saturação do solo atinge 20%, a suscetibilidade a escorregamentos aumenta, podendo apresentar índices de segurança menores que 1,0.

Analisando as duas escalas de mapas, a que abrange as áreas de contribuição hidrográfica das bacias da Serra do Azeite e a outra a faixa de domínio da rodovia, verificou-se que a suscetibilidade a escorregamentos em solo seco é da ordem de baixa a moderada em ambos, tornando-se, à medida que o grau de saturação aumenta, potencialmente instáveis, apresentando classes de suscetibilidade alta a muito alta.

Os mapas de Fatores de Segurança para solo seco e para solo com 20% de saturação, na área de contribuição hidrográfica das bacias e na faixa de domínio da rodovia, mostram que os locais que apresentam índices de segurança baixo a moderado coincidem parcialmente com os pontos de escorregamentos relatados no histórico de ocorrências de instabilizações. Contudo, nos mapas para solo com 50% de saturação e solo saturado, as áreas com baixos a moderados índices de segurança coincidem com os locais instáveis apontados na análise de instabilizações.

## 6.4 FATOR DE SEGURANÇA PARA TALUDES ROCHOSOS

O Fator de Segurança para taludes rochosos é calculado pontualmente para cada maciço analisado, baseado no plano de descontinuidade suscetível a ruptura. Sendo assim, os dados de entrada para o cálculo são: a inclinação ( $i$ ) e altura ( $H$ ) do talude; a inclinação do plano de ruptura ( $\theta$ ); o peso específico da rocha ( $\gamma$ ) estimado em  $27 \text{ kN/m}^3$ ; a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ) do maciço adotados para rochas cristalinas; e a altura de água ( $H_w$ ) definida como a metade da altura do maciço.

Os dados de entrada para o cálculo do fator de segurança em taludes rochosos suscetíveis a escorregamento planar, podem ser visualizados na Tabela 16. O fator de segurança na condição seca está entre 1,0 - 1,8, e com água varia de 0,8 a 1,5.

TABELA 16 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA ESCORREGAMENTOS PLANARES.

| Talude        | Atitude Talude | Familia        | $i$<br>(°) | $H$<br>(m) | $\theta$<br>(°) | $\gamma$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $c$<br>(kPa) | $\phi$<br>(°) | $H_w$<br>(m) | Fator de Segurança Seco - FS 1 | Fator de Segurança c/ Água - FS 2 |
|---------------|----------------|----------------|------------|------------|-----------------|---------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| SA-1          | N10W/80SW      | 1 - N19E/73NW  | 80         | 18         | 73              | 27                              | 40           | 30            | 9            | 1,57                           | 1,34                              |
| SA-2 DIREITA  | EW/80N         | Sn - N77E/75NW | 80         | 30         | 75              | 27                              | 40           | 30            | 15           | 1,31                           | 1,00                              |
| SA-2 ESQUERDA | EW/80S         | 3 - N71E/72SE  | 80         | 25         | 72              | 27                              | 40           | 30            | 12,5         | 1,07                           | 0,87                              |
| SA-4          | N60E/80NW      | Sn - N78E/71NW | 80         | 17         | 71              | 27                              | 40           | 30            | 8,5          | 1,36                           | 1,18                              |
| SA-5 DIREITA  | N10W/80SW      | 1 - N10E/75NW  | 80         | 27         | 75              | 27                              | 40           | 30            | 13,5         | 1,44                           | 1,13                              |
| SA-5 DIREITA  | N10W/80SW      | 5 - N30W/75SW  | 80         | 27         | 75              | 27                              | 40           | 30            | 13,5         | 1,44                           | 1,13                              |
| SA-7          | N10W/80SW      | 1 - N10E/75NW  | 80         | 20         | 75              | 27                              | 40           | 30            | 10           | 1,89                           | 1,58                              |
| SA-10         | N8W/85SW       | 5 - N15W/75SW  | 85         | 16         | 75              | 27                              | 40           | 30            | 8            | 1,26                           | 1,10                              |
| SA-10         | N8W/85SW       | 1 - N24E/76NW  | 85         | 16         | 76              | 27                              | 40           | 30            | 8            | 1,36                           | 1,18                              |
| SA-13         | N15W/80SW      | 5 - N11W/70SW  | 80         | 22         | 70              | 27                              | 40           | 30            | 11           | 1,02                           | 0,86                              |
| SA-13         | N15W/80SW      | 1 - N10E/70NW  | 80         | 22         | 70              | 27                              | 40           | 30            | 11           | 1,02                           | 0,86                              |
| SA-14 DIREITA | N10E/80NW      | 1 - N10E/70NW  | 80         | 20         | 70              | 27                              | 40           | 30            | 10           | 1,10                           | 0,94                              |

FONTE: a autora (2018).

Para a ruptura em cunha, a análise é mais complexa do ponto de vista matemático, e por isso utilizou-se como ferramenta de cálculo o programa Wedge Failure Analysis (KROEGER, 1999), que considera a variação da coesão e da pressão da água atuantes ao longo dos planos de escorregamento, permitindo assim uma avaliação mais precisa do fator de segurança.

Os dados inseridos no programa são: atitudes do talude e dos planos das descontinuidades suscetíveis a escorregamento, as massas específicas da rocha ( $\gamma$ ) e da água ( $\gamma_a$ ), os parâmetros de resistência da rocha intacta como a coesão ( $c$ ) e o

ângulo de atrito ( $\phi$ ), a saturação atuante no maciço. Na Tabela 17 encontra-se os dados de entrada para o cálculo do fator de segurança em ruptura cunha.

TABELA 17 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA PARA ESCORREGAMENTOS EM CUNHA.

| Talude         | Atitude Talude | Famílias              | $i$ (°) | $H$ (m) | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $c$ (kPa) | $\phi$ (°) | $\gamma_a$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Fator de Segurança Seco - FS 1 | Fator de Segurança Saturado - FS 2 |
|----------------|----------------|-----------------------|---------|---------|-------------------------------|-----------|------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| SA-1           | N10W/80SW      | Sn/2                  | 80      | 18      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 2,59                           | 1,23                               |
|                |                | N77E/71NW - N30E/59NW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-2 DIREITA   | EW/80N         | Sn/1                  | 80      | 30      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 2,48                           | bloco flutua                       |
|                |                | N77E/75NW - N20E/80NW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-4           | N60E/80NW      | Sn/1                  | 80      | 17      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,69                           | bloco flutua                       |
|                |                | N78E/71NW - N21E/80NW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-4           | N60E/80NW      | Sn/2                  | 80      | 17      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,68                           | bloco flutua                       |
|                |                | N78E/71NW - N26E/66NW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-5 DIREITA   | N10W/80SW      | 1/5                   | 80      | 27      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,91                           | bloco flutua                       |
|                |                | N10E/75NW - N30W/75SW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-5 DIREITA   | N10W/80SW      | 2/5                   | 80      | 27      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,35                           | bloco flutua                       |
|                |                | N40E/63NW - N30W/75SW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-6           | N80W/80SW      | Sn/1                  | 80      | 24      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 2,14                           | 2,05                               |
|                |                | N58E/46SE - N10E/75NW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-10          | N8W/85SW       | 1/5                   | 85      | 16      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,82                           | bloco flutua                       |
|                |                | N24E/76NW - N15W/75SW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-10          | N8W/85SW       | Sn/5                  | 85      | 16      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 2,00                           | bloco flutua                       |
|                |                | N84E/70NW - N15W/75SW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-13          | N15W/80SW      | 1/5                   | 80      | 22      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,69                           | bloco flutua                       |
|                |                | N10E/70NW - N11W/70SW |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |
| SA-14 ESQUERDA | N10E/80SE      | 3/6                   | 80      | 14      | 27                            | 40        | 30         | 10                              | 1,76                           | 1,74                               |
|                |                | N80E/50SE - N40W/60NE |         |         |                               |           |            |                                 |                                |                                    |

FONTE: a autora (2018).

Para os cálculos considerou-se dois cenários condicionantes nas descontinuidades, secas e saturadas. Na condição seca o fator de segurança situa-se entre 1,3 e 2,5. Já quando saturadas ocorre a flutuação do bloco na maioria dos taludes e conseqüente escorregamento do mesmo.

Analisando-se individualmente os taludes presentes ao longo da rodovia, observa-se que o talude SA-1 apresenta Fatores de Segurança alto a muito alto para escorregamentos planares e em cunha, respectivamente, e que na presença de água ocorre a diminuição desses índices, tornando-se moderado. Já para o talude SA-2 o índice de segurança para escorregamentos planares é moderado, e para cunha é muito alto quando seco. Porém, na presença de água ocorre a flutuação do bloco da cunha, e muito alta suscetibilidade a deslizamentos.

No talude SA-4 o Fator de Segurança é moderado para escorregamentos planares tanto para o talude seco, quanto na presença de água. Já na análise de cunhas, o índice de segurança é alto quando seco, e na presença de água ocorre a



flutuação da cunha. Para o talude SA-5 observa-se que o fator de segurança para escorregamentos planares e em cunha é moderado, e, na presença de água também ocorre a flutuação do bloco da cunha, permanecendo com índice moderado para deslizamentos.

