

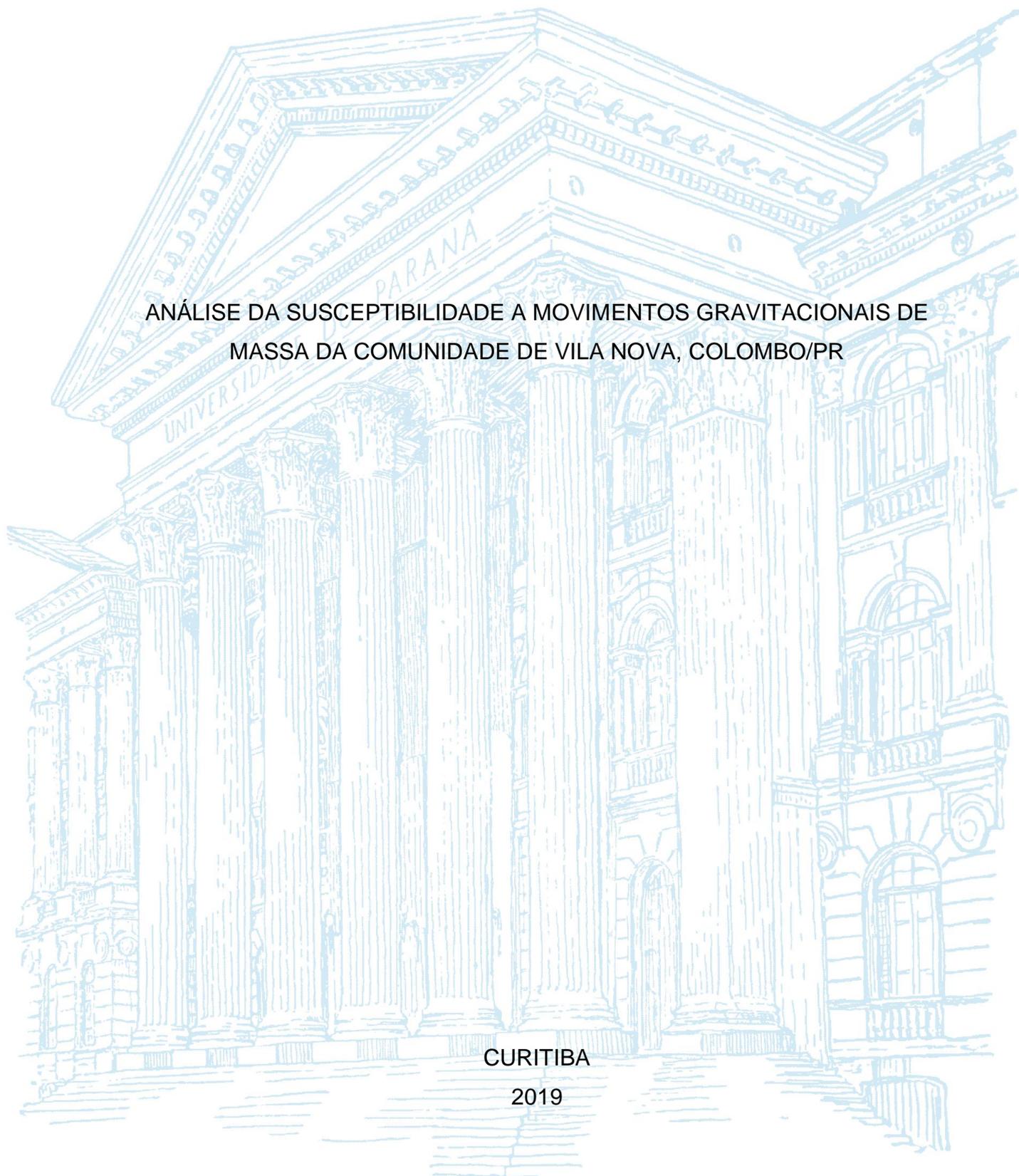
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLA VIEIRA PONTES

ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE
MASSA DA COMUNIDADE DE VILA NOVA, COLOMBO/PR

CURITIBA

2019



CARLA VIEIRA PONTES

ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE
MASSA DA COMUNIDADE DE VILA NOVA, COLOMBO/PR

Trabalho Final de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Roberta Bomfim Boszczowski

Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Ercolin Filho

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

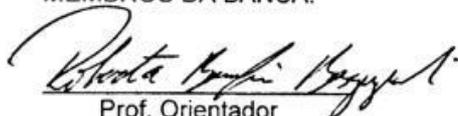


Ministério da Educação
Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Construção Civil

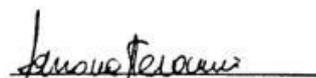
Ata da reunião da Banca Examinadora do TRABALHO DE FINAL DE CURSO, da aluna **CARLA VIEIRA PONTES** realizada em 16/12/2019.

Às 9 horas do dia 16 de dezembro de dois mil e dezenove, na sala LDC do CESEC no Centro Politécnico, realizou-se a reunião da Banca Examinadora do Trabalho Final de Curso da aluna **CARLA VIEIRA PONTES**, formada pelos professores ROBERTA BOMFIM BOSZCZOWSKI, ADRIANA TALAMINI e VITOR PEREIRA FARO, logo após a apresentação do trabalho com título "ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA DA COMUNIDADE DE VILA NOVA, COLOMBO/PR". Depois de algumas deliberações e comentários, os professores deram o grau para o aluno. Posteriormente, foi calculada a média, sendo então confirmado o seguinte grau: 100 (com) para a aluna **CARLA VIEIRA PONTES**. Nada mais havendo a tratar, a reunião foi encerrada, da qual eu, ROBERTA BOMFIM BOSZCZOWSKI lavrei a presente ata, que será assinada por mim e pelos demais membros da Banca.

MEMBROS DA BANCA:


Prof. Orientador
ROBERTA BOMFIM BOSZCZOWSKI


Prof. Co-Orientador
LEONARDO ERCOLIN FILHO


Prof. ADRIANA TALAMINI


Prof. VITOR PEREIRA FARO

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Roberta Bomfim Boszczowski, pelos conhecimentos conceituais e técnicos transmitidos e pela paciência e disponibilidade que sempre apresentou para solucionar minhas dúvidas ao longo da pesquisa.

Ao professor Leonardo Ercolin Filho pelo interesse e auxílio na aquisição da base cartográfica e pelas sugestões de melhorias deste documento.

À professora Adriana Talamini pelas admiráveis e objetivas contribuições durante a defesa e, então, revisão deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos meus amigos Cleyton Stresser e Lucas Zorzan, sem os quais não seria possível coletar e ensaiar a amostra indeformada. Cleyton, obrigada pelas ajudas nas idas à campo e por sempre ter permanecido disponível a me conceder apoio técnico e emocional. Lucas, obrigada pelas ajudas na realização do ensaio de cisalhamento direto, pela revisão deste texto e por tanto ter emocionalmente me apoiado nessa reta final. Aproveito para agradecer aos envolvidos no Laboratório de Ensaio Especiais da Fugro.

À Marianne Bayerl pelas dicas de geoprocessamento e, assim como a Kemmylle Sanny, a Marina Naim e a Adhara Palácio, tanto terem me ensinado e inspirado em quesitos técnicos e pessoais, enquanto minhas chefes e mentoras nos estágios e grupo de estudo que participei na graduação.

Aos professores de Geotecnia Vítor Faro e Eduardo Dell'Avanzi pelas preciosas transmissões de conhecimento científico e pelas inestimáveis conversas sobre a vida.

Aos moradores de Vila Nova pela receptividade e paciência com as nossas visitas de campo. É por e para vocês que este trabalho é dedicado.

Aos membros do Grupo de Estudo em Geotecnia pela amizade e parceria e ao Grupo por ter sido a minha maior fonte de aprendizado e amadurecimento social e acadêmico durante essa etapa da minha formação profissional.

Às minhas amigas Rafaela Komar, Larissa Fernandes e Ana Bonamigo pelos momentos de descontração e leveza ao longo desse ano. À Rondivânia Ferreira por tanto cuidado e preocupação com o meu bem-estar nessa reta final.

À minha mãe Marina e ao meu pai João Carlos por terem me apoiado sem cessar na concretização deste objetivo. Ao meu irmão Wagner e à minha irmã Aline por sempre terem me incentivado. Às minhas tias pelo carinho de sempre. Eu amo todos vocês.

RESUMO

O número de movimentos gravitacionais de massa registrados no Brasil aumentou significativamente a partir da segunda metade do século XX, fato este associado ao intenso, desordenado e socioeconomicamente excludente processo de urbanização do país neste período. O presente trabalho apresenta o estudo referente à análise da susceptibilidade dos terrenos de um trecho da comunidade de Vila Nova, no município de Colombo, Paraná, a movimentos gravitacionais de massa – especificamente escorregamentos translacionais rasos. Os trabalhos realizados em campo e em laboratório fundamentaram-se em uma metodologia qualitativa de mapeamento de risco geológico-geotécnico, baseada na análise de feições e de indícios de escorregamentos pretéritos e potenciais e na análise da vulnerabilidade das residências da área piloto, e em uma metodologia quantitativa clássica de análise de estabilidade de taludes, baseada no método de Equilíbrio Limite (Talude Infinito). Um levantamento topográfico utilizando a técnica de aerofotogrametria foi realizado no local a fim de se obter, de maneira prática e com considerável acurácia, as coordenadas planialtimétricas do terreno. Ensaios de caracterização física e de resistência ao cisalhamento foram conduzidos em laboratório para auxiliar na estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos mais fragilizados de Vila Nova e posterior análise de estabilidade dos seus taludes com ferramentas de geoprocessamento. No reconhecimento das condições de uso e ocupação do solo, foi possível observar as intensas e perigosas intervenções antrópicas nas vertentes da comunidade, como a realização de cortes e aterros com geometria e compacidade inadequados, disposição de resíduos sólidos ao longo dos taludes e intensa remoção da cobertura vegetal. Durante a mesma fase de mapeamento, identificou-se cicatrizes de escorregamentos translacionais rasos associados a solos superficiais de aterro e solos residuais. Identificados os perigos associados às condições físicas do terreno que denotem a sua predisposição à ocorrência de escorregamentos e identificados os graus de vulnerabilidade das ocupações frente às movimentações de massa, foi possível classificá-los e correlacioná-los para elaboração de um produto cartográfico que representasse as intensidades qualitativas de risco a escorregamentos de terra ao longo da comunidade. Reconhecidos o tipo de movimento de massa mais recorrente na área, bem como os materiais envolvidos nele, determinou-se três cenários de mapas de fatores de segurança representativo de um solo de aterro, com base em dados da literatura, variando-se as profundidades mais recorrentes da superfície de ruptura, e três cenários considerando parâmetros de resistência de um solo residual ensaiado do local, também se variando as profundidades de ruptura mais comuns. Por meio das duas análises empregadas, foi possível identificar áreas mais ou menos susceptíveis a escorregamentos translacionais rasos e quantificar, com razoável assertividade, a quantidade de residências instaladas nas áreas de risco muito alto. Pretende-se, com o presente estudo, fornecer subsídios técnicos a órgãos de gerenciamento de áreas de risco e de ordenamento do uso e ocupação do solo na tentativa da resolução de problemáticas geotécnicas enfrentadas em Vila Nova.

Palavras-chave: Escorregamentos translacionais. Susceptibilidade. Risco. Mapeamento. Vila Nova.

ABSTRACT

The mass gravitational movements number registered in Brazil increased significantly from the second half of twentieth century, a fact associated with the intense, disordered and socioeconomically exclusive process of urbanization in the country in this period. The present work presents the study regarding the analysis of the susceptibility of the terrains of a section of the Vila Nova community, in the municipality of Colombo, Paraná, to mass gravitational movements - specifically shallow translational landslides. The work carried out in the field and in the laboratory were based on a qualitative methodology of mapping geological-geotechnical risk, based on the analysis of features and indications of past and potential landslides and on the analysis of the vulnerability of the residences in the pilot area, and on a classic quantitative methodology for the analysis of slope stability, based on the Limit Equilibrium method (Infinite Slope). A topographic survey using the aerophotogrammetry technique was carried out at the site in order to obtain, in a practical way and with considerable accuracy, the planialtimetric coordinates of the terrain. Physical characterization and shear strength tests were conducted in the laboratory to assist in the estimation of the shear strength parameters of the most fragile soils in Vila Nova and subsequent analysis of the stability of its slopes with geoprocessing tools. In recognizing the conditions of use and occupation of the soil, it was possible to observe the intense and dangerous anthropic interventions in the community, such as making cuts and embankments with inadequate geometry and compactness, disposal of solid waste along the slopes and intense removal of vegetal cover. During the same mapping phase, scars from shallow translational landslides associated with topsoil and residual soils were identified. Having identified the dangers associated with the physical conditions of the terrain that show their predisposition to the occurrence of landslides and identified the degrees of vulnerability of the occupations in relation to mass movements, it was possible to classify them and correlate them for the elaboration of a cartographic product that represented the qualitative intensities of risk to landslides throughout the community. Once the most recurrent type of mass movement in the area was recognized, as well as the materials involved in it, three scenarios of safety factor maps representative of a landfill ground were determined, based on data from the literature, varying the depths more recurring rupture surface, and three scenarios considering resistance parameters of a tested residual soil from the site, also varying the most common rupture depths. Through the two analyzes employed, it was possible to identify areas more or less susceptible to shallow translational landslides and to quantify, with reasonable assertiveness, the number of residences installed in areas of very high risk. The aim of the present study is to provide technical support to bodies that manage risk areas and to organize land use and occupation in an attempt to solve geotechnical problems faced in Vila Nova.