Na análise de estabilidade do talude SA-6 apresentou Fator de Segurança para escorregamentos em cunha alto a muito alto, mesmo quando o talude se encontra saturado. Não há suscetibilidade a escorregamentos planares neste talude. Já no talude SA-7 o índice de segurança para deslizamentos é alto, mesmo estando na presença de água, e não há suscetibilidade a escorregamentos em cunha.

Nos taludes SA-10 e SA-13 observam-se que o Fator de Segurança para escorregamentos planares é moderado e baixo, respectivamente, e para cunha o índice é alto em ambos. Na presença de água ocorre a flutuação do bloco de cunha nos taludes. Já para o talude SA-14 os índices de segurança para escorregamentos planares é moderado a baixo, este último quando em presença de água. Não há suscetibilidade a escorregamentos em cunha neste talude.

Na Tabela 18 tem-se o resumo da análise da estabilidade dos taludes com a indicação das famílias suscetíveis a escorregamentos planares e em cunha, e os Fatores de Segurança para cada talude, nas condições seca (FS 1), com água (FS 2) no caso de escorregamento planar, e saturada (FS 2) para escorregamento em cunha.

TABELA 18 - FATORES DE SEGURANÇA DOS TALUDES SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS PLANARES E EM CUNHA.

| Talude            | Direção/<br>Inclinação<br>Talude | Escorregamento Planar |                             |                   |                   | Escorregamento em Cunha |   |                   |                 |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|---|-------------------|-----------------|
|                   |                                  | Família               | Plano                       | FS 1              | FS 2              | Família                 | Planos                                    | FS 1              | FS 2            |
| SA-1              | N10W/80SW                        | 1                     | N19E/73NW                   | 1,57              | 1,34              | Sn X 2                  | N77E/71NW<br>X<br>N30E/59NW               | 2,59              | 1,23            |
| SA-2<br>DIREITA   | EW/80N                           | Sn                    | N77E/75NW                   | 1,31              | 1,00              | Sn X 1                  | N77E/75NW<br>X<br>N20E/80NW               | 2,48              | bloco<br>flutua |
| SA-2<br>ESQUERDA  | EW/80S                           | 3                     | N71E/72SE                   | 1,07              | 0,87              | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-4              | N60E/80NW                        | Sn                    | N78E/71NW                   | 1,36              | 1,18              | Sn X 1                  | N78E/71NW<br>X<br>N21E/80NW               | 1,69              | bloco<br>flutua |
| SA-5<br>DIREITA   | N10W/80SW                        | 1 e 5                 | N10E/75NW<br>e<br>N30W/75SW | 1,44              | 1,13              | 1 X 5 e<br>2 X 5        | N10E/75NW,<br>N40E/63NW<br>X<br>N30W/75SW | 1,91<br>e<br>1,35 | bloco<br>flutua |
| SA-5<br>ESQUERDA  | N10W/80NE                        | -                     | -                           | -                 | -                 | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-6              | N80W/80SW                        | -                     | -                           | -                 | -                 | Sn X 1                  | N58E/46SE<br>X<br>N10E/75NW               | 2,14              | 2,05            |
| SA-7              | N10W/80SW                        | 1                     | N10E/75NW                   | 1,89              | 1,58              | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-8              | N45E/80NW                        | -                     | -                           | -                 | -                 | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-10             | N8W/85SW                         | 1 e 5                 | N24E/76NW<br>e<br>N15W/75SW | 1,36<br>e<br>1,26 | 1,18<br>e<br>1,10 | Sn X 5<br>e 1 X 5       | N84E/70NW,<br>N24E/76NW<br>X<br>N15W/75SW | 2,0 e<br>1,82     | bloco<br>flutua |
| SA-13             | N15W/80SW                        | 1 e 5                 | N10E/70NW<br>e<br>N11W/70SW | 1,02              | 0,86              | 1 X 5                   | N10E/70NW<br>X<br>N11W/70SW               | 1,69              | bloco<br>flutua |
| SA-14<br>DIREITA  | N10E/80NW                        | 1                     | N10E/70NW                   | 1,10              | 0,94              | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-14<br>ESQUERDA | N10E/80SE                        | -                     | -                           | -                 | -                 | 3 X 6                   | N80E/50SE<br>X<br>N40W/60NE               | 1,76              | 1,74            |
| SA-22<br>DIREITA  | N70W/80NE                        | -                     | -                           | -                 | -                 | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-22<br>ESQUERDA | N70W/80SW                        | -                     | -                           | -                 | -                 | -                       | -   | -                 | -               |
| SA-24             | N20W/80NE                        | -                     | -                           | -                 | -                 | -                       | -   | -                 | -               |

FONTE: a autora (2018).

## 6.5 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM MACIÇOS DA SERRA DO AZEITE – BR-116

### **Análise da Estabilidade de Taludes em Maciços da Serra do Azeite – BR-116**

Carolina Bitencourt de Britto  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil  
[carolinabitencourt.geo@gmail.com](mailto:carolinabitencourt.geo@gmail.com)

Alberto Pio Fiori  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil  
[fiori@ufpr.br](mailto:fiori@ufpr.br)

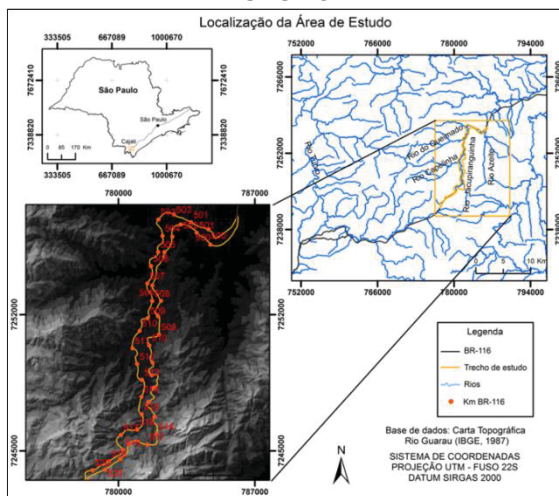
**RESUMO:** O comportamento dos solos das encostas é geralmente influenciado pela topografia, material de origem e por fatores naturais exógenos, como presença de vegetação e agentes climáticos, que promovem a perda de resistência do solo. Já as rochas têm seu comportamento geomecânico influenciado principalmente pelas suas descontinuidades, que facilitam a infiltração de água e potencializam a instabilidade desses planos de fraqueza. No trecho da Rodovia Régis Bittencourt (BR-116) pertencente a Serra do Azeite, situado no município de Cajati/SP, há um histórico de eventos de escorregamentos e processos erosivos, nos quais ocorrem solos residuais e coluvionares nas encostas, além de taludes em rocha. Os maciços da Serra do Azeite são constituídos principalmente por litologias do embasamento representadas pelo gnaiss bandado Barra do Azeite, afetado pela zona de falha da Serra do Azeite e, como consequência, apresentando intensa milonitização e fraturamentos. Nesse trecho foram estudados os fatores que estão relacionados à ocorrência de escorregamentos nas encostas naturais e taludes rodoviários. Para essa pesquisa objetivou-se determinar a influência das estruturas em rocha no processo de escorregamento, buscando uma análise estrutural voltada para instabilizações. Para isso foi feito o estudo da compartimentação do maciço, através do levantamento estrutural sistemático (famílias de fraturas, falhas, planos de foliações) e análise de estabilidade pela representação do cone de atrito e planos de fraqueza em projeções estereográficas. O gnaiss apresenta foliação milonítica penetrativa e contínua paralela ao bandamento (N70-85E/70NW). O bandamento gnáissico é milimétrico a centimétrico (0,3-0,5 a 1-2 cm), bem desenvolvido e contínuo, localmente decimétrico (40-50 cm). Os maciços rochosos possuem três famílias principais de fraturas N10-20E/75NW, N15-30W/75SW e N40E/63NW, as quais são responsáveis pelas instabilizações por meio da intersecção desses planos de fraqueza. Verificou-se que em alguns maciços há suscetibilidade a escorregamento em cunha associado as três famílias de fraturas e aos planos de foliação, e escorregamentos planar associado às duas primeiras famílias de fraturas e a foliação. Os taludes sujeitos a escorregamentos planares apresentaram baixos fatores de segurança, mesmo não saturados por água, e moderada a baixa suscetibilidade para escorregamentos em cunha quando drenados, porém há risco de flutuação da cunha na presença de água. A partir da definição das estruturas que influenciam no processo de escorregamento na região, baseado na análise geométrica do maciço, pode-se obter um entendimento mais adequado dos mecanismos que agem nas encostas litorâneas brasileiras, auxiliando no gerenciamento de segurança e avaliação dos riscos dos taludes rodoviários.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de taludes rochosos, Escorregamentos, Serra do Azeite.

## 1 INTRODUÇÃO

Há um histórico de eventos de escorregamentos e processos erosivos concentrados em um trecho de 20 km da BR-116 que liga Curitiba (PR) a São Paulo (SP), na Serra do Azeite, entre os quilômetros 500 e 520 (Figura 102). Para identificar os possíveis locais suscetíveis a escorregamentos é necessário determinar as causas desse processo e entender a gênese de sua formação, podendo assim, prevenir futuros eventos de movimentos de massa.

FIGURA 102 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: a autora (2018).

Segundo Guidicini & Nieble (1984), através da caracterização e espacialização de elementos estruturais em maciços rochosos e determinação das feições relevantes na probabilidade de ocorrência de escorregamentos, é obtido o modelo estrutural que rege a estabilidade do talude rochoso. A intensidade das discontinuidades e o grau de alteração dos

maciços rochosos são fatores que, intensificados pela percolação da água, contribuem para o aumento da predisposição dos taludes aos escorregamentos e tombamentos de blocos (PARIZZI et al., 2009).

Segundo Coelho (2015), a presença de lineamentos estruturais em regiões onde o corte da rodovia intercepta essas estruturas, indicam a orientação preferencial das discontinuidades, sua persistência em área e suas relações geométricas frente as faces dos taludes.

O objetivo deste trabalho foi estudar os fatores que estão relacionados à ocorrência de escorregamentos nos taludes rodoviários. Para tanto foi avaliado a influência das estruturas em rocha no processo de escorregamento, buscando uma análise estrutural voltada para instabilizações, através do modelo proposto por Fiori & Carmignani (2015).

Foram determinadas as condições de estabilidade dos taludes rochosos presentes ao longo do trecho da BR-116, correspondente a Serra do Azeite, e analisado a correlação entre estabilidade dos taludes em diferentes litotipos e a compartimentação estrutural desses maciços.

### 1.1 Geologia Regional

A Serra do Azeite está inserida na porção meridional do Cinturão Ribeira (Província



Mantiqueira), no domínio tectônico do terreno Curitiba (CPRM, 2013). Os maciços nesse trecho da Serra do Mar são constituídos principalmente por rochas do embasamento representadas pelo Gnaiss Bandado Barra do Azeite e por sequências supracrustais da formação Turvo-Cajati.

O Gnaiss Bandado Barra do Azeite é composto por gnaiss migmatítico e milonítico, cinza escuro a esverdeado, constituído por biotita e hornblenda e de granulação fina a média (CPRM, 2013). Segundo os autores, a rocha apresenta bandamento gnáissico bem desenvolvido e foliação contínua com lineações de estiramento mineral nos seus planos.

A Formação Turvo-Cajati é representada na área de estudo por micaxistos e paragneisses, e secundariamente ocorrem intercalações de quartzito, mármore e rochas calciossilicáticas (FALEIROS, 2008). Segundo o autor, na porção norte da região da Serra do Azeite predominam micaxistos cinza escuro a prateado, de granulação média a grossa, composto por biotita e muscovita, com pouca granada milimétrica e localmente estaurólita e sillimanita. E na região centro-oeste da Serra do Azeite, o autor destaca a predominância de xistos grossos prateados e paragneisses porfiroblásticos, constituídos por biotita, quartzo, feldspato e comumente granada milimétrica a centimétrica. O autor destaca a presença de foliação milonítica

nessas litologias e, localmente, uma clivagem de crenulação levemente oblíqua cortando a foliação.

Ocorre também na área intercalações de biotita quartzito branco, com granulação média, e corpos lenticulares concordantes de mármore dolomítico, de granulometria grossa e com acamamento de espessura centimétrica a decimétrica (FALEIROS, 2008 e CPRM, 2013).

Na área é encontrado também o Granito Alto Jacupiranguinha que apresenta foliação milonítica e lineação bem desenvolvidas (CPRM, 2013). O granito é equigranular a porfirítico, de granulação grossa a fina, composto por quartzo, feldspato e biotita na matriz e cristais centimétricos de feldspato róseo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os taludes rochosos são potencialmente instáveis, mesmo quando não estão alterados pelo intemperismo. Pelo fato de serem susceptíveis a escorregamentos e quedas de blocos, podem causar interrupção de tráfego nas rodovias e até mesmo acidentes. Para avaliar a estabilidade desses taludes é fundamental conhecer a geometria dos blocos rochosos, que depende do padrão da orientação espacial das descontinuidades presentes no maciço rochoso, bem como do tipo de rocha e da direção das seções dos taludes.

A análise da estabilidade de maciços rochosos baseia-se no levantamento de dados estruturais, como fraturas, xistosidade, acamamento, foliação, etc., e a representação desses dados através da projeção estereográfica, permite a visualização espacial dos diversos planos e sua relação com a face livre do talude, uma vez que a ruptura somente poderá ocorrer como consequência de movimento em direção à face livre do talude. Os movimentos de blocos em maciços rochosos podem ser divididos em escorregamentos planares, escorregamentos em cunha e tombamentos de blocos (toppling).

Os escorregamentos planares ocorrem ao longo de superfícies paralelas ou subparalelas que estejam aflorantes e inclinadas na direção da face livre do talude a um ângulo superior que a do ângulo de fricção daquele plano e a um ângulo menor que o da inclinação da superfície livre do talude (Fiori e Carmignani, 2015).

O deslizamento ocorrerá na direção do mergulho, admitindo-se uma variação de 20 graus para mais ou para menos em torno dessa direção. A movimentação de blocos pode variar em função das dimensões das estruturas planares, desde juntas menores que controlam deslizamentos de dezenas de metros cúbicos de rocha a grandes deslizamentos translacionais, que envolvem dezenas de milhares de metros cúbicos.

Os escorregamentos em cunha decorrem da movimentação ao longo da intersecção de dois planos, sendo fundamental que a linha de intersecção aflore na superfície livre do talude, a uma inclinação superior ao ângulo de fricção e com uma inclinação inferior ao ângulo de mergulho do talude (Fiori e Carmignani, 2015). Esta linha de intersecção representa a direção do deslizamento e pode envolver mais de dois planos de ruptura.

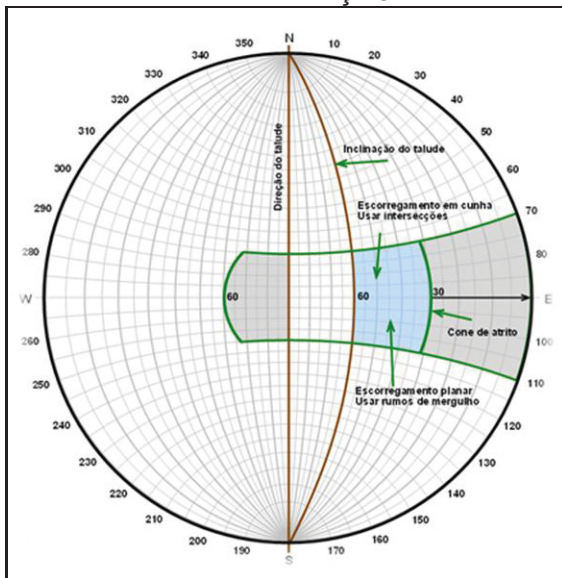
O tombamento de blocos (toppling) depende da presença de planos estruturais bem definidos e ocorre quando blocos individuais, ou um conjunto de blocos tombam sobre a face livre da vertente. As condições mais favoráveis aparecem quando duas famílias de juntas se entrecruzam, uma delas mergulhando a altos ângulos contra a face livre da vertente, e outra mergulhando no mesmo sentido da vertente, porém a baixos ângulos (Fiori e Carmignani, 2015).

Para a análise da estabilidade de taludes envolvendo blocos de rocha é elaborado um diagrama de interpretação contendo as direções da face livre do talude e dos planos de descontinuidades, o cone de atrito dimensionado em função do ângulo de fricção, da face livre do talude e de uma variação de 20 graus para mais ou para menos em torno do rumo do plano.

No diagrama de interpretação da Figura 103, as áreas em cinza representam áreas de

instabilidades para tombamentos de blocos e aquelas em azul, as áreas com possibilidade de escorregamentos planares e em cunha.

FIGURA 103 - DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO.



FONTE: modificado de Fiori (2016).

Taludes rochosos são considerados taludes finitos, contendo altura, base e topo definidos, tendo a sua estabilidade dependente da resistência ao cisalhamento ao longo do plano em que ocorrerá o escorregamento.

Quando a tensão de cisalhamento ultrapassa a resistência dos materiais ou esta diminui, os materiais perdem sua estabilidade e ocorre o deslocamento, gerando os movimentos de massa (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Segundo Fiori (2016), no cálculo do fator de segurança é considerado a coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito da rocha  $\phi$ , a área do plano de escorregamento ( $A$ ), o peso do bloco

instável ( $P$ ) e a força neutra da água atuante na base do bloco ( $U$ ). Portanto, o Fator de Segurança é dado por:

$$F_s = \frac{cA + (P \cos \theta - U) \tan \phi}{P \sin \theta}$$

Neste cálculo considerou-se um ângulo de atrito de  $30^\circ$ , normalmente adotado para rochas cristalinas, a exemplo de gnaisses, granitos e migmatitos, e da boa qualidade dos maciços rochosos analisados. A coesão e o peso específico dos maciços utilizados para o cálculo foi, respectivamente, de 40 kPa e de  $27 \text{ kN/m}^3$ , que são valores médios empregados para rochas cristalinas.