Keywords: Translational landslides. Susceptibility. Risk. Mapping. Vila Nova.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo na comunidade Vila Nova.....	18
Figura 2 - Vista panorâmica da Encosta W ocupada por edificações construídas sem critérios técnicos de urbanização e engenharia	19
Figura 3 – (a) Deposição e acúmulo de resíduos sólidos urbanos no sopé de um aterro; (b) Padrão de edificação e ocupação: palafita sobre o leito do córrego.....	20
Figura 4 - Esquema de um perfil típico de solo residual.....	22
Figura 5 - Perfil genérico de uma encosta tropical submetida à escorregamento de terra	23
Figura 6 - Mapa de lineamentos estruturais da Bacia Sedimentar de Curitiba. Em vermelho, a região estudada.....	24
Figura 7 - Mapa geológico e hidrográfico geral da região onde se localiza Vila Nova	26
Figura 8 - Alguns dos movimentos gravitacionais de massa que acometem terrenos brasileiros.....	30
Figura 9 – Principais fatores predisponentes e deflagradores de movimentos gravitacionais de massa.....	31
Figura 10 - Envoltória real e de Mohr-Coulomb de resistência ao cisalhamento.....	45
Figura 11 - Mecanismo de funcionamento e ruptura de um ensaio de cisalhamento direto	46
Figura 12 - Esquema e forças consideradas no método do Talude Infinito.....	50
Figura 13 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho	52
Figura 14 - Posicionamento dos instrumentos na prensa de Cisalhamento Direto utilizada.....	57
Figura 15 - Equipamentos utilizados no levantamento topográfico: (a) Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para aerolevanteamento; (b) GPS900CS para georeferenciamento	69
Figura 16 - Mapa topográfico do trecho de estudo de Vila Nova.....	70
Figura 17 - Modelo Digital do Terreno estudado de Vila Nova	71
Figura 18 - Mapa de declividade de Vila Nova.....	73
Figura 19 – Ideal Área de Preservação Permanente (APP) em Vila Nova.....	74

Figura 20 - Localização dos pontos de identificação de afloramentos de solo e coleta de amostras.....	75
Figura 21 – Coleta da amostra indeformada de solo residual diretamente nas células de cisalhamento. (a) poço e profundidade de coleta; (b) detalhe da amostra amarela esverdeada com veios argilosos	77
Figura 22 - Perfil de alteração de solo residual típico de Vila Nova (complexo gnáissico migmatítico) – afloramento R-2	78
Figura 23 - Perfil de alteração de solo residual, sobreposto à camada de aterro e de matéria orgânica. Presença de material movimentado (colúvio) - afloramento R-1 ..	78
Figura 24 - Afloramentos de solo de aterro em Vila Nova	79
Figura 25 - Afloramento de xisto do Complexo Gnáisse-Migmatito: (a) fraturas paralelas e transversais ao talude formando cunhas; (b) fraturas perpendiculares ao talude.....	82
Figura 26 - Curvas granulométricas dos solos ensaiados	84
Figura 27 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 200 kPa durante a técnica de reversão	86
Figura 28 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 100 kPa durante a técnica de reversão	87
Figura 29 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 50 kPa durante a técnica de reversão	87
Figura 30 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 25 kPa durante a técnica de reversão	88
Figura 31 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para os valores de tensões cisalhantes máximas dos primeiros cisalhamentos.....	88
Figura 32 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para os valores de tensões cisalhantes máximas dos últimos cisalhamentos	89
Figura 33 - Deslizamentos registrados em Vila Nova entre outubro de 2018 e dezembro de 2019	92
Figura 34 - Mapa de registros de deslizamentos de terra recentes em Vila Nova	94
Figura 35 - Carta de susceptibilidade a deslizamentos de terra – análise qualitativa	103
Figura 36 - Carta de risco a deslizamentos de terra – análise qualitativa	105

Figura 37 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 1 referente ao solo de aterro	110
Figura 38 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 2 referente ao solo de aterro	111
Figura 39 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 3 referente ao solo de aterro	112
Figura 40 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 4 referente ao solo residual	114
Figura 41 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 5 referente ao solo residual	115
Figura 42 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 6 referente ao solo residual	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição do solo residual em função da rocha mãe	22
Quadro 2 – Exemplo de classificação e conceituação de graus de risco	37
Quadro 3 - Coleta de amostras de solo.....	56
Quadro 4 - Qualificação do grau de perigo, baseada em critérios topográficos, referente ao processo de deslizamento de terra	61
Quadro 5 - Qualificação do grau de perigo, baseada em indícios de instabilidade do terreno, referente ao processo de deslizamento de terra, independente da classificação topográfica de perigo	62
Quadro 6 – Descrição das classes de perigo de acordo com critérios topográficos e de feições de instabilidade	63
Quadro 7 – Descrição das classes de vulnerabilidade das ocupações quanto ao padrão construtivo e materiais empregados.....	64
Quadro 8 - Graus de intensidade de risco baseados na interação entre intensidade de perigo e graus de vulnerabilidade	65
Quadro 9 – Descrição das classes de risco	65
Quadro 10 - Indícios de instabilidade e verificação de vulnerabilidade	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de declividade dos terrenos de Vila Nova.....	72
Tabela 2 – Resultados da caracterização física do solo R-CIS.....	82
Tabela 3 – Resultados da caracterização física do solo R-W	83
Tabela 4 – Resultados da caracterização física do solo de aterro	83
Tabela 5 - Velocidades adotadas no ensaio de Cisalhamento Direto com reversão.	85
Tabela 6 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico (primeiros cisalhamentos)	89
Tabela 7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento residuais (últimos cisalhamentos)	90
Tabela 8 - Parâmetros geotécnicos utilizados nos cenários de suscetibilidade a deslizamento planar por meio do modelo do Talude Infinito	107

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
1.3.1 Aspectos urbanísticos e socioeconômicos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 PERFIL DE INTEMPERISMO	21
2.2 ASPECTOS FÍSICOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	24
2.3 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA	27
2.3.1 Tipos de movimentos	27
2.3.2 Fatores predisponentes e deflagradores	30
2.4 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA APLICADA A DESLIZAMENTOS DE TERRA..	34
2.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS	37
2.5.1 Métodos semi-empíricos	38
2.5.1.1 Inventário de deslizamentos	39
2.5.1.2 Abordagem heurística.....	39
2.5.2 Métodos analíticos de determinação da segurança de taludes	40
2.5.2.1 Resistência ao cisalhamento dos solos	41
2.5.2.2 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb	43
2.5.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto	45
2.5.2.4 Talude Infinito	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.....	53
3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA.....	54
3.2.1 Mapeamento de campo.....	55
3.2.2 Ensaio de laboratório.....	56
3.3 ANÁLISE DE SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS.....	58
3.3.1 Histórico dos processos de movimentos gravitacionais de massa	58
3.3.2 Avaliação de perigo, vulnerabilidade e risco	59

3.3.2.1 Identificação e classificação de perigo	60
3.3.2.2 Identificação e classificação de vulnerabilidade	64
3.3.2.3 Classificação de risco	64
3.3.3 Análise de fatores de segurança	66
4 RESULTADOS.....	68
4.1 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS.....	68
4.1.1 Mapa topográfico.....	68
4.1.2 Modelo Digital do Terreno (MDT)	70
4.1.3 Mapa de declividade.....	71
4.1.4 Área de Preservação Permanente (APP).....	73
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO GEOTÉCNICA	74
4.2.1 Reconhecimento de campo.....	75
4.2.1.1 Solos residuais de gnaiss migmatito.....	75
4.2.1.2 Solos de aterro	79
4.2.1.3 Afloramento rochoso.....	81
4.2.2 Ensaio de laboratório.....	82
4.2.2.1 Caracterização física	82
4.2.2.2 Resistência ao cisalhamento	84
4.3 SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA – ANÁLISE QUALITATIVA	90
4.3.1 Cadastro das feições de movimentos gravitacionais de massa	90
4.3.2 Identificação e classificação de perigos e vulnerabilidades.....	94
4.3.3 Carta de susceptibilidade à escorregamentos.....	101
4.3.4 Carta de risco à escorregamentos.....	104
4.4 SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA – ANÁLISE QUANTITATIVA	106
4.4.1 Mapa de fatores de segurança para o solo de aterro.....	108
4.4.2 Mapa de fatores de segurança para o solo residual.....	113
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	117
6 CONCLUSÕES	122
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
REFERÊNCIAS.....	126
ANEXO 1 – FICHA DE CAMPO	131

1 INTRODUÇÃO

Dentre os desastres naturais que mais atingem, em número de pessoas, a população brasileira, destacam-se os movimentos de massa gravitacionais. Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC; CEDEP, 2013), durante os anos de 1991 e 2012, os deslizamentos e corridas de terra e detritos, rolamentos de blocos de rocha e solapamentos de terrenos atingiram 1,79% da população brasileira, mas foi responsável por 15,60% dos óbitos causados por todos os tipos de desastres naturais (estiagens e secas, enxurradas, inundações e alagamentos, erosões e vendavais) ocorridos e registrados no período analisado. De acordo com as informações obtidas pela Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC) de 2017, durante os anos de 2013 e 2017, 833 municípios brasileiros, isto é, 15% dos municípios do país, foram atingidos por movimentos de massa de solos, rochas ou detritos em taludes e encostas, sendo a maior concentração de ocorrências na região sul (24,8% do total registrado) (IBGE, 2017).

Desastre, segundo CASTRO (1998), é o resultado de eventos adversos, naturais ou antrópicos, sobre um ecossistema frágil causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais. Apesar do mesmo autor definir como desastres naturais os desequilíbrios do meio físico causados exclusivamente por fenômenos intrínsecos à natureza e, desastres humanos, aqueles provocados exclusivamente por ações antrópicas, adotar-se-á no presente trabalho a designação de desastre natural para se referir aos desastres que ocorrem na natureza influenciados, isto é, intensificados ou deflagrados, por ações antropogênicas, assim como adotado por Kobiyama et al. (2006).

Apesar dos movimentos gravitacionais de massa serem fenômenos geológicos naturais – que podem ocorrer em qualquer área de alta declividade por ocasião de, sobretudo, chuvas intensas e prolongadas (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2004) – a intervenção humana, especialmente as que não consideram as limitações hidromecânicas do meio físico, podem desequilibrar o sistema de forças existentes no interior da massa de solo, rocha ou detrito, que o mantém em equilíbrio estático. Adiante no presente trabalho, uma revisão sobre os agentes envolvidos na deflagração de deslizamentos de terra é apresentada.

No Brasil, o aumento na incidência de escorregamentos de terra verificados a partir da década de 1960 estão associados, conforme observado por autores como

Nakazawa et al. (1991), Robaina (2008), Tominaga (2007) e Santos (2014), à ocupação inadequada de encostas naturais como resultado do desordenado e intenso processo de urbanização das metrópoles iniciado em meados do século XX. Segundo os dados compilados pelo CEPED/UFSC (2013), do total dos desastres registrados entre 1991 e 2013, 22% ocorreram na década de 1990 e 56% na década de 2000, crescimento coincidente com o aumento da população e da urbanização brasileira. Esse processo também foi marcado pela exclusão sócio espacial dos municípios, isto é, as melhores condições de relevo e localização foram e ainda são destinadas àqueles que detêm de maior capital, enquanto as áreas susceptíveis a desastres naturais foram ocupadas pelos marginalizados da elite econômica e educacional (CASSETI, 1991). De acordo com os dados do MUNIC 2017, nos municípios com ocorrência de escorregamentos e deslizamentos de encostas entre 2013 e 2017, as áreas com taludes e encostas sujeitas a escorregamentos, isto é, suscetíveis a tais fenômenos, representavam 61,9% dos registros, as com ocupações irregulares 39,5% e sem infraestrutura de drenagem 35,5%, corroborando com a assertiva de que as características intrínsecas ao meio físico, o padrão de ocupação e a ausência de infraestrutura, principalmente às que se referem à drenagem de águas pluviais, são condicionantes de movimentos gravitacionais de massa (IBGE, 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

Após os severos e repercutidos movimentos de massa que atingiram o estado de Santa Catarina em 2008 causando a morte de 135 pessoas e a Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011 levando à óbito mais de 900 pessoas, a União sancionou a Lei Federal nº12.608 de 2012 que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). A PNPDEC abrange ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação voltadas à proteção e defesa civil quanto a desastres naturais, devendo ser integrada às políticas de ordenamento territorial, de conservação do meio ambiente e entre outras, para promoção do desenvolvimento sustentável dos municípios (BRASIL, 2012).

Dentre às competências que a PNPDEC delegou aos municípios, especialmente aqueles sujeitos à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos, apoiados pela União, pelos Estados e pela sociedade civil, a que aqui se destaca como

justificativa e objetivo do presente trabalho é “Promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência” (BRASIL, 2012).

Tal objetivo diz respeito ao mapeamento das áreas suscetíveis a esses processos geológico-geotécnicos e/ou hidrológicos, o qual deve ser consubstanciado em uma carta geotécnica de susceptibilidade, dirigido a áreas ocupadas e não ocupadas. Como produto final, prevê-se a elaboração de uma carta geotécnica de aptidão à urbanização que estabeleça diretrizes urbanísticas voltadas à segurança da população (BRASIL, 2012). No caso de verificada a existência de ocupações em áreas mapeadas como suscetíveis a processos físicos de grande impacto, o município deve adotar providências para redução do risco, dentre as quais, a execução de plano de contingência e de obras de segurança e, quando necessário, a remoção de edificações e o reassentamento dos ocupantes em local seguro (BRASIL, 2012).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo pretende identificar e analisar as características topográficas, geológicas, geotécnicas e de ocupação de uma parcela da comunidade de Vila Nova, em Colombo, Paraná, que denotem ameaça à deflagração de movimentos gravitacionais de massa. A finalidade é mapear as áreas mais passíveis à instabilidade geomecânica e elaborar um produto cartográfico que contribua com órgãos públicos responsáveis pelo gerenciamento de áreas de risco geológico-geotécnico e de ordenamento de uso e ocupação do solo da comunidade baseado na segurança do terreno tendo em vista a conservação, recuperação e proteção da mata ciliar, dos recursos hídricos e, sobretudo, das vidas humanas envolvidas.

1.2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos desta pesquisa, destacam-se:

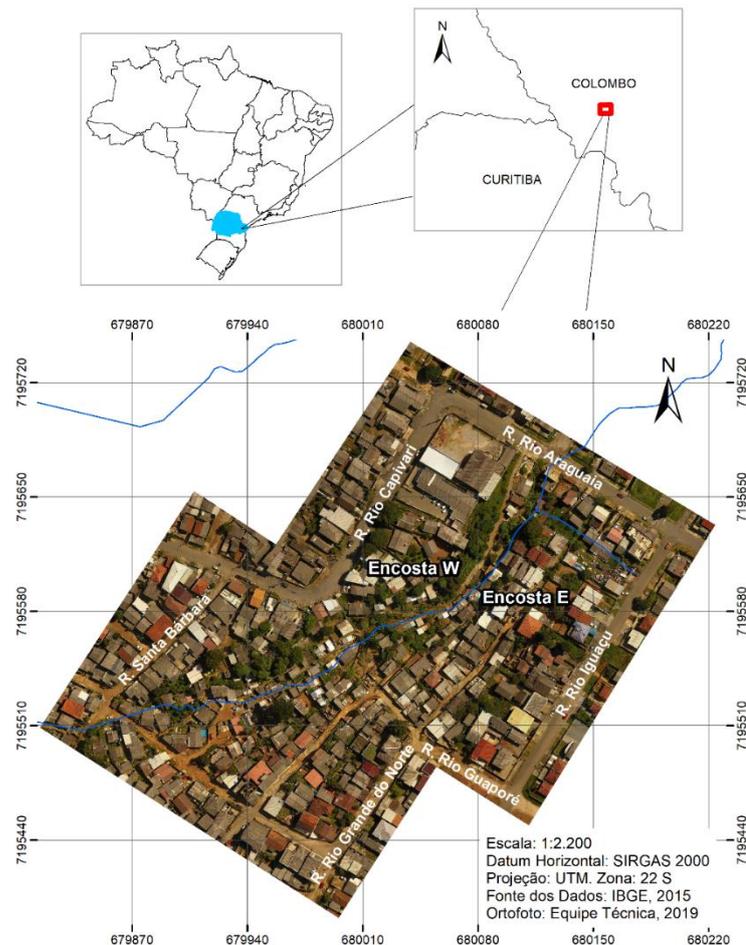
- 1) Reconhecer as principais e mais fragilizadas unidades pedológicas locais;

- 2) Reconhecer as feições de instabilização de taludes e as características do padrão de ocupação urbana;
- 3) Elaborar produtos cartográficos qualitativos de susceptibilidade e risco ao movimento gravitacional de massa mais recorrente na área;
- 4) Elaborar produtos cartográficos quantitativos de susceptibilidade ao movimento gravitacional mais recorrente na área;
- 5) Quantificar as áreas e residências que apresentem maior susceptibilidade e vulnerabilidade a movimentos de terra.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo pretende mapear riscos geológico-geotécnicos de parte da comunidade popularmente denominada por Vila Nova, situada no bairro de Roça Grande, no município de Colombo, Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no estado do Paraná, nas proximidades da PR-417 (Rodovia da Uva). É delimitada pelas ruas Rio Araguaia, Rio Iguaçu, Rio Guaporé, Rua Rio Grande do Norte e pela Rua Santa Bárbara, em uma área de aproximadamente 48,5 mil m². O mapa de localização da área de estudo encontra-se na Figura 1. Para facilitar a descrição e o entendimento do leitor acerca da localização de determinadas áreas da comunidade, denominar-se-á a encosta à esquerda da drenagem retratada na Figura 1 como Encosta W e a encosta à direita do córrego como Encosta E.

Figura 1 – Localização da área de estudo na comunidade Vila Nova



Fonte: A autora (2019).

1.3.1 Aspectos urbanísticos e socioeconômicos

De acordo com os dados obtidos das Enquetes de Caracterização Socioeconômicas (ECS) aplicadas pela ONG TETO Brasil aos moradores da comunidade, a ocupação individual da comunidade de Vila Nova se iniciou há cerca de 30 anos, quando o local ainda era coberto por vegetação nativa, existindo, no ano de 2017, mais de 300 módulos habitacionais. A quantidade de moradias condiz com o inventário realizado em imagem obtida pelo aerolevante aplicado no local no ano de 2019 como parte do escopo do presente trabalho.

Segundo o Plano Diretor do município de Colombo, a partir de 2004 Vila Nova tornou-se área de interesse social devido aos assentamentos precários que lá se encontram, apesar de assente a um vale de elevada declividade e presença de um corpo d'água no fundo do vale.

Dentre as problemáticas urbanas no interior do setor analisado, destacam-se a inexistência de adequadas e regularizadas redes de distribuição de água tratada, de coleta de esgoto, de distribuição de eletricidade e de pavimentação, além do baixo padrão construtivo das residências instaladas sem critérios técnicos de engenharia. Dentre as ambientais, destacam-se o despejo de dejetos, sem o devido tratamento prévio, diretamente ao córrego que permeia a comunidade e a intensa deposição de resíduos sólidos domésticos ao longo das vertentes e do corpo hídrico. As Figura 2 e Figura 3 apresentam aspectos gerais das condições de uso e ocupação do solo encontradas no local.

Figura 2 - Vista panorâmica da Encosta W ocupada por edificações construídas sem critérios técnicos de urbanização e engenharia



Fonte: A autora (2019).

Figura 3 – (a) Deposição e acúmulo de resíduos sólidos urbanos no sopé de um aterro; (b) Padrão de edificação e ocupação: palafita sobre o leito do córrego



Fonte: A autora (2019).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PERFIL DE INTEMPERISMO

Os solos consistem nos produtos resultantes do intemperismo físico e químico que age sobre as rochas presentes na crosta terrestre. São encontrados em uma variada gama de formato, tamanho, granulometria e mineralogia (SCOTT, 1963), sendo suas propriedades hidráulicas e mecânicas dependentes, essencialmente, das características físicas e químicas da rocha que lhe deu origem e da sua história de tensões já experimentadas em campo. No Brasil, é comum a formação de solos residuais e coluvionares ao longo de encostas e aluvionares em vales de rios e lagos.

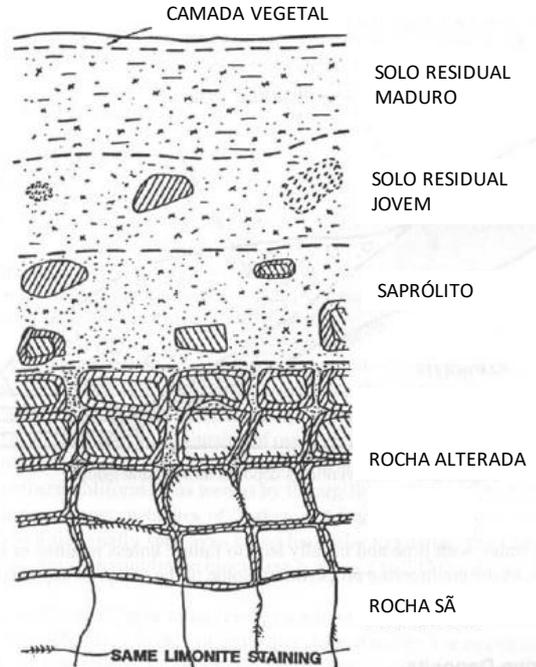
- Solos residuais

Os solos residuais são produtos diretos dos processos de intemperismo que ocorrem nas rochas, caracterizando-se por permanecerem sobrejacentes à rocha que lhe deu origem. São comuns em locais de clima quente e úmido, que favorece a degradação química das rochas, e com vegetação suficiente para mantê-los em seu local de formação sem serem transportados por agentes erosivos, tais como o vento e a chuva (LAMBE; WHITMAN, 1969). Este é o caso de grande parcela dos solos brasileiros.

Devido ao fato de serem acumulados no seu local de formação e à ação do intemperismo, majoritariamente, causado pela ação da água superficial e subsuperficial, um perfil residual pode apresentar diferentes horizontes de solo com variações nas suas características hidromecânicas (ABRAMSON et al., 2001). Na região mais superficial, onde se encontra um alto grau de intemperismo, as feições geológicas são completamente destruídas e não identificáveis. Esta camada é designada de solo residual maduro ou simplesmente solo residual (GERSCOVICH, 2016). Subjacente a ela, pode-se observar uma camada de solo residual jovem, ou saprólito, onde é possível identificar algumas características estruturais da rocha de origem como dobras, veios intrusivos, xistosidades e outros, que influenciam sobremaneira na sua anisotropia e resistência mecânica. Pode-se observar, ainda, uma camada de rocha alterada onde observa-se nitidamente a manutenção de grande parte das características físicas e químicas da rocha-mãe

(GERSCOVICH, 2016). Um perfil típico de alteração de solo residual pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema de um perfil típico de solo residual



Fonte: Adaptado de ABRAMSON et al. 2001.

Como as características físico-químicas dos solos residuais dependem, evidentemente, da composição mineralógica da rocha que lhe deu origem (rocha mãe), apresenta-se, no Quadro 1, alguns exemplos simplificados da composição de solos formados a partir de diferentes tipos de rocha.

Quadro 1 - Composição do solo residual em função da rocha mãe

Rocha	Tipo de solo
Basalto	Argiloso
Quartzito	Arenoso
Filito	Argiloso
Granito	Arenoargiloso (micáceo)
Calcário	Argiloso
Gnaisse	Siltoso e micáceo

Fonte: GERSCOVICH, 2016.

- Solos coluvionares

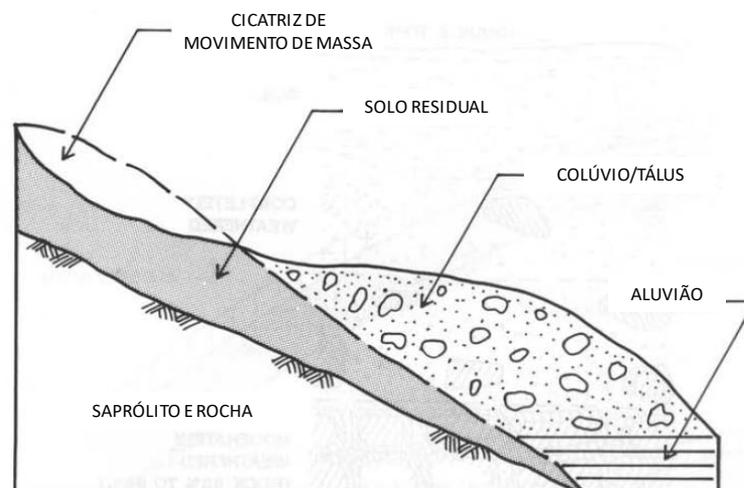
Os colúvios e os tálus também são produtos do intemperismo físico-químico das rochas, mas são caracterizados por terem sido transportados pela ação da gravidade e depositados em partes mais baixas em relação ao seu local de formação (ABRAMSON, 2001). Possuem uma resistência mecânica consideravelmente menor que a do seu solo de origem, justamente por já ter sido intensamente alterados quanto à sua estrutura física. São materiais heterogêneos, por terem sido movimentados, podendo apresentar grandes fragmentos de rocha (tálus) imersos na matriz de solo (colúvio).

- Solos aluvionares

Os solos aluvionares são solos transportados por águas correntes, como rios e mares, e que foram depositados em uma região topograficamente mais baixa quando a velocidade do fluxo deste fluido não foi mais suficiente para transportá-los (ABRAMSON, 2001). Depósitos fluviais, aluviões transportados pela ação do fluxo de água dos rios típicos de fundos de vales, podem possuir uma expressiva gama de granulometria de solos, podendo variar de cascalhos a coloides de argila, e, no geral, apresentam baixa resistência mecânica.

Na Figura 5 apresenta-se um perfil típico de uma encosta de países de clima tropical com expressivas extensões de relevos montanhosos, como é o caso do Brasil (MASSAD, 2003), submetido a um escorregamento de massa de solo. Observa-se a presença de saprólito, solo residual, colúvio e tálus e depósito aluvionar.

Figura 5 - Perfil genérico de uma encosta tropical submetida à escorregamento de terra



Fonte: Adaptado de ABRAMSON, 2001.

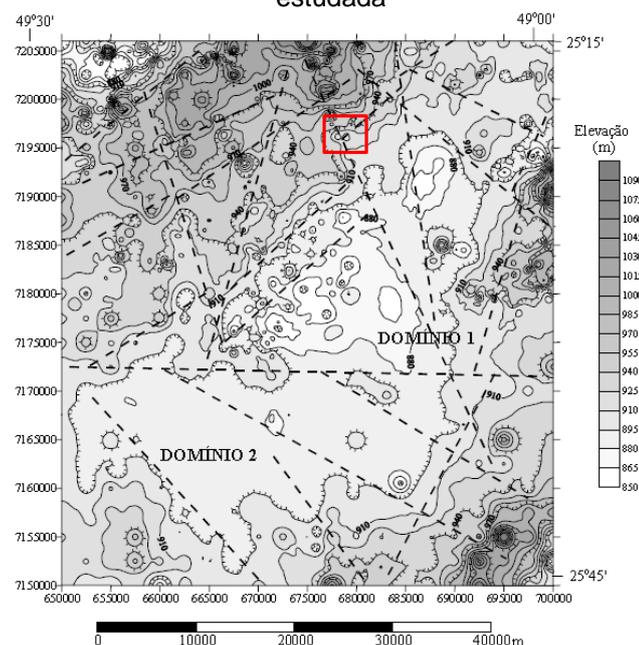
2.2 ASPECTOS FÍSICOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Curitiba e a sua região metropolitana localizam-se no Primeiro Planalto Paranaense, sendo o município de Colombo localizado sobre a subunidade morfoescultural do Planalto de Curitiba. Esta unidade, segundo o Atlas Geomorfológico do Paraná (2006), elaborado sob a escala 1:250.000, apresenta dissecação média com declividades predominantemente menores que 6%, mas com presença de topos aplainados e alongados, vertentes convexas e vales em “V”.

Nas regiões mais baixas do Planalto de Curitiba é onde se encontram os depósitos aluvionares, formados no período Quaternário, e os depósitos sedimentares da Formação Guabirota e da Formação Tingui, formados no período Terciário, que compõe a Bacia Sedimentar de Curitiba. Nas partes mais altas da bacia formam-se os solos residuais e afloram-se as rochas do seu embasamento cristalino, formado no período Proterozóico, que a contorna em toda a sua extensão. É sobre o maior embasamento cristalino da Bacia de Sedimentar de Curitiba, o Complexo Gnáissico Migmatítico, Complexo Costeiro ou Complexo Atuba, que se localiza a comunidade de Vila Nova (SUDERSHA, 2000, MINEROPAR, 2005).

A área estudada situa-se assente à uma das prováveis falhas geológicas mapeadas por Salamuni (1998) (Figura 6), falhamentos geomorfológicos esses que ocorrem, em geral, sob as direções NE-SW e NW-SE.

Figura 6 - Mapa de lineamentos estruturais da Bacia Sedimentar de Curitiba. Em vermelho, a região estudada



Fonte: Salamuni (1998).

De origem ígnea e formadas no período proterozóico inferior, as rochas do Complexo Atuba são de médio a alto grau metamórfico (gnaisses) (FIORI e SALAMUNI, 2012), sendo essas, essencialmente, gnaisses e migmatitos, mas também ocorrendo paragnaisses, quartzitos, quartzo xistos, micaxistos, anfibolitos e gnaisses-granitos (SALAMUNI, 1998). Na unidade migmatítica do embasamento cristalino da Bacia de Curitiba, os corpos de rochas ricos em minerais pesados, especificamente magnésio e ferro, atribuem coloração esverdeada e granulometria média à grossa aos maciços. Às vezes, essas rochas apresentam-se intensamente deformadas quando associadas a lineamentos geológicos, adquirindo aspecto xistoso e brilho sedoso (FIORI; SALAMUNI, 2012). Veios de quartzo em zonas de cisalhamento são relativamente frequentes nas rochas desse complexo (FIORI; SALAMUNI, 2012). Segundo Salamuni (1998), o intemperismo nessas rochas produziu material síltico-arenoso ou exclusivamente arenoso.

A principal característica estrutural do Complexo Atuba é a ocorrência de superfícies penetrativas normalmente orientadas para as direções NE-SW, com altos ângulos de mergulho (maiores do que 45°), de caimento ora para NW ora para SE (SIGA JUNIOR et. al, 1995). De modo geral, as rochas do Complexo Atuba conferem uma grande resistência ao substrato geológico de Curitiba e Região Metropolitana, tornando-o muito estável e, quando não intemperizadas, com possibilidades quase nulas de deslocamento, mesmo quando submetido a cargas elevadas (FIORI; SALAMUNI, 2012).