O Fator de Segurança para rupturas em cunha foi calculado com o auxílio do programa Wedge Failure Analysis (KROEGER, 1999), devido a análise ser mais complexa do ponto de vista matemático, pois considera a variação da coesão e da pressão da água atuantes ao longo dos planos de escorregamento, permitindo assim uma avaliação mais precisa do Fator de Segurança.

### 3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

Ao longo do trecho da Serra do Azeite afloram gnaisses bandados de cor cinza claro a escuro de granulação fina a média, localmente grossa, compostos por quartzo e plagioclásio nos níveis claros e hornblenda e subordinadamente biotita nos níveis escuros. O bandamento gnáissico é bem

definido, variando de milimétrico a centimétrico. A rocha apresenta foliação milonítica paralela ao bandamento, bem desenvolvida e contínua, indicada pela lineação de estiramento mineral e estruturas de pares SC.

Ocorrem ainda veios quartzo-feldspáticos centimétricos paralelos ou truncando a foliação. Localmente há porções com intensa milonitização, com a rocha apresentando-se muito dura e maciça, com granulação muito fina, bem como estrias de atrito com inclinações entre 20° e 30° indicando falha com deslocamento no sentido anti-horário.

Na área também ocorrem paragnaisses cinza de granulação fina a média com bandamento centimétrico, sendo comum a presença de dobras intrafoliares isoclinais e boudans ultramáficos com até 10 cm de comprimento.

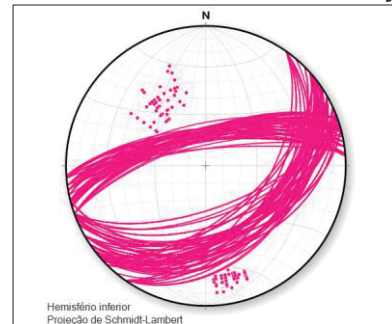
A norte da área ocorrem micaxistos cinza esverdeados de granulação fina a média, constituídos por quartzo, muscovita e biotita. Possuem foliação milonítica penetrativa e contínua paralela ao acamamento sedimentar, definida pela intercalação de níveis quartzosos e micáceos, e também a presença de lineação de estiramento mineral bem desenvolvido nesses planos.

Os maciços graníticos são de colorações rosas acinzentados, compostos por quartzo, feldspato e biotita, de granulação fina a

média e textura maciça, apresentando foliação milonítica insipiente e fraturas pervasivas ao longo do maciço. Localmente foram encontrados nesse maciço enclaves de gnaiss e migmatitos foliados.

A foliação milonítica presente nos maciços da região apresenta direção de N70-85E, variando o mergulho de 70 para NW a 50 para SE (Figura 104).

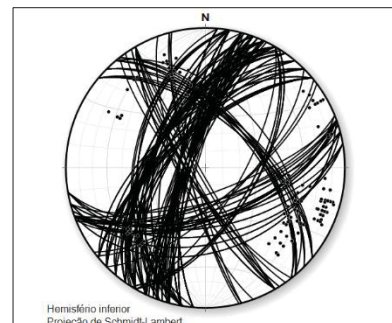
FIGURA 104 - PLANOS DE FOLIAÇÃO.



FONTE: a autora (2018).

Os maciços rochosos da área de estudo possuem três famílias principais de fraturas, as quais são responsáveis pelas instabilizações, juntamente com os planos de foliação, por meio da intersecção desses planos de fraqueza. Também ocorrem outras duas famílias de fraturas menos expressivas na região, conforme pode ser visto na Figura 105.

FIGURA 105 - FRATURAS.

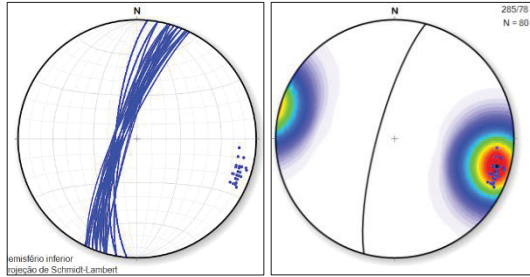


FONTE: a autora (2018).



A família 1 é penetrativa em todos os taludes do trecho estudado, e representada por uma superfície lisa e com espaçamento curto, que cruza os planos de foliação, com direção N10-20E/75NW (Figura 106).

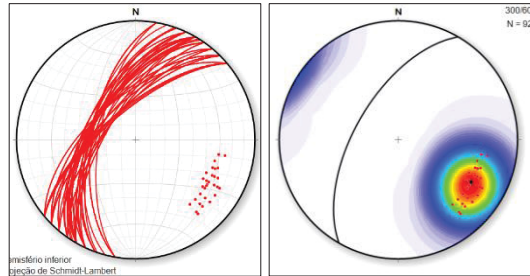
FIGURA 106 - FAMÍLIA 1.



FONTE: a autora (2018).

Já a família 2 ocorre esporadicamente e é disposta com maior espaçamento., com direção N40E/63NW (Figura 107).

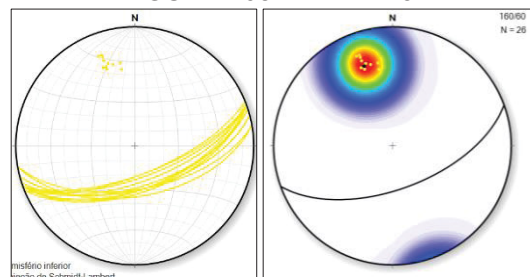
FIGURA 107 - FAMÍLIA 2.



FONTE: a autora (2018).

Localmente é encontrado a família 3 que apresenta ângulos de mergulho inferiores as outras famílias, com direção N80E/50SE (Figura 108).

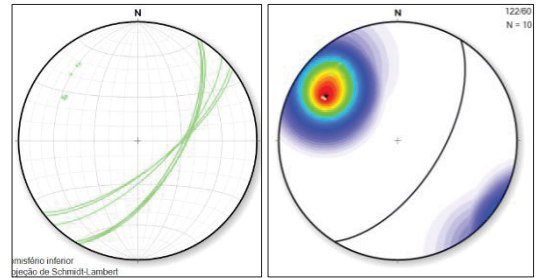
FIGURA 108 - FAMÍLIA 3.



FONTE: a autora (2018).

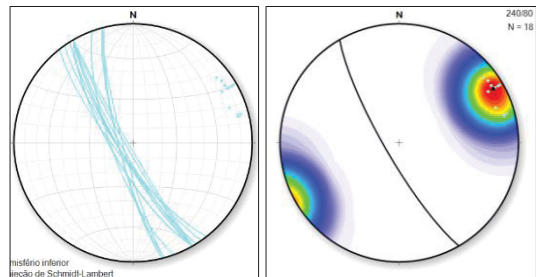
Ocorre ainda restrita a alguns pontos a família 4 de direção N30-70E/60SE (Figura 109) e a família 6 de direção N40W/60NE (Figura 111). Em alguns taludes ocorre de forma penetrativa a família 5 de direção N15-30W/70SW (Figura 110).

FIGURA 109 - FAMÍLIA 4.



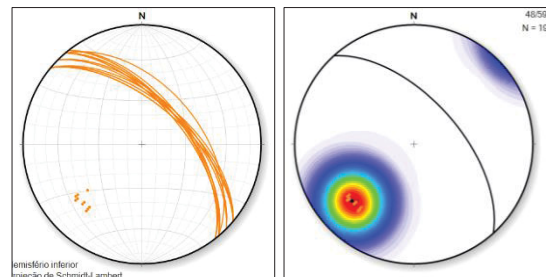
FONTE: a autora (2018).

FIGURA 110 - FAMÍLIA 5.



FONTE: a autora (2018).

FIGURA 111 - FAMÍLIA 6.



FONTE: a autora (2018).

#### 4 RESULTADOS

Os taludes rochosos apresentam estruturas intrínsecas a sua formação que condicionam o desenvolvimento de planos de fraqueza, e que são suscetíveis a escorregamentos

quando a resistência ao cisalhamento é atingida. Para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos realizou-se uma análise da compartimentação estrutural do maciço, mapeando as principais estruturas aflorantes ao longo do talude, como a foliação e as famílias de fraturas presentes nas rochas da Serra do Azeite.

Realizou-se a análise para 12 taludes presentes ao longo da BR-116, determinando-se a suscetibilidade a escorregamentos planares e em cunha.

Em alguns trechos da rodovia, a depender do corte do talude em relação à direção da rodovia, não há risco de escorregamentos. Por outro lado, ocorre pontos suscetíveis a escorregamentos planares associado as famílias 1 e 5 (Figura 112, D e E), e em menor proporção, associada aos planos da família 3 (Figura 112, C).

Há a possibilidade de ocorrer escorregamentos em cunha associados a intersecção dos planos de foliação com as fraturas da família 1 (Figura 112, B). Neste ponto, o talude tem direção EW com a face voltada para norte, e observa-se que há possibilidade de escorregamento planar associado à foliação.

Em outro ponto, o talude tem direção N10W com a face voltada para SW, e há possibilidade de escorregamento em cunha associado às intersecções dos planos da família 5 com as famílias 1 e 2 (Figura 112, D).