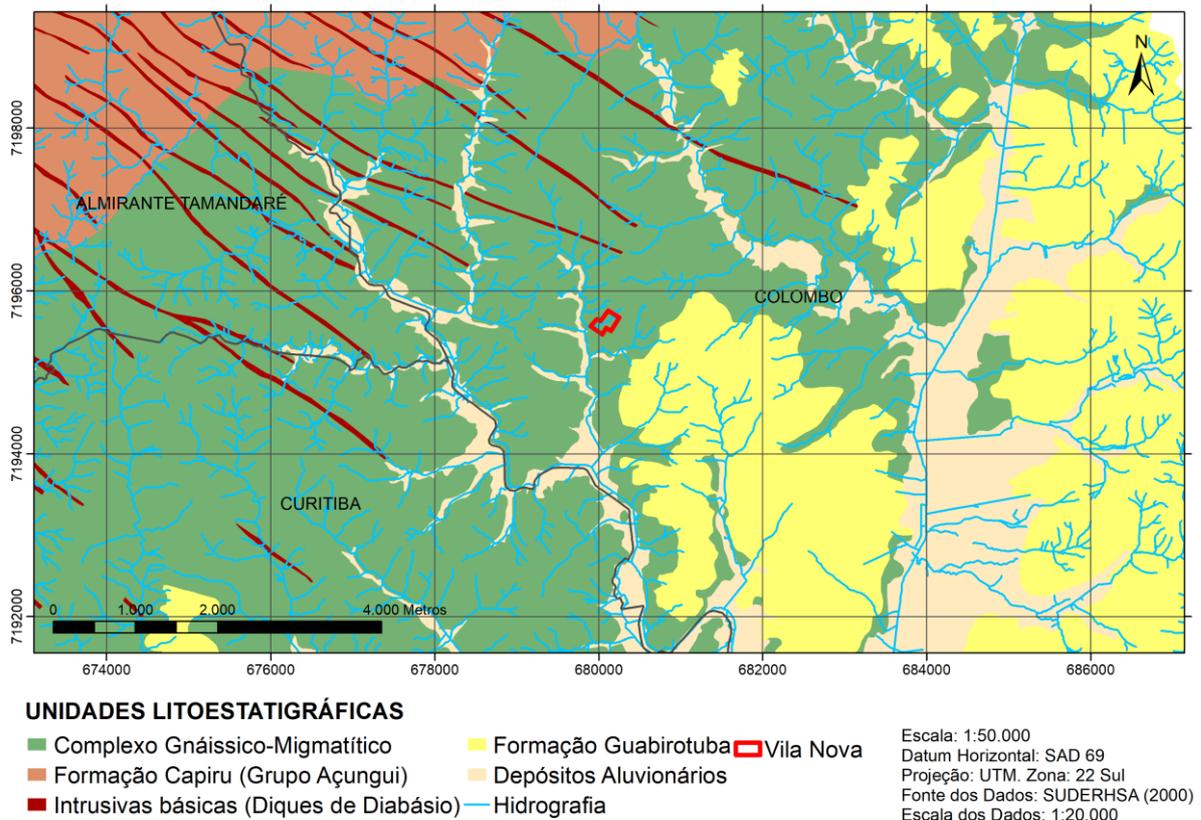
Quanto à hidrografia, a região onde está localizada Vila Nova compõe a sub-bacia hidrográfica Manjolo Cabeceira, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Atuba, do Alto Iguaçu (SUDERSHA, 2000). A bacia do Rio Atuba compreende uma área de 33,8 km² no município de Colombo e o seu rio principal, que dá origem a seu nome, se junta ao Rio Irai no município de Curitiba formando o Rio Iguaçu (PREFEITURA DE COLOMBO, 2018).

Uma base de dados georreferenciados fornecidos pelo Instituto das Águas do Paraná (SUDERSHA, 2000) na escala 1:20.000, permitiram confeccionar o mapa geológico e hidrográfico básico da região de onde localiza-se Vila Nova, apresentado na Figura 7. Destaca-se a ocorrência da Formação Guabirotuba (sedimentos da Bacia Sedimentar de Curitiba), bem como da Formação Capiru, de depósitos aluvionares

recentes e de rochas intrusivas (diques de diabásio) nas proximidades, além do próprio Complexo Gnaissico-Migmatítico.

Quanto à pedologia do complexo Gnaissico-Migmatítico, predominam-se os solos residuais formados sobrejacentes ao embasamento cristalino, mas também são encontrados colúvios na porção inferior das encostas, separados do solo residual por veios de quartzo de espessuras centimétricas (FIORI e SALAMUNI, 2012). Segundo Fiori e Samaluni (2012), o solo coluvionar do Complexo Atuba é frequentemente siltoso, de coloração castanha clara a amarela, com espessuras inferiores a 1 m. A camada de solo residual jovem apresenta espessuras frequentemente inferiores a 5 m, de cores avermelhadas e textura argilosa, com predomínio de caulinita e gibsite entre os argilo-minerais. O saprólito geralmente apresenta bandamento, veios de quartzo e xistosidade, dados pelo alinhamento das micas, herdados da rocha-mãe. É de cor rósea a amarelada, argiloso, com predominância da caulinita, e em menores proporções a illita.

Figura 7 - Mapa geológico e hidrográfico geral da região onde se localiza Vila Nova



Fonte: A autora (2019).

2.3 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Talude é a denominação que se atribui a superfícies inclinadas que delimitam um maciço de solo e/ou de rocha em um terreno (GERSCOVICH, 2016). Eles podem ser naturais, como as encostas de montanhas e vales, ou construídos, como os aterros para construção de barragens. Os naturais podem ser constituídos por solo residual e/ou coluvionar e rocha (GERSCOVICH, 2016). Os construídos podem ser resultantes de um corte em uma encosta natural, como para construção de estradas, constituídos de materiais pré-selecionados, devidamente caracterizados e analisados, como nas barragens, ou constituídos de materiais de bota-fora sem estudos prévios acerca das suas características geomecânicas. Por se tratarem de uma superfície não horizontal, parte do peso próprio do material (solo e/ou rocha) tende a deslocá-lo para baixo (LAMBE; WHITMAN, 1969), gerando forças desestabilizadoras.

De modo geral, os movimentos gravitacionais de massa, especialmente os deslizamentos de terra, são fenômenos complexos resultantes da combinação de múltiplos fatores, tais como geologia, hidrologia, topografia, condições climáticas e de intemperismo (SKEMPTON, 1969), agravadas pela atuação antrópica. Raramente há um único e definitivo fator condicionante. Por ser uma temática que acarreta em prejuízos ambientais, sociais e econômicos, é de grande importância se estudar o fenômeno de instabilidade de um talude para tentar prevenir a sua deflagração.

2.3.1 Tipos de movimentos

O fenômeno de ruptura de um talude pode envolver diferentes movimentos, diferentes materiais, sob diferentes velocidades e superfícies de ruptura. Ao se modelar um problema de estabilidade de talude deve-se, mandatoriamente, tentar prever qual o tipo de movimento gravitacional envolvido para que a representação física do fenômeno e as formulações matemáticas utilizadas na determinação do seu nível de segurança representem com razoável acurácia as condições de campo.

Dentre as classificações dos movimentos gravitacionais de massa propostas por diversos pesquisadores, destaca-se a Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) (BRASIL, 2016), que classifica os movimentos de massa entre quedas, tombamentos e rolamentos, deslizamentos, corridas de massa e subsidências e colapsos. Todos eles ocorrem sob ação da aceleração da gravidade. Nas aléneas a

seguir apresenta-se um levantamento das características gerais do movimento, dos materiais e da geometria dos principais grandes grupos de movimentos de massa que acometem terrenos brasileiros, baseado em definições de Varnes (1978), Augusto Filho (1992) e COBRADE (BRASIL, 2016).

a) As quedas, os tombamentos e os rolamentos estão associados, majoritariamente, a materiais rochosos no formato de lascas e blocos. As quedas são desprendimentos de massas de rocha e/ou solo que se destacam de taludes íngremes em um movimento brusco e de alta velocidade – em queda livre. Os tombamentos são movimentos de rotação de uma massa de material em torno de um eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa desprendida. Os rolamentos são movimentos de rotação e translação de blocos rochosos ao longo de seu próprio eixo e de uma superfície inclinada, respectivamente. De modo geral, podem ser resultantes da pré-existência de descontinuidades e fraturas que são expostas à ação do intemperismo que degrada e diminui a resistência mecânica da estrutura mineralógica original; à elevação do nível d'água ou à infiltração de águas pluviais que aumentam o carregamento local devido à ação da pressão hidrostática e diminuem a tensão efetiva do material; à perda de confinamento lateral e possível desestabilização mecânica; a trabalhos subterrâneos de mineração que geralmente induzem carregamentos dinâmicos não drenados ou pela combinação desses e outros fatores deflagradores.

b) Os deslizamentos são movimentos relativamente rápidos e de curta duração caracterizados pela formação de uma ou mais superfícies de ruptura bem definidas sob as quais ocorre o deslizamento de uma massa de material dita ativa sobre uma massa de material dita estática. As superfícies de ruptura situam-se em uma estreita faixa (zona de cisalhamento) onde desenvolvem-se grandes deformações cisalhantes. Podem ocorrer em taludes compostos por solo, rocha, resíduos sólidos urbanos e outros. Conforme as condições geomorfológicas, geológicas e pedológicas, a geometria da superfície de ruptura pode ser planar, circular, em cunha ou mista (combinação de superfícies circulares e planas). As duas superfícies básicas, plana e circular, são apresentadas nas subalíneas por comporem as demais situações.

b.1) Os escorregamentos planares ou translacionais são caracterizados por ocorrerem sob uma superfície de ruptura plana geralmente paralela à superfície livre do talude. Tendem a ocorrer em solos nos contatos entre as camadas que constituem sua estratigrafia – contato solo-solo ou contato solo-

rocha – devido à considerável diferença de resistência ao cisalhamento dos dois materiais, e em maciços rochosos em planos de fraqueza pré-existent, como em descontinuidades, fraturas, nas direções das suas xistosidades, foliações e afins. São característicos de solos pouco espessos, como mantos de solo residual de pequena espessura sobrejacentes a uma camada de solo, saprólito ou embasamento rochoso de maior resistência (GERCOVICH, 2016).

b.3) Os escorregamentos circulares são caracterizados pela rotação de uma massa de solo ativa em torno de um eixo imaginário ao longo de uma superfície de ruptura circular convexa. Geralmente ocorrem em solos homogêneos com a formação de degraus de abatimento próximo à crista, conforme observado na ilustração da Figura 8 (d). Ademais, podem ser múltiplos, isto é, mobilizar mais de uma superfície de ruptura de maneira regressiva, quando as rupturas evoluem ao longo do tempo no sentido da crista, ou progressiva, quando evoluem no sentido do pé do talude.

Geralmente, devido tanto à heterogeneidade estratigráfica de um talude quanto, principalmente, à sua resistência, os deslizamentos de terra tendem a ocorrer sob superfícies de ruptura poligonais planas ou mistas (planas e circulares), podendo ainda estar associados a diferentes movimentos translacionais ou circulares (rupturas sob superfícies múltiplas). Adiante se apresentam alguns dos agentes internos e externos que desencadeiam a ocorrência desse tipo de movimento, que ocorrem com maior frequência em solos brasileiros.

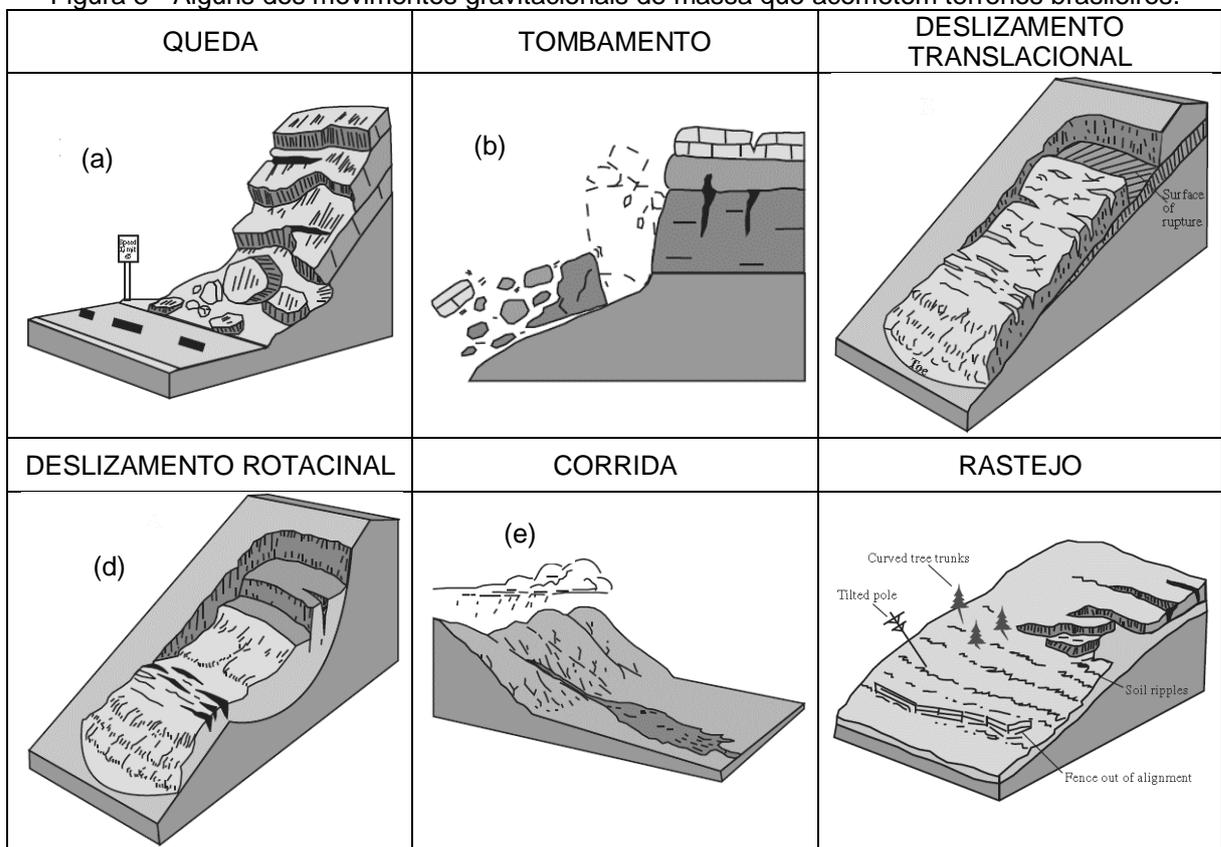
c) As corridas são movimentos descendentes de solo, rocha, e/ou detrito e água de alta velocidade e de maneira fluidizada. Geralmente ocorre sob condições saturadas em solos não coesivos ou em argilas sensíveis quando estas são amolgadas (alteram-se a sua estrutura física) ocasionados por solicitações dinâmicas (atividades de mineração, terremotos etc) e o material passa a se comportar como um fluído.

d) Os rastejos (ou fluência), não definidos pelo COBRADE (BRASIL, 2016) são movimentos descendentes, lentos e contínuos da massa de solo ou rocha de um talude sem uma superfície de ruptura bem definida e, conseqüentemente, distinção clara entre a massa em movimento e a região estável. O mecanismo de deformação

se assemelha de um líquido muito viscoso e se inicia quando o material atinge a tensão de fluência, a qual é menor que a resistência ao cisalhamento, não ocasionando a sua brusca ruptura. São ocasionados, majoritariamente, pela ação da gravidade e por variações de térmicas e de umidade. Ocorrem geralmente em horizontes superficiais de solo e de transição solo/rocha, como também em rochas alteradas e fraturadas. Podem englobar grandes áreas até mesmo um talude todo.

e) As subsidências ou colapsos são afundamentos rápidos ou graduais do terreno devido ao colapso de cavidades, redução da porosidade do solo ou deformação de material argiloso.

Figura 8 - Alguns dos movimentos gravitacionais de massa que acometem terrenos brasileiros.



Fonte: Adaptado de Varnes (1978).

2.3.2 Fatores predisponentes e deflagradores

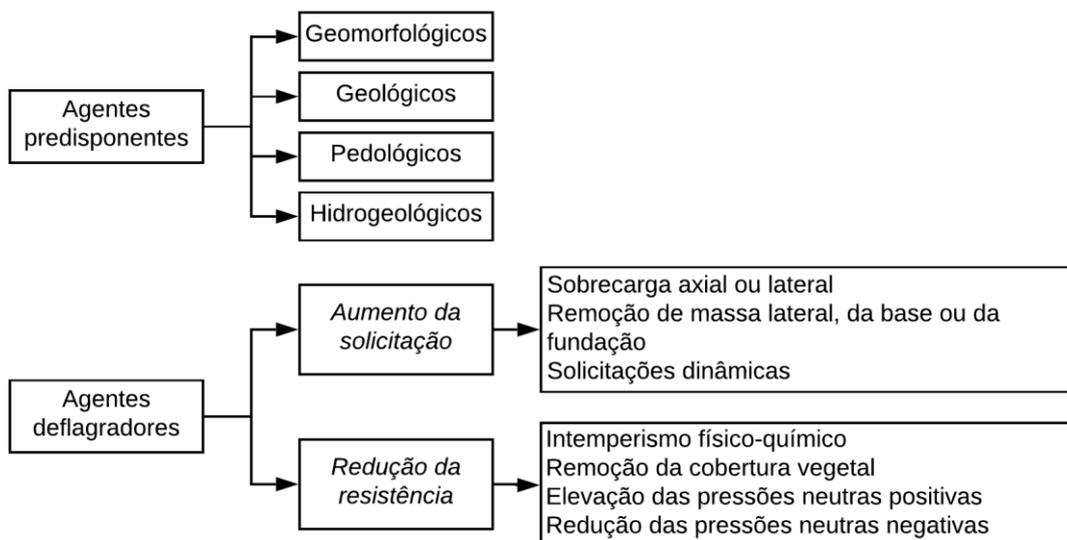
Como disposto anteriormente, inúmeros são os fatores que atuam no desencadeamento de eventos de movimentos gravitacionais de massa, podendo estes ocorrerem isolada ou simultaneamente. Fisicamente, compreende-se que a condição de instabilidade de um talude quanto ao escorregamento se dá quando as ações (forças e momentos) solicitantes em uma determinada superfície, a de ruptura,

são maiores que a resistência ao cisalhamento disponível do solo nesta superfície. Essa condição pode ser atingida por dois motivos (DUNCAN et al., 2014):

- Aumento das solicitações instabilizadoras;
- Diminuição da resistência ao cisalhamento do solo.

Os fatores internos, também denominados predisponentes, são, basicamente, atributos intrínsecos ao terreno e ao material, como a sua geomorfologia, suas características geológicas e pedológicas e condições internas de fluxo e pressões de água que possam favorecer a ocorrência da ruptura. Os agentes externos, também denominados deflagradores, agem no sentido de deflagrar o desequilíbrio do sistema ao aumentar as solicitações sobre o maciço, como sobrecargas axiais e descarregamentos laterais, e/ou diminuindo a resistência dos materiais devido a ações de intemperismo físico-químico, acréscimo de pressão de água nos poros do solo ou diminuição da parcela de coesão aparente do solo (sucção) (ABRAMSON, 2001; GERSCOVICH, 2016). A Figura 9 apresenta um fluxograma abreviado dos principais agentes predisponentes e deflagradores de movimentos gravitacionais de massa.

Figura 9 – Principais fatores predisponentes e deflagradores de movimentos gravitacionais de massa



Fonte: A autora (2019).

Os aspectos geomorfológicos do relevo influem, principalmente, sobre a inclinação e a curvatura das encostas. Ao se decompor o peso próprio de uma massa de solo de um talude em uma componente normal e uma cisalhante à possível superfície de ruptura, a componente tangencial – que é responsável por agir no sentido de deslizamento da massa de solo – aumenta conforme a inclinação da superfície do relevo cresce. Além disso, grandes inclinações aumentam a velocidade do fluxo interno de água, favorecendo a ocorrência de erosão interna e diminuição da resistência do solo (ABRAMSON et al., 2001). A sua curvatura influencia na intercepção, velocidade e acúmulo da água que escoar na superfície. Taludes côncavos tendem a acumular águas pluviais na sua parte inferior e taludes convexos na parte superior (TROEH, 1965).

Dentre algumas das características geológicas que podem afetar a estabilidade de um talude, elencadas por Varnes (1978), Abramson et al. (2001), Duncan et al. (2014), destacam-se a presença de falhas, xistosidades e clivagens que, se orientadas em uma direção paralela à superfície livre do talude ou quando dois destes planos se cruzam, podem se tornar superfícies de ruptura; presença de minerais constituintes que podem ser fortemente reativos e instáveis na presença de água, como os argilominerais e os que compõem as rochas xistosas; presença de descontinuidades ou zonas de contato entre materiais de diferentes permeabilidades, como lentes de areia sobrejacentes a camadas argilosas que favorecem a percolação de água e umedecem as camadas de argila, favorecendo a ocorrência de deslizamentos; presença de superfícies previamente cisalhadas ou movimentadas como dobras e fraturas; do grau de intemperismo, decomposição e alteração das rochas e seus minerais, o que diminui a resistência destes; das tensões de campo.

As características geomecânicas dos solos, objeto de estudo direto da Engenharia Geotécnica, é fator primordial na estabilidade de diversas encostas naturais e taludes construídos. As forças de atrito e de atração entre as partículas de solo influem sobremaneira na sua resistência ao cisalhamento, sendo estes, por sua vez, funções das características físicas e químicas dos seus minerais (partículas sólidas), da estrutura desse esqueleto mineralógico, das pressões de água, positiva, ou de ar e água, negativa, nos vazios do solo e do seu histórico de tensões ao longo da sua vida geológica comparado à tensão a qual está submetida no instante de tempo analisado.

A água presente nos poros do solo devido à infiltração das águas pluviais ou submersão das águas subterrâneas e freáticas, além de diminuir a tensão efetiva, aquela que de fato é responsável pela resistência ao cisalhamento de um material particulado, aumenta o seu peso próprio da massa, sendo a componente cisalhante à superfície de ruptura desfavorável à sua segurança (DUNCAN et al., 2014). A presença de água também influi na diminuição da pressão negativa de água (sucção), resultado da diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos poros, que atua como uma coesão “aparente” no solo auxiliando na sua resistência mecânica. Concentra-se nesta temática assuntos relacionados à hidrogeologia, com relação às condições de fluxo no interior e na superfície do maciço quanto à velocidade (laminar ou turbulento, sendo este último indutor de processos erosivos) do maciço de rocha ou solo e os subsequentes perfis de poropressões. Como destacado por Abramson et al., 2001, os padrões de fluxo de água subterrânea podem ser alterados devido à realização de cortes na encosta ou no talude construído, podendo leva-los à condição de instabilidade.

Vale destacar que a presença de águas residuais, domésticas ou não, proveniente de lançamentos irregulares ou vazamentos nas tubulações ou fossas sépticas, também contribuem com o aumento do peso próprio da massa de solo, aumentam as pressões hidrostáticas exercidas no esqueleto mineralógico e diminui a sucção matricial. Ademais, por se tratar de um fluido com elevadas concentrações de compostos orgânicos e inorgânicos, estes podem reagir com minerais ativos, como os argilominerais, e instabilizá-los.

A ação de um carregamento vertical, especialmente na crista de um talude, aumenta as tensões cisalhantes atuantes nos elementos do interior da massa de solo por aumentar a magnitude da tensão principal maior atuante sobre estes. Este tipo de sobrecarga pode ser decorrente de construções de edificações, rodovias, reservatórios e deposição de resíduos sólidos urbanos, entre outros (DUNCAN et al., 2014).

O desconfinamento lateral, especialmente as escavações e erosões fluviais próximas à base do talude, diminuem a tensão principal menor atuante nos elementos de solo podendo levá-lo à ruptura caso não sejam executados segundo uma geometria estável ou reforçados. Essa situação ocorre em situações de corte verticais ou inclinados em uma massa de solo, como para construção de acessos e edificações construídas.

Ademais, os intemperismos físico, químico e biológico aos quais uma rocha ou uma massa de solo é continuamente submetido atuam no sentido de quebrar as partículas sólidas em grãos menores, enfraquecendo suas as ligações químicas e estruturais dos minerais e, até mesmo, podendo decompor os minerais formando produtos menos resistentes (MITCHELL, 1993).

De modo geral, há o consenso de que a vegetação protege o solo de efeitos climáticos e as raízes podem reforça-lo, aumentando a resistência do sistema solo-raiz. Portanto, superfícies desmatadas podem ficar vulneráveis a processos erosivos, além de receberem maiores volumes de água precipitada sobre a superfície do talude (GERSCOVICH, 2016).

2.4 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA APLICADA A DESLIZAMENTOS DE TERRA

A cartografia geotécnica refere-se à elaboração de produtos cartográficos, as cartas, que contém a representação de informações, interpretações e associações de dados do meio físico para fins de aplicação em planejamento urbano, saneamento e diversas outras áreas da engenharia (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004). Segundo Prandini et al. (1995), as cartas geotécnicas são uma expressão prática do conhecimento geológico aplicado ao enfrentamento dos problemas postos pelo uso e ocupação do solo, procurando compreender a interação entre a ocupação e o meio físico e orientar medidas preventivas, corretivas ou emergenciais quando necessárias a fim de minimizar riscos provenientes de inadequados usos e ocupações do solo.

De modo geral, as cartas geotécnicas são elaboradas a partir de mapeamentos e caracterizações geotécnicas de campo e laboratório, podendo-se utilizar de critérios qualitativos e/ou modelagens matemáticas para correlacionar dados e interpretar fenômenos físicos, sendo estes processos culminados em trabalhos digitais de geoprocessamento.

Diversas são as metodologias empregadas para mapeamento geológico-geotécnico de áreas de risco. A que melhor se assemelha à realidade da comunidade estudada no presente trabalho, é a proposta pelo Instituto Tecnológico do Estado de São Paulo, proposto por Nakazawa et al. (1991) e por Prandini et al. (1995). O método se fundamenta, basicamente, em quatro premissas:

- 1) Partir dos problemas significativos presentes no território e, daí, para suas condicionantes mapeáveis;

- 2) Estabelecer uma fisiografia do desempenho que integre os processos do meio físico e as suas formas de ocupação;
- 3) Concentrar esforços na coleta objetiva e orientada de dados, para definir unidades geológico-geotécnicas de mesmo comportamento, de modo que correspondam, diretamente, a distintas práticas de prevenção e correção;
- 4) Superar o determinismo ingênuo da maior parte das aptidões, valendo-se do arsenal de técnicas disponíveis para a maximização de opções plausíveis para o uso do solo.

A depender do objetivo do mapeamento e da cartografia, designa-se no meio técnico diferentes tipos de cartas geotécnicas. Ademais, terminologias empregadas por profissionais da Geologia de Engenharia e da Geotecnia no estudo de áreas de riscos geológicos não estão em completo consenso. Assim, faz-se necessária a determinação do significado de termos empregados no presente trabalho.

Um evento geológico-geotécnico perigoso, ou simplesmente perigo, do inglês *hazard*, é um fenômeno ou processo do meio físico (uma ameaça) que ocorre em função das condições naturais e/ou humanas impostas a um terreno e cuja dinâmica pode gerar consequências negativas ao meio ambiente (BITAR, 2014; ZUQUETTE, 2018). É delimitado no tempo e no espaço e ocorrem em diferentes intensidades ou magnitudes, a depender das condições do terreno, podendo ser classificados em diferentes graus de perigo. Como abordado, podem ser naturais, ocorrendo espontaneamente, associados unicamente a fatores fisiográficos naturais, ou induzidos, ocorrendo associadamente a algum tipo de intervenção humana. Deslizamentos de terra, processos erosivos e inundações são exemplos de eventos perigosos.

A susceptibilidade é a predisposição ou a propensão dos terrenos ao desenvolvimento de fenômenos e processos do meio físico (a ameaças) devido às suas características intrínsecas, tais como topografia, geologia, propriedades geotécnicas, clima, vegetação, e/ou à presença de elementos antrópicos que deflagrem tais processos (FELL et al., 2008). Uma área pode ser suscetível ao desenvolvimento de diferentes tipos de escorregamentos, processos erosivos e inundações e, muito possivelmente, possui diferentes graus de susceptibilidade para cada um deles (FELL et al., 2008). Segundo definido pela CPRM

(PIMENTEL; SANTOS, 2018), é o grau em que uma área pode ser afetada pela ameaça, isto é, a estimativa de onde a ameaça é mais provável de ocorrer.

O meio ambiente ao que a definição de perigo se refere é a população humana, a infraestrutura urbana, as áreas ambientais, e assim por diante, que são expostas quando da ocorrência de tais eventos perigosos. Esses elementos possivelmente afetados apresentam diferentes resistências frente à ação ou aos efeitos dos fenômenos geológicos. A esta resistência denomina-se o termo vulnerabilidade, que reflete o grau de perda esperado de um dado elemento, ou conjunto de elementos, sob condição de perigo, ou seja, exposto a uma ameaça específica (PIMENTEL; SANTOS, 2018). Em outras palavras, expressa o quão vulnerável este elemento está quando da ocorrência de um evento geológico-geotécnico perigoso (ZUQUETTE, 2018), devido a seus fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais. De modo geral, moradias construídas com precárias técnicas construtivas em encostas de acentuada declividade são altamente vulneráveis frente a ocorrência de escorregamentos.

A medida da relação entre a magnitude/intensidade de um evento perigoso (perigo) e as consequências que este irá causar nos elementos por ele afetado (vulnerabilidade), é expressa pelo risco. O risco geológico-geotécnico de uma determinada área à ocorrência de deslizamentos de terra, por exemplo, expressa o grau de danos e perdas (ambientais, sociais e econômicas) esperados decorrentes da ocorrência do evento perigoso, de determinada intensidade, associado à vulnerabilidade, de determinada magnitude, dos elementos possivelmente atingidos (ZUQUETTE, 2018). Em outras palavras, depende das características, das possibilidades e da intensidade da ameaça, ou seja, do grau de perigo, assim como da quantidade dos elementos expostos e da vulnerabilidade desses elementos, em função das condições físicas, sociais, econômicas e ambientais existentes (PIMENTEL; SANTOS, 2018).

A estimativa de riscos de uma encosta povoada está relacionada ao conhecimento das propriedades físicas do meio e das condições de ocupação do mesmo. De modo geral, está associada à uma posterior orientação de decisões corretivas e/ou emergenciais a serem empregadas em áreas de risco já instaladas em uma determinada região ocupada (SANTOS, 2014). Esses exemplos de zoneamento têm geralmente sido usados para gerenciar perigos de deslizamentos em áreas urbanas, seja excluindo o desenvolvimento de áreas de elevado perigo ou requerendo

interferências de engenharia geotécnica na estabilização dessas áreas (FELL et al., 2008).