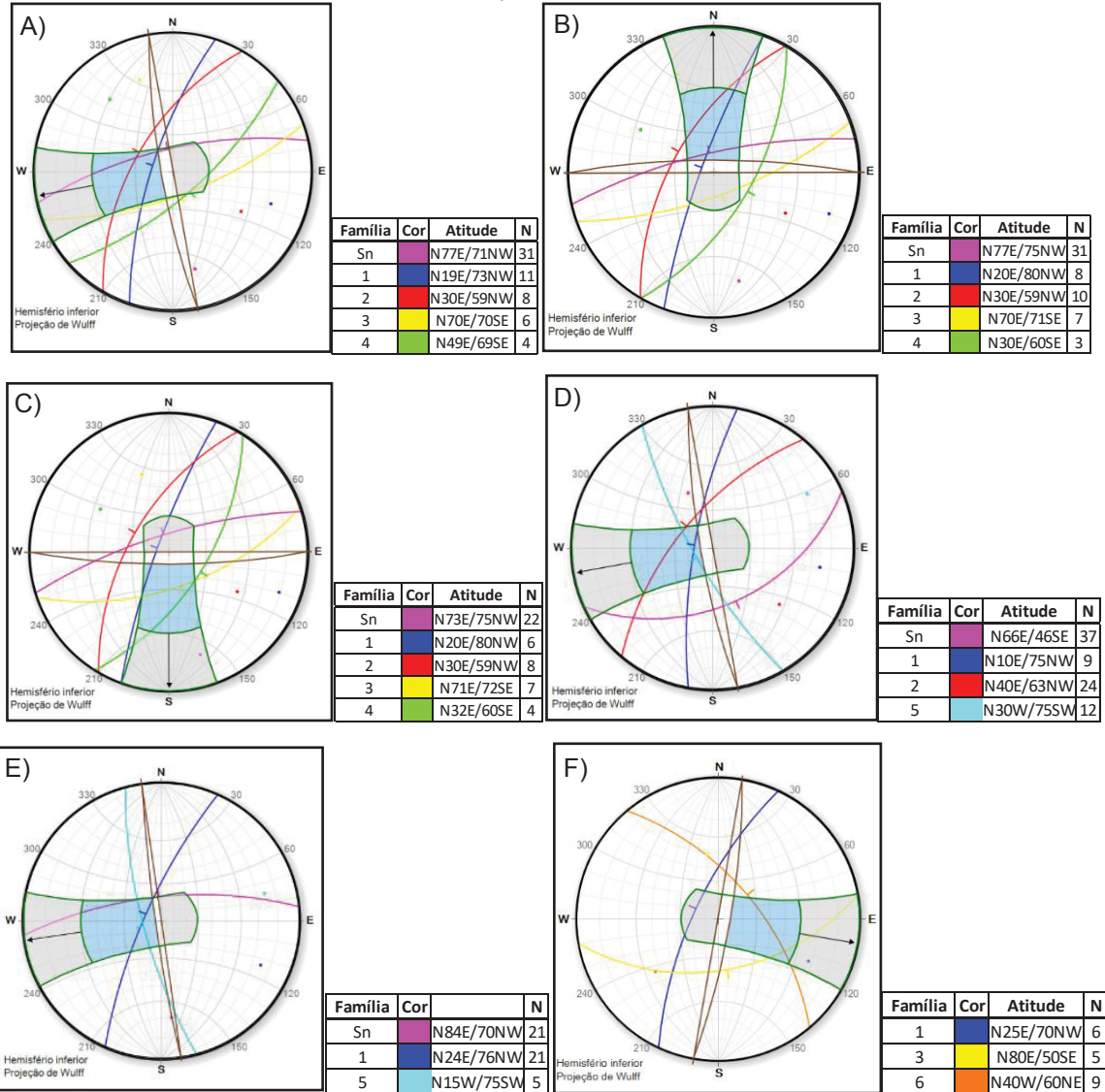
No estereograma de interpretação para outro ponto, tem talude de direção N8W com face livre voltada para SW, e observa-se que há possibilidade de escorregamento em cunha associado às intersecções da família 5 com a foliação e a família 1 (Figura 112, E).

Pode ocorrer escorregamento em cunha associado à intersecção da família 2 com a foliação, no talude de direção N10W/80SW, bem como deslizamentos planares associados aos planos da família 1. Em outro talude com direção N10E/80SE há possibilidade de escorregamento em cunha associado à intersecção das famílias 3 e 6 (Figura 112, F).

O Fator de Segurança para taludes rochosos é calculado pontualmente para cada maciço analisado, baseado no plano de descontinuidade suscetível a ruptura. Sendo assim, os dados de entrada para o cálculo são: a inclinação ( $i$ ) e altura ( $H$ ) do talude; a inclinação do plano de ruptura ( $\theta$ ); o peso específico da rocha ( $\gamma$ ) estimado em 27 kN/m<sup>3</sup>; a coesão ( $c$ ) de 40 kPa e o ângulo de atrito ( $\phi$ ) de 30° do maciço adotados para rochas cristalinas; e a altura de água ( $H_w$ ) definida como a metade da altura do maciço.

O fator de segurança em taludes rochosos suscetíveis a escorregamento planar, na condição seca está entre 1,0 - 1,8, e com água varia de 0,8 a 1,5.

FIGURA 112 - DIAGRAMAS DE INTERPRETAÇÃO PARA OS TALUDES. A) TALUDE DE DIREÇÃO N10W/80SW, B) TALUDE EW/80N, C) TALUDE EW/80S, D) TALUDE N10W/80SW, E) TALUDE N8W/80SW, F) TALUDE 10E/80SE.



FONTE: a autora (2018).

Para a ruptura em cunha, a análise é mais complexa do ponto de vista matemático, e por isso utilizou-se como ferramenta de cálculo o programa Wedge Failure Analysis (KROEGER, 1999), que considera a variação da coesão e da pressão da água atuantes ao longo dos planos de escorregamento, permitindo assim uma avaliação mais precisa do fator de segurança.

Os dados inseridos no programa são: atitudes do talude e dos planos das discontinuidades suscetíveis a escorregamento, as massas específicas da rocha (Y) e da água (Ya), os parâmetros de resistência da rocha intacta como a coesão (c) e o ângulo de atrito ( $\phi$ ), a saturação atuante no maciço.

Para os cálculos considerou-se dois cenários condicionantes nas

descontinuidades, secas e saturadas. Na condição seca o fator de segurança situa-se entre 1,3 e 2,5. Já quando saturadas ocorre a flutuação do bloco na maioria dos taludes e conseqüente escorregamento do mesmo.

#### 4 CONCLUSÕES

Com base na análise de estabilidade realizada com o diagrama de interpretação, os taludes que são suscetíveis a escorregamentos planares são associados principalmente a família de fratura 1 de atitude N10-20E/75NW, e a família 5 N15-30W/75SW. Os planos de foliação também são suscetíveis a escorregamentos planares, e em menor expressão a família 3 de atitude N71E/72SE.

Os planos associados a escorregamentos em cunha são as intersecções da família 1 (N10-20E/75NW) com a foliação, e intersecção com a família 5 (N15-30W/75SW). A família 5 também intersecta a família 2 (N40E/63NW) e a foliação, gerando cunhas nos taludes. A intersecção entre as famílias 3 (N80E/50SE) e 6 (N40W/60NE) também tem risco de formar cunhas. Em nenhum dos diagramas analisados há risco de tombamentos de blocos.

A influência das estruturas dos maciços rochosos no processo de escorregamento advém da direção e mergulhos dos planos de fraturas da família 1 que afloram na face livre da vertente para grande parte dos

taludes da rodovia, pois são planos mais propícios devido a geologia local e ao corte dos taludes favorecerem os escorregamentos tanto planares como em cunha. Os planos de fraturas das famílias 1 e 5 favorecerem o desenvolvimento de cunhas, associados também com a foliação.

As condições de estabilidade dos taludes rochosos da rodovia foram determinadas a partir da análise de diagramas de interpretação, sendo calculado o fator de segurança para os taludes sujeitos a escorregamentos planares, estando com alta suscetibilidade mesmo quando não estão saturados por água, e moderada a baixa suscetibilidade a escorregamentos em cunha quando seco, porém há risco de flutuação da cunha quando estão na presença de água, podendo causar a movimentação do bloco da cunha.

Os maciços de gnaisses e micaxistos devido a sua compartimentação estrutural, apresentam-se foliados e com fraturas pervasivas ao longo de todos os afloramentos, sendo maciços mais propensos a escorregamentos planares, mesmo não estando relacionados ao bandamento do gnaiss e xistosidade nos micaxistos. Já os maciços graníticos têm menor possibilidade de escorregamentos devido as suas descontinuidades incipientes, sem planos favoráveis ao movimento. Portanto, a correlação entre estabilidade dos taludes em diferentes



litotipos é dada pela presença de descontinuidades comuns entre os maciços e a compartimentação estrutural dos mesmos.