Basicamente, o risco de deslizamentos de terra empregado no mapeamento de áreas suscetíveis a este fenômeno pode ser mensurado de maneira qualitativa ou quantitativa, a fim de se ranquear os graus de danos ou perdas associadas às diferentes subáreas da região estudada, conforme exemplo de classificação apresentado no Quadro 2. Os procedimentos qualitativos estão baseados em informações categóricas e descritivas, basicamente fatores predisponentes e deflagradores encontrados em campo, enquanto os quantitativos são baseados em parâmetros que expressem as características do meio físico e recursos e modelagem matemática (ZUQUETTE, 2018).

Quadro 2 – Exemplo de classificação e conceituação de graus de risco

Grau de Risco	Significado
Baixo (R1)	Nas condições atuais não há risco evidente de acidentes geotécnicos ou hidráulicos.
Médio (R2)	Nas condições atuais há risco de acidentes geotécnicos ou hidráulicos de pequeno e médio portes.
Alto (R3)	Nas condições atuais há risco de acidentes geotécnicos ou hidráulicos graves.
Muito Alto (R4)	Nas condições atuais há risco e alta probabilidade de acidentes geotécnicos ou hidráulicos graves.

Fonte: Adaptado de SANTOS (2014).

Portanto, a carta de perigo retrata as áreas de perigo, com a sua classificação de intensidade, as cicatrizes e demais estruturas que indiquem movimentos de massa. A carta de risco aplicada à urbanização associa a carta de perigo à caracterização da vulnerabilidade dos elementos expostos ao perigo (PIMENTEL; SANTOS, 2018). Ela delimita em uma área ou região já ocupada as zonas ou os compartimentos submetidos a determinado tipo de ameaça (perigo) frente a um determinado tipo de ocupação (vulnerabilidade) (SANTOS, 2014).

2.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

A análise da estabilidade de taludes se faz presente em diversas obras da Engenharia Geotécnica, como em cortes de escavações, aterros de barragens e

cavas de mineração. No caso de análises da segurança de encostas naturais, especialmente em áreas de elevada extensão, a heterogeneidade e anisotropia de materiais existentes, as limitações de recursos econômicos e de tempo necessários para os caracterizar hidromecanicamente de maneira satisfatória, as limitações intrínsecas às modelagens analíticas ou numéricas quanto à representação e interação dos elementos do meio físico e a dificuldade de obtenção de informações precisas acerca de sobrecargas mecânicas e hidráulicas que podem ocorrer em campo, tornam o problema ainda mais complexo de ser solucionado com ferramentas matemáticas e computacionais.

Por esses motivos, os modelos baseados em soluções analíticas e/ou numéricas de análise de estabilidade de taludes, apesar de suma importância para quantificações de segurança e de serem amplamente utilizados academia e no mercado, não são totalmente suficientes para se determinar o grau de segurança de uma extensa área declivosa.

Como alternativa a essas limitações, outros tipos de análise de estabilidade de encostas baseados em metodologias qualitativas têm sido desenvolvidos. Essas análises, de modo geral, conduzem à identificação e classificação de pesos dos eventos perigosos em campo, com base no estudo da condição natural do meio físico e dos possíveis mecanismos que possam gerar instabilidades (AHRENDT, 2005).

A depender da escala do problema ambas as técnicas podem ser empregadas. De maneira abreviada, dentre as diferentes análises existentes recomendadas para trabalhos de grande escala, em geral maiores que 1:10.000, Soeters e Westen (1996) destacam as do tipo inventário, as heurísticas, as estatísticas e as determinísticas.

Neste trabalho buscou-se empregar métodos de estabilidade semi-empíricos, baseado em inventários de escorregamentos e identificação em campo de feições favoráveis à ocorrência de deslizamentos de terra e um método de análise de estabilidade de taludes clássica, com base determinística.

2.5.1 Métodos semi-empíricos

A análise qualitativa de susceptibilidade a escorregamentos, com base heurística, está diretamente relacionada à percepção do meio pelo profissional que está a aplicando em campo e no escritório, visto que a metodologia está condicionada

à identificação e à interpretação de fatores geomorfológicos, geológicos, pedológicos e antrópicos em campo que influem na estabilidade de um talude atribuindo-lhes, na maior parte das vezes, pesos referentes à sua influência em um processo de instabilização (SOETERS; WESTEN, 1996). A somatória dos perigos identificados de acordo com os seus pesos pode ser classificada em classes de perigo ao longo da área estudada.

2.5.1.1 Inventário de deslizamentos

A metodologia de análise do histórico de deslizamentos de uma determinada área ou de taludes e encostas semelhantes, parte do pressuposto que terrenos em que já ocorreram instabilizações apresentam elevada predisposição à ocorrência de novos eventos perigosos. O inventário de escorregamentos está baseado essencialmente em fotointerpretação, investigação de campo e na coleta de dados históricos de ocorrências de escorregamentos na área de estudo (SOETERS; WESTEN, 1996). O produto final é a distribuição espacial dos movimentos de massa que devem ser representados em mapa na forma de áreas afetadas ou como pontos ou símbolos (SOETERS; WESTERN, 1996). De um modo geral, este procedimento representa um estágio inicial para trabalhos de zoneamento de áreas susceptíveis a escorregamentos, podendo, a partir daí, serem aplicados outros procedimentos de análise de estabilidade.

2.5.1.2 Abordagem heurística

É baseada na opinião especialista de geomorfólogos combinando o mapeamento de movimentos de massa com as suas características geomorfológicas como os principais dados de entrada para zoneamento de eventos perigosos. Existem, segundo Soeters e Western (1996), dois principais tipos de análise heurística: a análise geomorfológica e a combinação de mapas. A primeira é realizada com o especialista definindo diretamente em campo os perigos existentes no terreno. No segundo tipo de mapeamento, os profissionais usam o conhecimento especialista para atribuir pesos para uma série de fatores encontrados em campo e distribuídos em mapa.

2.5.2 Métodos analíticos de determinação da segurança de taludes

Apesar dos problemas relacionados à coleta suficiente e confiável de dados, a utilização de técnicas quantitativas é a maneira clássica, útil e amplamente empregada na determinação da segurança de taludes no âmbito da engenharia. Podem ter caráter determinístico ou estatístico e são baseadas em modelos físico-matemáticos do problema de estabilidade real, valendo-se do uso de premissas e simplificações, geralmente expressos numericamente por fatores de segurança. Para análise de riscos de extensas áreas, seu emprego tem aumentando sobremaneira especialmente com o advento das técnicas de geoprocessamento, que tornam possível a realização de cálculos para determinação de fatores de segurança de amplas áreas (SOETERS; WESTEN, 1996). A limitação dessa aplicação são as exacerbadas simplificações requeridas para sua objetiva aplicação em áreas com suas inerentes heterogeneidades e, muitas vezes, incompletos conhecimentos acerca dos materiais constituintes do subsolo.

Uma vez apropriadamente identificada e definida a geometria do talude, a sua estratigrafia, as características geológicas, geomorfológicas e pedológicas desfavoráveis a estabilidade do maciço, as condicionantes do formato da superfície de ruptura, o padrão de fluxo, as solicitações mecânicas, os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais analisados em um nível de tensão normal fidedigno ao de campo e as condições de drenagem, pode-se modelar o problema e analisar, quantitativamente, o seu grau de segurança por meio de métodos analíticos ou numéricos de estabilidade de taludes (ABRAMSON et al., 2001; GERSCOVICH, 2016).

O método analítico de estudo da estabilidade de um talude consiste em, basicamente, comparar a tensão cisalhante resultante resistente (τ_R) com a tensão cisalhante resultante solicitante (τ_S) atuantes em uma potencial superfície de ruptura (LAMBE; WHITMAN, 1969). A relação entre essas duas grandezas, estabilizadoras e desestabilizadoras, é conhecida como fator de segurança (FS) e é apresentado na Equação 1.

$$FS = \frac{\tau_R}{\tau_S} \quad 1$$

O fator de segurança em estudos determinísticos expressa, portanto, o grau de segurança do talude em um determinado estado de tensões (em um instante de tempo). O significado físico de fatores de segurança maiores que 1 é que o talude se encontra estaticamente estável já que a resistência ao cisalhamento no plano analisado é maior que a tensão cisalhante solicitante sobre ele. Quando o fator de segurança é igual a 1 as forças estabilizadoras são iguais às desestabilizadoras e, então, o talude encontra-se na iminência de sua ruptura. Fatores de segurança menores do que 1 não tem significado físico, uma vez que a ruptura já ocorreu.

2.5.2.1 Resistência ao cisalhamento dos solos

Uma massa de solo é um sistema particulado composto por duas fases: a fase sólida, ou esqueleto mineralógico, e a fase fluida, correspondente ao ar e/ou a água que preenchem os poros existentes entre as partículas sólidas (LAMBE; WHITMAN, 1969). São materiais deformáveis justamente devido à presença das fases líquida e gasosa que estão sujeitas à alteração de volume a depender dos esforços solicitantes e do grau de saturação. São heterogêneos, anisotrópicos e não possuem comportamento mecânico elástico-linear, o que os tornam materiais de complexa idealização constitutiva.

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão cisalhante que ele suporta sem sofrer ruptura ou grandes deformações. Esta resistência é decorrente do contato intergranular das suas partículas, sendo uma componente friccional e uma coesiva, e do seu arranjo mineralógico (LAMBE, WHITMAN, 1969). Ressalta-se que essa resistência varia com a tensão confinante, com o índice de vazios, com o grau de saturação, com as condições de drenagem, velocidade e ciclagem de carregamento, com a temperatura e com a trajetória de tensões a qual o solo já fora submetido (LAMBE, WHITMAN, 1969).

A parcela friccional é a força de atrito que se desenvolve no contato intergranular no plano de deslizamento. É resultante do formato dos grãos, da rugosidade das suas superfícies e da tensão confinante que os aproxima e aumenta a tensão normal nas áreas de contato. A tensão confinante empurra as partículas umas contra as outras aumentando a tensão normal nas áreas de contato e, por conseguinte, a resistência ao movimento relativo entre os grãos (LAMBE, WHITMAN, 1969). Especialmente nos solos granulares, é direta, portanto, a

relação de proporcionalidade entre a força normal e a resistência ao cisalhamento do solo.

A força de coesão é decorrente de ligações físico-químicas entre as partículas devido à existência de cargas elétricas nas suas superfícies (LAMBE, WHITMAN, 1969; BUDHU, 2010). São observados em solos argilosos (compostos majoritariamente por argilominerais) e em solos cimentados – aqueles em que as partículas permaneceram em contato por longos períodos de tempo. Essa força é denominada coesão real do solo.

O arranjo mineralógico interfere na resistência ao cisalhamento do solo no que diz respeito, principalmente, ao seu índice de vazios. Quando o arranjo estrutural é denso, isto é, o índice de vazios do solo é baixo, ocorre o fenômeno de imbricamento das partículas que, devido ao fato de estarem muito próximas entre si, apresentam um aumento na sua resistência ao cisalhamento impedindo que o deslizamento sob um determinado plano ocorra. Essa resistência, que leva em consideração o imbricamento, só é vencida quando o solo expande, em um fenômeno de dilatância, permitindo o desenvolvimento do deslizamento entre as interpartículas (CRAIG, 2012; BUDHU, 2010).

De maneira geral, é esse arcabouço sólido o responsável por resistir e transmitir os esforços normais e tangenciais que atuam no interior da massa de solo, sendo esta resistência de contato intimamente influenciada pela presença de água nos seus vazios. No caso de solos secos, aqueles em que os vazios são totalmente preenchidos por ar, o contato grão a grão é o responsável pela resistência devido ao fato de o ar ser um elemento compressível que não resiste a solicitações normais e tangenciais sendo estes, portanto, totalmente transmitidos às partículas sólidas. Em solos saturados, a água que preenche a totalidade dos seus vazios e exerce pressão hidrostática nestes em todas as direções – a poropressão (μ) – desempenha papel importante no comportamento quanto ao mecanismo de resistência dos solos.

Quando o solo se encontra saturado e, em um primeiro momento a drenagem não é permitida, isto é, a velocidade de carregamento é consideravelmente maior que a capacidade de drenagem de água, os esforços normais aplicados na massa granular são imediata e integralmente transmitidos à água que preenche os vazios. Estes recebem, portanto, um acréscimo de pressão de água – o excesso de poropressão ($\Delta\mu$). Para os casos em que a drenagem é permitida, esse excesso de poropressão é gradativamente dissipado e os esforços normais são, então, transmitidos ao esqueleto

mineralógico. A parcela da tensão total (σ) aplicada em um determinado plano que é resistida pelas partículas sólidas recebe o nome de tensão efetiva (σ'). Portanto, a tensão efetiva é igual a tensão total reduzida pela poropressão devido ao carregamento e à hidrostática, traduzido algebricamente pela Equação 2. Este fenômeno de compartilhamento de tensões que ocorre nos solos saturados foi estudado por Terzaghi e, em 1925, postulado como Princípio das Tensões Efetivas, o qual é primordial para o entendimento da Mecânica dos Solos.

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad 2$$

Em que:

σ' = tensão normal efetiva no esqueleto mineralógico do solo (kPa);

σ = tensão normal total aplicada ao plano (kPa);

μ = pressão suportada pela água contida nos poros do solo (kPa).

No entanto, a água não resiste a esforços tangenciais, sendo incompressíveis somente em relação às solicitações normais, o que significa dizer que a resistência ao cisalhamento dos solos é dependente apenas do comportamento da parcela mineralógica – da tensão efetiva. Desse modo, as tensões efetivas controlam o comportamento tensão-deformação do solo, sua variação de volume e sua resistência ao cisalhamento. Por esse motivo, é conceitualmente mais adequado se analisar a resistência ao cisalhamento dos solos em termos de tensão efetiva.

2.5.2.2 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

Critérios de ruptura são formulações matemáticas que buscam definir o fenômeno de ruptura de um determinado material em função de algumas de suas propriedades mecânicas e do estado de tensões ao qual está submetido. Estes estudos levam em consideração a relação constitutiva dos materiais, isto é, o entendimento experimental e matemático do seu comportamento tensão-deformação.

O critério mais utilizado na Mecânica dos Solos para definição da resistência ao cisalhamento deste é o de Mohr-Coulomb. Mohr, em 1882, propôs representar graficamente o estado de tensões, isto é, o par de tensão normal e cisalhante que atua em todos os planos que interceptam um determinado ponto no interior da massa de solo no instante da ruptura em um sistema de coordenadas em que as abscissas

são as tensões normais e as ordenadas as tensões cisalhantes (LAMBE; WHITMAN, 1969; ABRAMSON, 2001). A linha que tangencia todos os círculos de Mohr obtidos por meio de ensaios de laboratório realizados em um solo sob diferentes níveis de tensão normal, é a envoltória de ruptura de Mohr (LAMBE; WHITMAN, 1969). Pressupõe-se que ela represente o lugar geométrico dos pontos cujos estados de tensões induziram à ruptura. Assim, fisicamente, essa envoltória é entendida como: se o círculo de um determinado estado de tensões estiver abaixo dela, então o solo está estável sob este estado de tensão, se o círculo tangencia a envoltória, então a resistência foi alcançada em algum plano que intercepta o ponto analisado, causando a ruptura do material (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Já Coulomb observou que a resistência ao cisalhamento do solo é crescente conforme o acréscimo na magnitude da tensão efetiva normal ao plano até que se atinja a ruptura e propôs representar esta relação por uma reta cujo coeficiente linear foi denominado como intercepto coesivo efetivo do solo (c') e o coeficiente angular como ângulo de atrito interno efetivo do solo (ϕ') (LAMBE; WHITMAN, 1969). Sabe-se que, graficamente, a relação entre resistência ao cisalhamento e tensão normal efetiva é curva, mas de modo a facilitar a sua aplicação no cálculo da estabilidade dos solos, é aceitável assumir uma relação linear entre as duas tensões. Fazendo-se uma reta com a envoltória de Mohr, seu critério de resistência fica análogo ao de Coulomb, justificando a expressão critério de Mohr-Coulomb, sendo este apresentado na Figura 10 e a sua formulação matemática na Equação 3. Vale ressaltar que c' e ϕ' são parâmetros intrínsecos aos materiais obtidos por meio de ensaios de laboratório, mas a coesão não deve ser confundida com a coesão verdadeira dos solos devido às forças de atração entre as partículas.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

3

Em que:

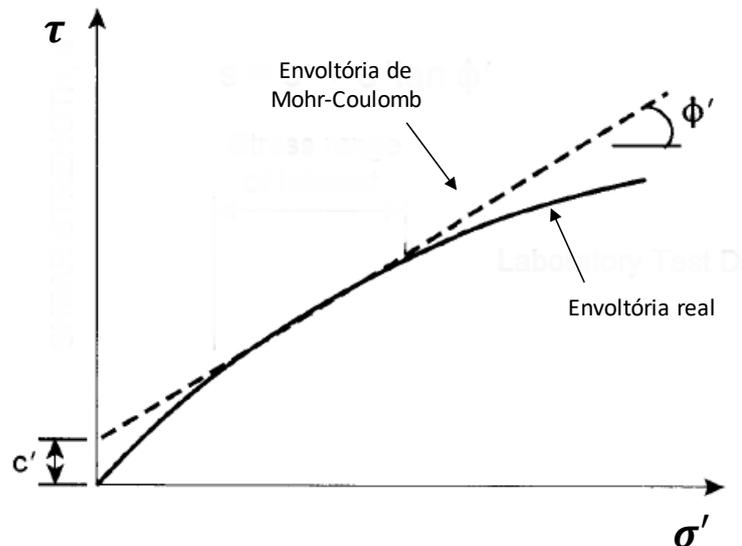
τ = resistência ao cisalhamento do solo (kPa);

c' = intercepto coesivo efetivo do solo (kPa);

σ' = tensão normal efetiva (kPa);

ϕ' = ângulo de atrito interno efetivo do solo (°).

Figura 10 - Envoltória real e de Mohr-Coulomb de resistência ao cisalhamento



Fonte: Adaptado de ABRAMSON et al., 2002.

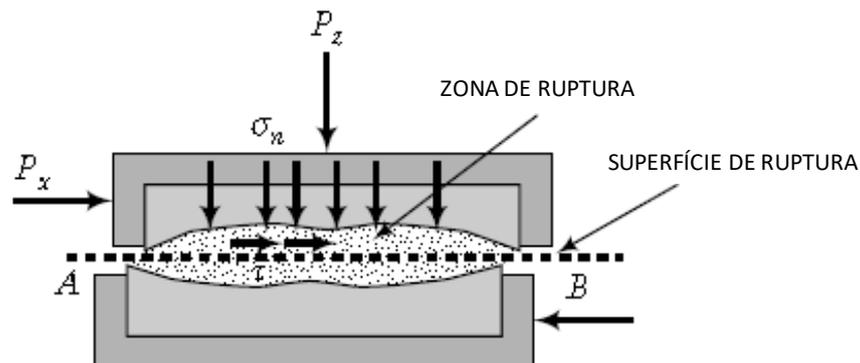
Ademais, observou-se que a envoltória intercepta os círculos em pontos que não são o de máxima tensão cisalhante. Daí infere-se que a ruptura ocorre em um plano sob o qual atua uma combinação crítica de tensões normal e cisalhante que não são a tensão principal maior ou a de cisalhamento máxima (ABRAMSON, 2001). Basicamente, é este o princípio do critério de Mohr-Coulomb: uma combinação de tensões normal e cisalhante configuram uma combinação mais crítica do que a atuação de seus máximos valores atuando isoladamente.

2.5.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

Diversos os ensaios laboratoriais que podem ser utilizados para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, além da análise do seu comportamento tensão-deformação, a depender, principalmente, do mecanismo de ruptura que se pretende reproduzir, mas, também, dos recursos técnicos, materiais e financeiros disponíveis para realização de tais ensaios. Para simulações das condições de campo em laboratório e obtenção de parâmetros de resistência mais fidedignos à realidade, deve-se analisar o estado de tensões, as condições de drenagem e velocidade de carregamento que ocorrem em campo para reproduzi-los em laboratório, além da análise da condição de resistência existente no solo – de pico ou residual.

O ensaio de Cisalhamento Direto é um dos ensaios mais antigos e difundidos na Geotecnia laboratorial devido à sua simplicidade e rapidez de execução. Seu funcionamento se dá pela aplicação direta de tensões horizontais de cisalhamento ao corpo de prova de solo, confinado por tensões verticais, por meio do deslocamento relativo de dois planos. No ensaio, o corpo de prova é inserido em uma caixa de cisalhamento de paredes rígidas, que não permitem a deformação lateral do solo, e o cisalhamento ocorre apenas pelo deslizamento entre dois planos impostos pela aplicação de uma força horizontal na metade superior do corpo de prova, que o desloca, enquanto a metade inferior permanece estática. Antes do cisalhamento, uma tensão vertical é aplicada no corpo de prova provocando confinamento e consolidação do solo na tensão vertical estabelecida para realização do ensaio. Em seguida, o deslizamento na superfície de deslizamento horizontal, na metade da altura do corpo de prova, é imposto (BS 1377-7, 1990).

Figura 11 - Mecanismo de funcionamento e ruptura de um ensaio de cisalhamento direto



Fonte: BUDHU (2008).

É um ensaio que permite obter parâmetros de resistência ao cisalhamento em termos de tensão efetiva, uma vez que impedir a drenagem do corpo de prova não é possível, além do fato de que a altura do corpo de prova, geralmente de 20 mm, permite relativa rápida consolidação e estabilização dos recalques. Além disso, é possível controlar a velocidade do cisalhamento, podendo essa ser suficientemente pequena para que não sejam geradas poropressões na superfície de cisalhamento (BS 1377-7, 1990).

Utilizando o ensaio de Cisalhamento Direto é possível obter envoltórias de resistência do solo tanto para a condição de pico como residual (BS 1377-7, 1990). A resistência de pico, relativa a solos sobreadensados que apresentam imbricamento

de partículas, é representativa de um material intacto que não tenha sofrido grandes deformações e, em geral, é mobilizada durante a primeira ruptura de um talude. A resistência residual é o valor mínimo de resistência ao cisalhamento do solo na condição drenada e após grandes deslocamentos. A avaliação da resistência residual é importante em estudos de solos com rupturas pré-existentes (FONSECA, 2006), isto é, quando esses já atingiram suas resistências de pico e encontram-se nos seus valores de mínima resistência ao cisalhamento. Em solos residuais com planos de fraqueza reliquias também se indica a utilização de parâmetros de resistência residual (HUNT, 1986). Ademais, muitas vezes os processos de escorregamento de terra estão associados a uma ruptura progressiva interna, isto é, uma partícula de solo que não suporta as tensões cisalhantes atuantes as “transfere” para as partículas subsequentes, em um efeito de cadeia. A realidade é que não se conhece o que de fato está acontecendo no interior da massa de solo em análises de estabilidade de taludes de extensas áreas, sendo indicada, a favor da segurança, a análise de estabilidade de taludes utilizando-se os parâmetros de resistência residuais dos solos.

2.5.2.4 Talude Infinito

Os cálculos determinísticos de estabilidade de taludes consistem na busca pelo menor fator de segurança, isto é, pela menor relação entre a resistência ao cisalhamento do solo e as tensões cisalhantes atuantes em uma superfície de ruptura no interior de uma região pré-definida do maciço de solo e/ou rocha, indicando o seu grau de segurança mediante as condições modeladas. Para tanto, utilizam-se um dos diversos métodos analíticos baseados na teoria do Equilíbrio Limite (DUNCAN, 2014) ou métodos numéricos baseados na análise das tensões e dos deslocamentos representados, majoritariamente, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) ou das Diferenças Finitas (MDF). A primeira metodologia é mais amplamente utilizada devido a sua maior praticidade de aplicação, em termos de conhecimento do comportamento reológico dos solos e computacionais, sendo amplamente aceita para casos de escorregamentos por possuírem superfícies de ruptura bem definidas e será a adotada no presente trabalho.

O método de Equilíbrio Limite se utiliza das equações de equilíbrio da Mecânica Estática para calcular o valor de forças ou momentos que atuam em uma massa de solo e/ou rocha, assumida como corpo rígido, delimitada pela superfície

livre do talude e uma possível superfície de ruptura de geometria pré-definida (circular, planar ou qualquer) e então determinar o fator de segurança na referida superfície, verificando se a massa se encontra, ou não, em equilíbrio estático. Nos problemas de estabilidade de taludes, é de interesse que se assuma um número de superfícies de ruptura, dentro de uma área de abrangência pré-definida, sob as quais serão calculados os respectivos fatores de segurança e, então, assumido o menor deles como o fator de segurança crítico do talude (DUNCAN, 2014).

Em um problema bidimensional, três equações de equilíbrio (somatório de forças na direção vertical, somatório de forças na direção horizontal e somatório de momentos) podem ser utilizadas para calcular o valor de três incógnitas envolvidas no problema (DUNCAN, 2014). Na Mecânica dos Solos, utiliza-se, também, a equação de resistência ao cisalhamento do solo, como a proposta por Mohr-Coulomb, para se determinar a tensão resistente do solo na superfície analisada. No entanto, o sistema de forças atuantes em uma determinada massa de solo é complexo e envolve mais do que quatro forças. Assim, muitos métodos se utilizam de simplificações físicas para tornar o problema matematicamente determinável.

Embora de grande valia para aplicações na Engenharia Geotécnica, os métodos de equilíbrio limite assumem pressupostos que representam importantes limitações no que tange a Mecânica dos Solos, sendo algumas delas (DUNCAN, 2014; GERSCOVICH, 2016):

- a) O solo se comporta como material rígido perfeitamente plástico, isto é, rompe bruscamente sem deformações antes da ruptura. Tal imposição não condiz com o comportamento reológico destes materiais que, de modo geral, são regidos segundo modelo constitutivo elasto-plástico não linear, isto é, eles se deformam em limites elásticos e/ou plásticos antes de atingirem a ruptura. Portanto, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva;
- b) A ruptura ocorre em todos os pontos da superfície de ruptura ao mesmo tempo.
- c) As equações de equilíbrio estático são validas até a iminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico a partir do momento em que pequenas deformações devem ser mobilizadas antes da ocorrência da ruptura mais crítica pelos mesmos motivos elencados anteriormente;

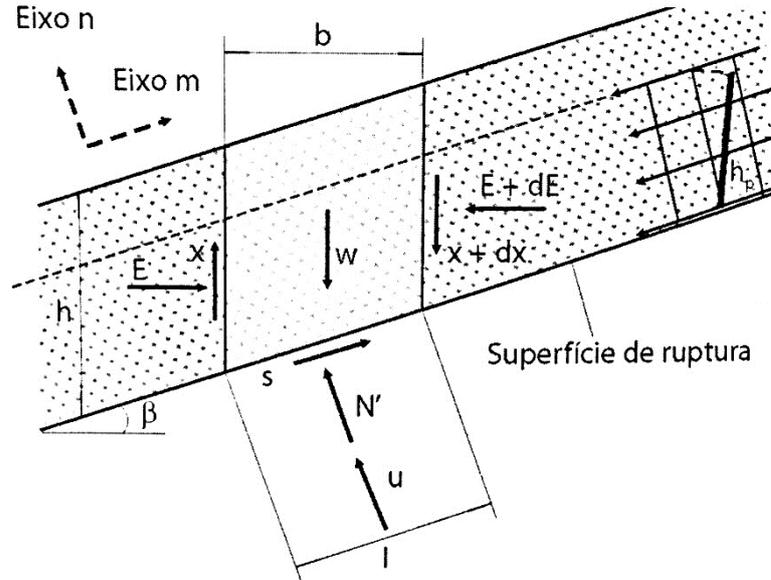
- d) O coeficiente de segurança é constante ao longo da superfície de ruptura, sendo este a média de todos os valores que ocorrem na superfície assumida.

Com advento das técnicas de geoprocessamento, associadas a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), um método determinístico amplamente aplicado para análise de áreas susceptíveis a movimentos translacionais de massa em extensas áreas é o modelo do Talude Infinito (SOETERS; WESTEN, 1996). O método do Talude Infinito é aplicável para taludes de extensão consideravelmente elevada e cuja ruptura é assumida a ocorrer ao longo de um plano paralelo à sua face devido à uma estratigrafia paralela à superfície livre com a presença de uma delgada camada de solo sobrejacente à um material de maior resistência mecânica (ABRAMSON, 2001).

O método de cálculo do fator de segurança utilizando o Talude Infinito analisa as forças atuantes em uma fatia de solo delimitada pela superfície de ruptura, pela superfície livre e por dois planos verticais sob os quais atuam forças de empuxo (E) e de atrito (X) devido ao confinamento lateral da fatia (Figura 12). Devido ao fato de o talude ser considerado de extensão infinita, tais forças de empuxo e de atrito entre fatias são consideradas de igual magnitude sendo anuladas em uma análise de equilíbrio de forças por atuarem na mesma direção e em sentidos opostos. No método, realiza-se o equilíbrio de forças atuantes na fatia para determinação da sua estabilidade, somando-se as forças atuantes nas direções perpendicular e paralela ao plano de ruptura considerado (GERSCOVICH, 2016).

O peso próprio (W), que atua na direção vertical e é função do peso específico do solo, é decomposto em uma parcela normal (N) ao plano de ruptura e uma tangencial (s) (Figura 12). A componente normal auxilia na resistência ao cisalhamento do solo no plano analisado, uma vez que esta é função da tensão normal. Já a componente tangencial tende a promover o processo de deslizamento da massa de solo e sua proporção em relação ao peso próprio aumenta conforme aumenta-se a inclinação (β) do talude, medida em relação à horizontal. A força estabilizadora é a resistência ao cisalhamento do solo (s).