A partir da definição das estruturas que influenciam no processo de escorregamento na região, baseado na análise geométrica do maciço, pode-se obter um entendimento mais adequado das estruturas que influenciam no processo de escorregamento, auxiliando na avaliação dos riscos dos taludes rodoviários.

A aplicação do método de análise de estabilidade de taludes rochosos proposto por Fiori & Carmignani (2015), apresentou resultados satisfatórios na compreensão da compartimentação estrutural dos maciços, sendo uma ferramenta de auxílio para o gerenciamento de riscos e tomada de decisões.

## REFERÊNCIAS

- COELHO J. O. M. 2015. Mapeamento geológico-geotécnico pelo método de detalhamento progressivo: aplicação no planejamento e gestão de obras rodoviárias. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, São Paulo, 156p.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2013. Geologia e Recursos Minerais da Folha Eldorado Paulista. São Paulo, escala 1:100.000.
- FALEIROS F. M. 2008. Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 318p.
- FIORI A. P., CARMIGNANI L. 2015. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 3ª edição. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 576 p.
- FIORI A. P. 2016. Estabilidade de Taludes: Exercícios Práticos. Oficina de Textos, São Paulo, 176 p.
- GUIDICINI G., NIEBLE C. M. 1984. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Editorial Edgard Blucher. 2ª edição, São Paulo, 195p.
- KROEGER E.B. 1999. Slope Stability Software, 1: 1-3. Disponível em <http://www.engr.siu.edu/mining/kroeger>.
- PARIZZI M. G., SOBREIRA F. G., GALVÃO T. C. B., ELMIRO M. A. T., BEIRIGO E. A. 2009. Mecanismos de ruptura de taludes rochosos de Belo Horizonte, MG. Anais da 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE, 9p.

## 7 CONCLUSÕES

Na região da Serra do Azeite os solos são silto argilosos tornando-se arenosos mais a sul. Em se tratando dos parâmetros de resistência, os solos da região apresentam coesão entre 1 e 16 kPa e ângulo de atrito entre 24° e 31°, sendo solos pouco plásticos a não plásticos. Os solos coluvionares são encontrados no terço médio das vertentes e na porção basal das mesmas, estando os solos residuais de gnaisses e micaxistos no topo das vertentes.

O tipo de solo no qual ocorrem escorregamentos na região são solos areno argilosos a argilo siltosos que se apresentam com menor coesão (1 a 5 kPa) e ângulo de atrito entre 26° e 29°, sendo a maior parte das ocorrências de escorregamentos localizadas na área sul do trecho estudado, coincidentes com as áreas apontadas com alta suscetibilidade a escorregamentos no mapa gerado pela análise topográfica da região.

No mapa de suscetibilidade a escorregamentos em solos, verificou-se que o principal fator que determina a instabilidade da região é a declividade, sendo esta entre 20° e 45° associada a muito alta suscetibilidade e entre 8° e 20° a alta suscetibilidade. A curvatura das vertentes também influencia na propensão a escorregamentos, principalmente os planos divergentes. No mapa da área total verificou-se que a bacia a sul do trecho estudado apresenta maiores proporções de áreas com alta e muito alta suscetibilidade. Já para a faixa de domínio da rodovia, toda a extensão do trecho apresenta condições de alta suscetibilidade, decorrente de o corte dos taludes ao longo da rodovia terem inclinações altas, e na análise topográfica detalhada não foi possível separar as áreas com retaludamento dos taludes, sendo, portanto, não representativo da estabilidade da área.

Para vertentes secas os fatores de segurança que predominam são alto a muito alto, apresentando suscetibilidade a escorregamentos baixa a moderada nas áreas das bacias. Porém, quando o grau de saturação do solo atinge 20%, a suscetibilidade a escorregamentos aumenta, podendo apresentar índices de segurança menores que 1,0.

Analisando as duas escalas de mapas, a que abrange as áreas de contribuição hidrográfica das bacias da Serra do Azeite e a outra a faixa de domínio da rodovia, verificou-se que a suscetibilidade a escorregamentos em solo seco é da ordem de baixa a moderada em ambos, tornando-se, à medida que o grau de

saturação aumenta, potencialmente instáveis, apresentando classes de suscetibilidade alta a muito alta.

Os mapas de Fatores de Segurança para solo seco e para solo com 20% de saturação, na área de contribuição hidrográfica das bacias e na faixa de domínio da rodovia, mostram que os locais que apresentam índices de segurança baixo a moderado coincidem parcialmente com os pontos de escorregamentos relatados no histórico de ocorrências de instabilizações. Contudo, nos mapas para solo com 50% de saturação e solo saturado, as áreas com baixos a moderados índices de segurança coincidem com os locais instáveis apontados na análise de instabilizações.

A influência das estruturas dos maciços rochosos no processo de escorregamento advém da direção e mergulhos dos planos de fraturas da família 1 que afloram na face livre da vertente para grande parte dos taludes da rodovia, pois são planos mais propícios devido a geologia local e ao corte dos taludes favorecerem os escorregamentos tanto planares como em cunha. Os planos de fraturas das famílias 1 e 5 favorecerem o desenvolvimento de cunhas, associados também com a foliação.

As condições de estabilidade dos taludes rochosos da rodovia foram determinadas a partir da análise de diagramas de interpretação, sendo calculado o fator de segurança para os taludes sujeitos a escorregamentos planares, estando com alta suscetibilidade mesmo quando não estão saturados por água, e moderada a baixa suscetibilidade a escorregamentos em cunha quando seco, porém há risco de flutuação da cunha quando estão na presença de água, podendo causar a movimentação do bloco da cunha.

Os maciços de gnaisses e micaxistos devido a sua compartimentação estrutural, apresentam-se foliados e com fraturas pervasivas ao longo de todos os afloramentos, sendo maciços mais propensos a escorregamentos planares, mesmo não estando relacionados ao bandamento do gnaiss e xistosidade nos micaxistos. Já os maciços graníticos têm menor possibilidade de escorregamentos devido as suas descontinuidades incipientes, sem planos favoráveis ao movimento. Portanto, a correlação entre estabilidade dos taludes em diferentes litotipos é dada pela presença de descontinuidades comuns entre os maciços e a compartimentação estrutural dos mesmos.

Na região da Serra do Azeite ocorrem escorregamentos translacionais de solo e escorregamentos planares e em cunhas nos taludes rochosos. O estudo de

estabilidade em solos considera um material homogêneo e baseia-se no equilíbrio limite, sendo considerado na equação do fator de segurança a pressão que as raízes e o vento exercem sobre o solo. Por meio de ferramentas de geoprocessamento e SIG é espacializado o fator de segurança para solos, sendo a declividade o fator preponderante na distribuição do índice de segurança.

Já no estudo da estabilidade de maciços rochosos é considerado um material heterogêneo, configurado por suas descontinuidades, como as famílias de fraturas e planos de foliação. A metodologia utilizada, diferente da aplicada para solos, considera os planos de ruptura para avaliar a possibilidade de escorregamento, e posterior cálculo do fator de segurança, baseado nas características intrínsecas da rocha e do mergulho dos planos de descontinuidades. Portanto, há diferenças nas análises de estabilidade em termos de tratamento para uma mesma área que apresente tanto taludes em solo como maciços rochosos.



## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6459. 2016. Determinação de Limite de Liquidez. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 5 p.
- ABNT NBR 6484. 2001. Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 17 p.
- ABNT NBR 6457. 2016. Preparação para Amostras de Compactação e Ensaio de Caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 8 p.
- ABNT NBR 6502. 1995. Rochas e Solos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 18 p.
- ABNT NBR 7180. 2016. Determinação de Limite de Plasticidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 3 p.
- ABNT NBR 7181. 2016. Análise Granulométrica. Associação Brasileira Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 12 p.
- AMARAL C. 2003. Grau de estabilidade das vertentes da Serra do Purunã nas proximidades do falso túnel. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná.
- AMARAL JUNIOR A. F. 2007. Mapeamento geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais: Costa Verde – RJ – Escala 1:10.000. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 231 p.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2007. Manual de construção da base hidrográfica Ottocodificada: fase 1 – Construção da base topológica de hidrografia e otobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter: versão 2.0. ANA. Superintendência de Gestão da Informação SGI. Ministério do Meio Ambiente. Brasília. DF.
- APRB - AUTOPISTA RÉGIS BITTENCOURT. 2015. Relatório II de Acompanhamento, PROJETO 08 SGP/ALS\_03 REV.00 – Gestão da segurança dos taludes rodoviários da rodovia Régis Bittencourt, trecho da Serra do Mar PR-SP: estudos probabilísticos e monitoramento geológico-geotécnico para mensuração de riscos através de critérios econômicos, 50 p.
- AUGUSTO FILHO O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à Estabilização de encostas: uma proposta metodológica. Rio de Janeiro In: Conferência Brasileira Estabilidade de Encostas, 2:721-733.
- BISPO P. C., ALMEIDA C. M., VALERIANO M. M., MEDEIROS J. S., CREPANI E. 2011. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião com o uso de métodos de inferência espacial. Geociências, UNESP, 30:467-478.
- BORCHARDT N. 2005. Diagnóstico geológico-geotécnico na estabilidade de encostas do alto e médio curso da bacia do rio Sagrado. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 149 p.
- CBH-RB - Comitê da Bacia Hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul. 2011. Caderno de informações sobre a Bacia da Unidade de Gerenciamento de recursos Hídricos n° 11, 634 p.

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. 2016 – Disponível em <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>. Acessado em 02 de junho de 2016.

CHIOSSI N. J. 2013. Geologia de Engenharia. 2013. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 3ed, 422 p.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2013. Geologia e Recursos Minerais da Folha Eldorado Paulista. São Paulo, escala 1:100.000.

DALMAS F. B. 2013. Análise da evolução do uso e ocupação do solo na UGRHI-11 e a avaliação de cenários futuros em função de processos erosivos e de movimentos de massa utilizando técnicas de geoprocessamento. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 165 p.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. 1994. DNER-ME 093/94: Solos – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª ed. rev. ampl. Brasília, 353 p.

ESRI. ArcGis, versão 10.2. Environmental Systems Research Institute, 2012.

FALEIROS F. M. 2008. Evolução de Terrenos Tectono-Metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 318 p.

FERNANDES N. F., AMARAL, C. P. 2000. Movimentos de massa, uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T; Cunha, S. B. (Ed. 3) Geomorfologia e meio ambiente. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro. Cap. 3, 123-194 p.

FIORI A.P. 1995a. Estudo da estabilidade de vertentes da área de Guaraqueçaba, Paraná. Boletim Paranaense de Geociências, 43: 25-40.

FIORI A. P. 1995b. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. Boletim Paranaense de Geociência, 43: 7-24.

FIORI A. P., NUNES F. G. 2003. Áreas de risco e dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar – PR. Boletim Paranaense de Geociências, 53: 45-58.

FIORI A. P. 2016. Estabilidade de Taludes: Exercícios Práticos. Oficina de Textos, São Paulo, 176 p.

FIORI A. P., CARMIGNANI L. 2015. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 3ª. ed. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 576 p.

FREIRE E. S. M. 1965. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. Revista Construção, Rio de Janeiro, 10-18 p.

GERSCOVICH D. 2012. Estabilidade de Taludes. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 120 p.

GONZÁLEZ ACEVEDO A. M. 2017. Simulação geológico-geotécnica para avaliação de estabilidade de taludes a partir de técnicas de geoprocessamento. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 243 p.

Google Earth Pro. Imagem do Programa Google Earth Pro de 2018.

GUIDICINI G., NIEBLE C. M. 1984. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Editorial Edgard Blucher. 2ª edição, São Paulo, 195 p.

HATANAKA M., UCHIDA A. 1996. Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society, vol. 36, n. 4, 1-9 p.

HUTCHINSON J. N. 1988. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. 5n: 3-35 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cartas Topográficas Rio Guaraú e Rio Turvo. Brasília, 1987. Escala 1:50.000.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. Brasília, 2009.

INSTITUTO FLORESTAL. 2005. Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 200 p.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1981. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1991. Ocupação de encostas: manual. São Paulo, 216 p.

KOZCIAK, S. 2005. Análise determinística da estabilidade de vertentes na bacia do rio Marumbi – Serra do Mar – Paraná. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Brasil. 151 p.

KROEGER E.B. 1999. Slope Stability Software, 1: 1-3. Disponível em <http://www.engr.siu.edu/mining/kroeger>.

LIAO S. S. C., WITHMAN R. V. 1986. Overburden Correction Factors for SPT in Sand. In Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol. 112, n. 3, 373 – 377p.

NUNES F. G. 2002. Levantamento de áreas de riscos a partir da dinâmica geoambiental das encostas da Serra do Mar no Paraná. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.

PARIZZI M. G., SOBREIRA F. G., GALVÃO T. C. B., ELMIRO M. A. T., BEIRIGO E. A. 2009. Mecanismos de ruptura de taludes rochosos de Belo Horizonte, MG. Anais da 5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas – COBRAE, 9 p.

ROSSI, M. 2017. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. Instituto Florestal, São Paulo, v.1, 118 p. (inclui Mapas).

SHARPE C. F. S. 1938. Landslides and related phenomena – study of mass movements of soil and rock. Columbia University Press, New York, 120 p.

SCHNAID F. 2000. Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 189 p.

SILVEIRA C. T., FIORI A. P., SCHILIPACK P., DIAS S. M. 2014. Mapeamento Preliminar da Suscetibilidade Natural a Movimentos de Massa da Serra do Mar Paranaense Apoiado na

Análise Digital do Relevo. In: Revista Brasileira de Geomorfologia, v.15, n.1, (Jan-Mar) p.3-22.

STROUD M. A. 1989. The Standard Penetration Test- Its Application and Interpretation. Proc. I.C.E. Conf. on Penetration Testing, Inglaterra, Londres.

TABALIPA N.L. 2008. Mapeamento geoambiental do Município de Pato Branco, Paraná, como ferramenta para o planejamento territorial e ambiental. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná.

TEIXEIRA M. A. 2012. Avaliação da suscetibilidade á ocorrência de deslizamentos translacionais superficiais. Utilização de modelos matemáticos de base física na bacia de Tibo, Arcos de Valdevez, Portugal. Dissertação de Mestrado em Sistemas de informação Geográfica e ordenamento do Território, Faculdade de Letras, Universidade do Porto.

TERZAGHI K.1953. Mecanismo dos escorregamentos de terra. Instituto de pesquisas Tecnológicas de São Paulo, separata n°467, tradução de Ernesto picheler. Mechanism of landslides: in paige, S., Chairman, Applications or geology in engineering practice: Geol. Soc. America Berkey, 83-123 p.

TONUS B. P. A. 2009. Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, 147 p.

VALERIANO M.M., ROSSETTI D.F. 2009. TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE.

VANACOR R. N. 2006. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 132 p.

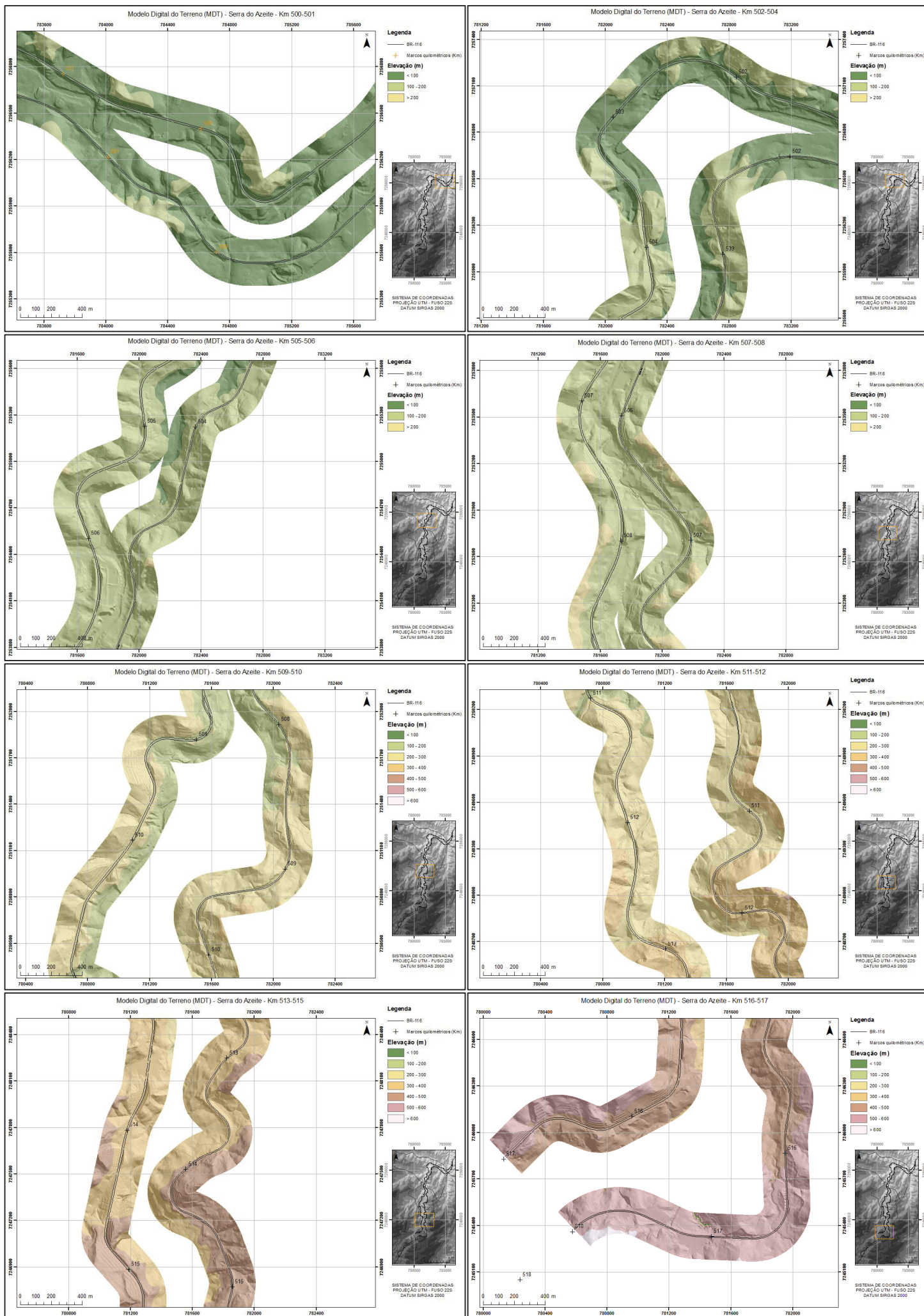
VARNES D. J.1978. Slope movements: types and processes – landslides analysis and control. Washington: National Academy of Sciences, 11-13 p.

VAZ, A. P. M. S. 2014. Estudo de áreas suscetíveis a escorregamentos em sub-bacia do Rio São João, BR 376 entre os km 665 e 668. Dissertação de mestrado. PPGG. UFPR.

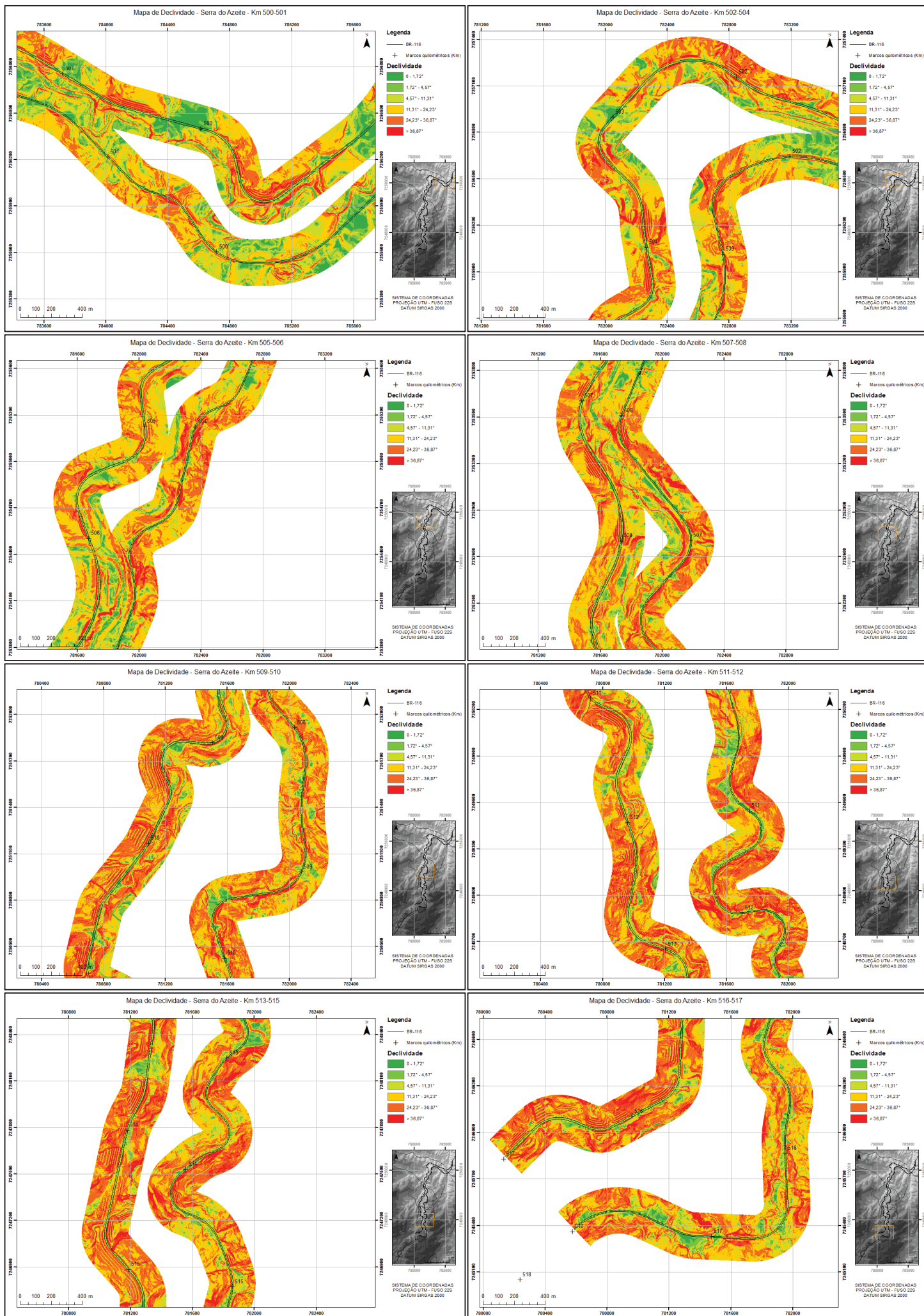
WOLLE C. M., PEDROSA J. A. B. 1981. Horizontes de transição condicionam mecanismo de instabilização de encosta na Serra do Mar. In: Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia, 3, Itapema, SC, 2: 121-135.



APÊNDICE 1 – MODELO DIGITAL DE TERRENO PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA

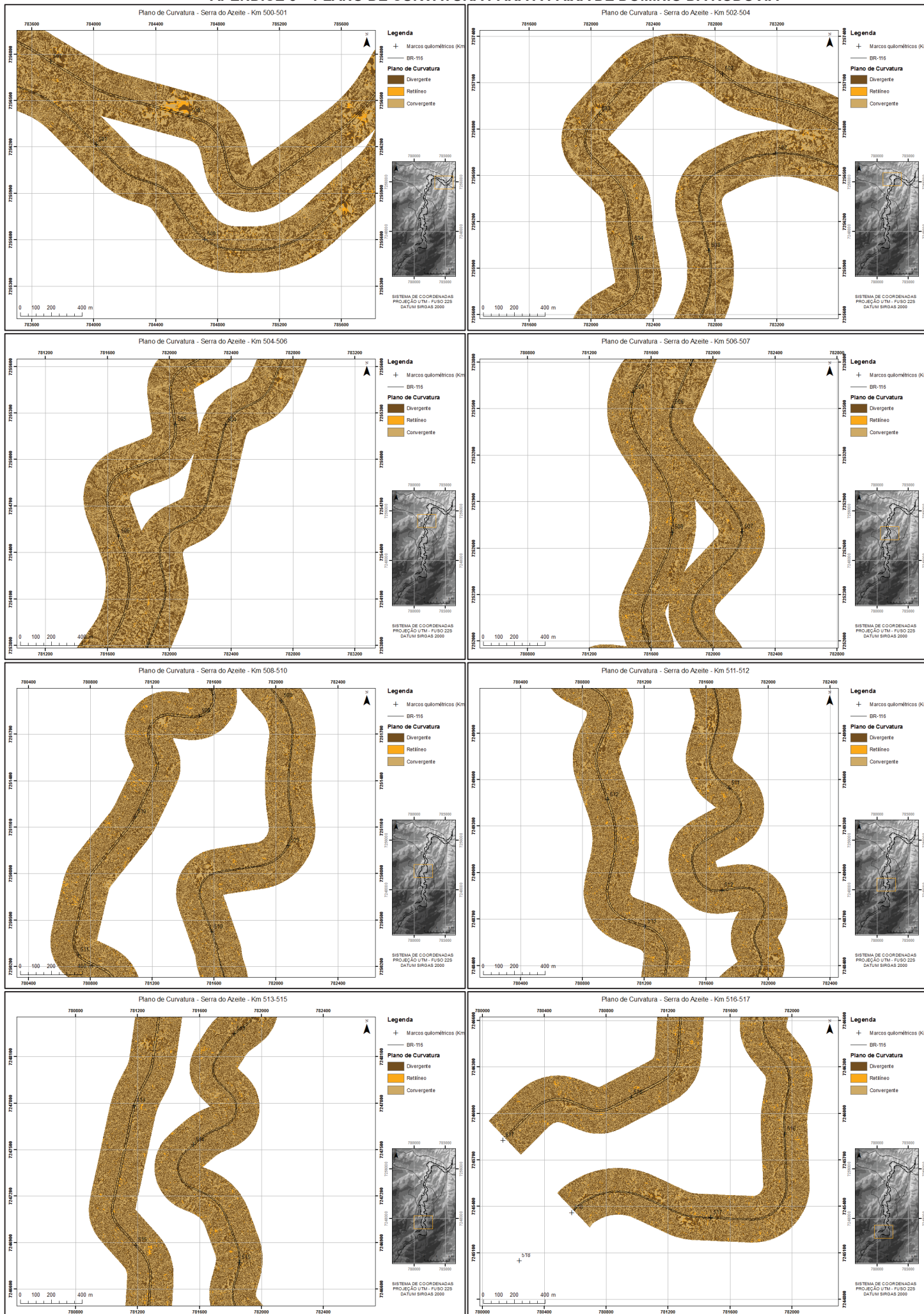


APÊNDICE 2 – MAPAS DE DECLIVIDADE PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA





APÊNDICE 3 – PLANO DE CURVATURA PARA A FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA



APÊNDICE 4 – SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS DA FAIXA DE DOMÍNIO DA RODOVIA