Figura 12 - Esquema e forças consideradas no método do Talude Infinito



Fonte: GERSCOVICH (2016)

Para uma dada profundidade de ruptura (h), considerando espessura unitária da fatia na direção perpendicular à seção analisada, por equilíbrio de forças tem-se a Equação 4 como formulação do fator de segurança em termos de tensão total e, na Equação 5, em termos de tensão efetiva, conceitualmente mais correto (GERSCOVICH, 2016).

$$FS = \frac{c + \gamma h \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma h \cos \beta \sin \beta} \quad 4$$

$$FS = \frac{c' + (\gamma h \cos^2 \beta - \mu) \tan \phi'}{\gamma h \cos \beta \sin \beta} \quad 5$$

Em que:

FS = fator de segurança (adimensional);

c, c' = intercepto coesivo total e efetivo do solo, respectivamente (kPa);

γ = peso específico natural do solo (kN/m³);

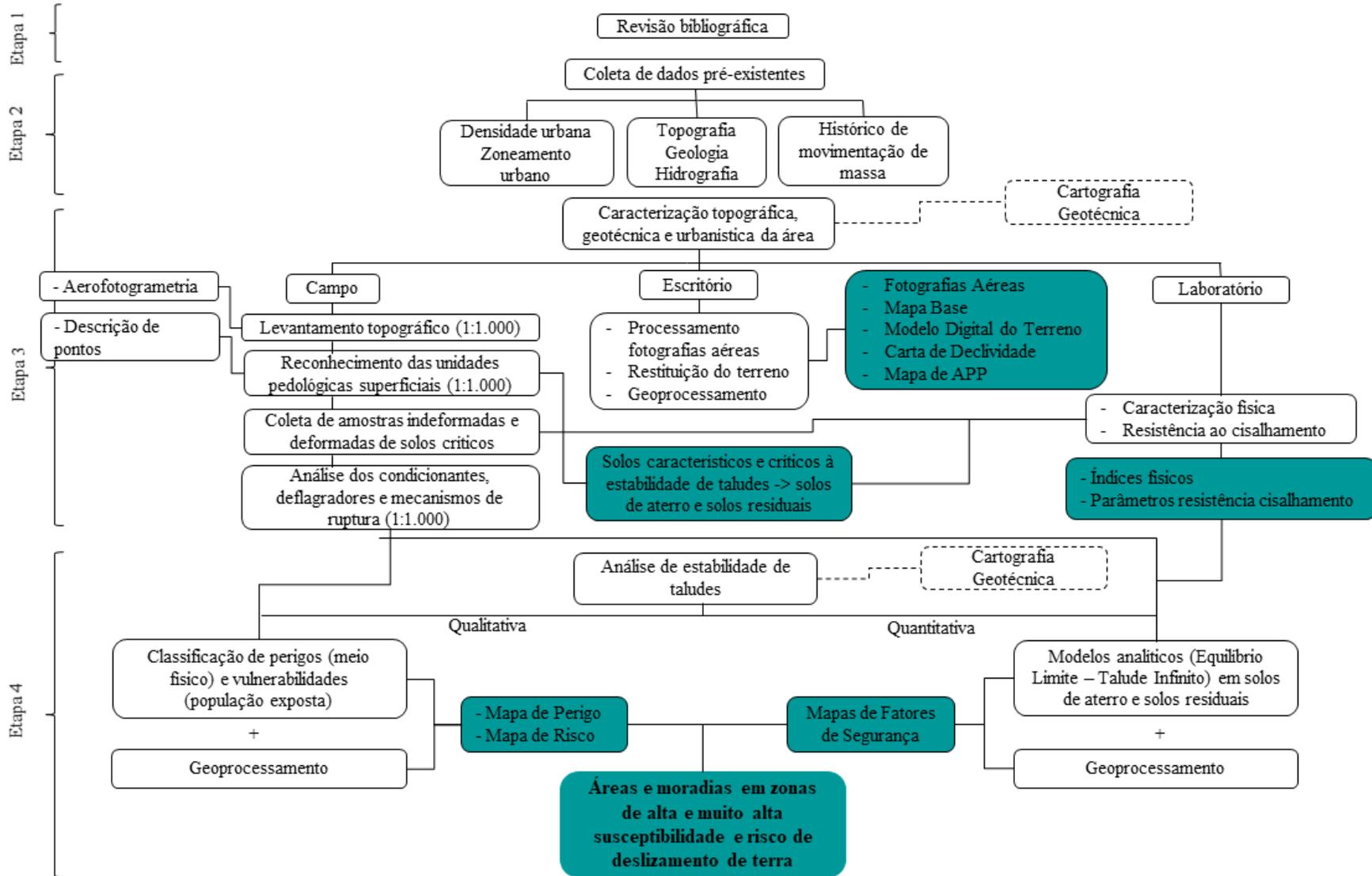
β = inclinação do talude e da superfície de ruptura (°);

ϕ, ϕ' = ângulo de atrito total e efetivo do solo, respectivamente (°).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresenta-se, na Figura 13, um fluxograma das principais etapas de trabalho desenvolvidas no presente estudo e os seus respectivos resultados para a elaboração dos produtos finais apresentados neste Trabalho de Conclusão de Curso. Vale ressaltar que o estudo não se limitou às ferramentas materiais e metodológicas apresentadas no fluxograma. Nos itens subsequentes, uma descrição mais detalhada da metodologia empregada é apresentada.

Figura 13 – Fluxograma das etapas desenvolvidas no trabalho



Fonte: A autora (2019).

3.1 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Como abordado na revisão bibliográfica, a inclinação de um talude exerce papel de extrema importância na sua estabilidade. Assim, os dados planialtimétricos – que permitem calcular a inclinação de quaisquer trechos de um terreno – são de inextinguível importância em análises quantitativas da segurança de vertentes, representadas neste trabalho pela formulação e cálculo dos fatores de segurança, ou até mesmo em análises qualitativas, que neste trabalho baseou-se na classificação das inclinações dos terrenos segundo normativas federais de preservação ambiental e de uso e ocupação do solo (Lei nº 12.651 de 2012; Lei nº 6.766 de 1979).

A base de dados topográficos pré-existente disponibilizada pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (ITCG) e pela Prefeitura Municipal de Colombo é da ordem de escala de 1:2.000 com curvas de nível equidistantes de 1 m. Optou-se por realizar um novo levantamento topográfico na área de estudo utilizando-se a técnica de aerofotogrametria para que fosse possível se obter uma escala mais detalhada de trabalho tanto no levantamento das altitudes do terreno quanto na obtenção de ortofotos de alta resolução do local. Dessa maneira, esta fase teve como principais objetivos fornecer os valores de inclinações do terreno para cálculo dos fatores de segurança e auxiliar o reconhecimento e trabalho de campo por meio de fotografias aéreas.

A metodologia empregada para obtenção das coordenadas geodésicas tridimensionais dos terrenos de Vila Nova e de fotografias aéreas de alta resolução, foi a técnica de aerofotogrametria com tecnologia VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado). De maneira simplificada, o equipamento VANT, RPA (Aeronave Remotamente Pilotada) ou simplesmente drone, registra a posição e orientação do sistema de imageamento que possui no instante de aquisição das imagens, uma vez que é integrado com o Sistema de Navegação Global por Satélites (GNSS) e Navegação Inercial (INS), e obtém-se, assim, imagens de alta resolução e uma nuvem de pontos com coordenadas X, Y e Z da área sobrevoada.

No entanto, uma limitação da técnica de aerofotogrametria é que ela obtém os valores de elevação de todos os elementos sobrevoados, como construções e árvores, e não apenas do terreno. Em áreas densamente urbanizadas ou arborizadas o processo de obtenção da altitude do terreno natural a partir da utilização direta da nuvem de pontos é dificultado, sendo necessária a realização de restituição manual

das cotas do terreno. No escritório, o operador que realiza a restituição, isto é, a obtenção das coordenadas altimétricas do terreno natural a partir das ortofotos, às obtém com exatidão quando o mesmo é visível e as estimam em áreas de oclusão deste por objetos. Ou seja, trata-se, de um método indireto de obtenção de altitudes. Ainda assim, justifica-se a adoção do levantamento aerofotogramétrico com RPA devido à sua rapidez e baixo custo de execução e obtenção dos resultados em relação à topografia convencional e facilidade de aplicação em áreas de difícil acesso dos equipamentos utilizados na topografia convencional.

3.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

Na análise da susceptibilidade de escorregamentos de terra, seja qualitativa ou quantitativa, o conhecimento de feições topográficas, geológicas e pedológicas do local, bem como, quando possível, dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de materiais críticos da área, das interferências antrópicas e dos escorregamentos pretéritos é de suma importância para uma estimativa mais acurada dos métodos de análise de estabilidade de taludes a serem utilizados e da segurança estimada ou calculada desses taludes.

As investigações de campo realizadas no presente trabalho basearam-se em premissas básicas do mapeamento geológico e geotécnico de risco e iniciaram-se na caracterização topográfica da área de estudo. Em uma segunda etapa, buscou-se mapear o trecho estudado de Vila Nova em seus aspectos geológicos e geotécnicos gerais, identificar indícios e cicatrizes de movimentos gravitacionais de massa e analisar o grau de vulnerabilidade das ocupações existentes em uma escala de 1:1.000. Por último, coletou-se amostras deformadas e uma amostra indeformada de solo para realização de ensaios de caracterização física e resistência ao cisalhamento em laboratório. Uma abordagem mais detalhada das considerações e ações realizadas em cada uma dessas etapas será apresentada nos itens a seguir.

Para orientar e padronizar o tipo de informações a serem coletadas durante as observações e descrições, elaborou-se uma ficha de campo, apresentada no Anexo 1, inspirada em outros trabalhos de mapeamento de risco, especialmente o do MINISTÉRIO DAS CIDADES (2014). A ficha de campo contém, basicamente, itens referentes à caracterização geral dos aspectos físicos da área (relevo, pedologia, cobertura vegetal) e antrópicos (tipologia das construções, distâncias em relação às

encostas e ao canal de drenagem) e de indícios ou fatores predisponentes e deflagradores de diferentes tipos de movimentos de massa. No reconhecimento dos aspectos geológico-geotécnicos gerais, contou-se com o auxílio de ferramentas simples como pás, enxadas e trenas

3.2.1 Mapeamento de campo

Com o auxílio do mosaico georreferenciado obtido por meio da aerofotogrametria e de seções transversais ao vale elaboradas a partir do levantamento topográfico, em uma escala de trabalho de 1:1.000, buscou-se observar e descrever feições gerais de afloramentos de solo e de rocha, observando aspectos quanto o tipo de rocha e de solo, suas colorações e texturas, feições de relevo e intervenções antrópicas nestes meios físicos. De modo geral, buscou-se analisar os seguintes aspectos dos pontos analisados na área:

- i. Geomorfologia: se se tratava de área de aclave, com taludes naturais, de corte ou de aterro, ou de planície – uma vez que se trata de um vale encaixado com moradias do tipo palafita assentes no leito maior do rio, existindo riscos associados à inundaçãõ, apesar de não ser o foco dado no presente trabalho;
- ii. Geologia: se existiam afloramentos rochosos e seus aspectos litológicos gerais;
- iii. Pedologia: tipologia do solo predominante (residual, colúvio ou aterro), aspectos gerais (cor, textura, teor de umidade aparente), espessura e a presença de resíduos sólidos domésticos ou de construção.
- iv. Vegetação: se se tratava de área totalmente descoberta ou se havia presença de árvores.

Os procedimentos utilizados para o mapeamento geotécnico tiveram como principal objetivo a identificação unidades de solo com propriedades geológico-geotécnicas semelhantes entre si, de maneira a subsidiar critérios de análises determinísticas de movimentos gravitacionais. Também com base nesta subdivisão de áreas, foi realizada uma caracterização das propriedades físicas e mecânicas de um conjunto de materiais inconsolidados que as compõe.

3.2.2 Ensaio de laboratório

Para o cumprimento de parte dos objetivos propostos, durante a fase de campo foram realizadas coletas de três amostras deformadas e uma indeformada para a realização de ensaios de caracterização física e de resistência ao cisalhamento, os quais serão descritos na apresentação dos resultados (Capítulo 4). Duas das amostras deformadas eram características de um solo residual da área, sendo uma delas do mesmo solo em que se realizou o ensaio de Cisalhamento Direto, e a terceira era característica de um solo de aterro. No Quadro 3 apresenta-se um resumo do tipo de solo e de amostra coletada e os respectivos ensaios para os quais foram destinadas.

Quadro 3 - Coleta de amostras de solo

Solo	Tipo de Amostra	Quantidade de Amostras	Características Determinadas
Aterro	Deformada	1	Caracterização física
Residual de migmatito	Deformada	2	Caracterização física
Residual de migmatito	Indeformada	1	Resistência ao cisalhamento

Fonte: A autora (2019).

Os ensaios de caracterização física realizados foram o ensaio de determinação do teor de umidade natural, de determinação da massa específica real dos grãos e de análise granulométrica. O teor de umidade foi determinado segundo a norma brasileira NBR 6457:2016 (ABNT, 2016), a massa específica real dos grãos segundo a normativa brasileira DNER-ME 093/94 (DNER, 1994), fazendo-se uso de picnômetros e fervura da mistura solo-água destilada para eliminação do ar dos vazios do solo e a análise granulométrica segundo a NBR 7181:2016 (ABNT 2016) com ensaios de peneiramento grosso e fino e sedimentação para o material passante na peneira 0,075 mm, utilizando-se solução de hexametáfosfato de sódio. Os dois últimos ensaios foram realizados com amostras previamente secas em estufa à 100°C. Todos eles foram conduzidos no Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da Universidade Federal do Paraná.

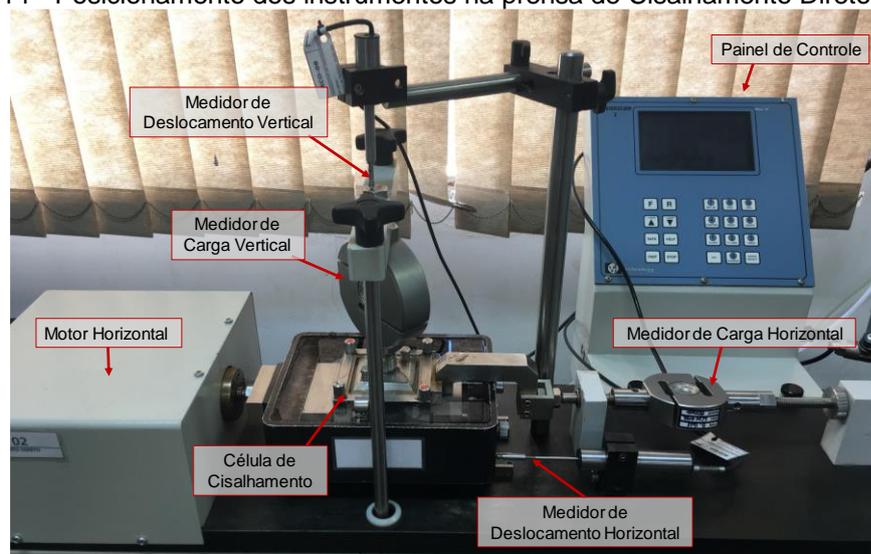
Os ensaios de Cisalhamento Direto foram conduzidos segundo prescrições da norma britânica BS 1377-7:1990 (*British Standard Methods of test for Soils for Civil Engineering purposes – part 7 – Shear strength test*), realizando-se as fases de

adensamento, concomitantemente à saturação do corpo de prova, e de cisalhamento e reversão. Esses ensaios foram realizados em uma prensa do tipo deformação controlada, da marca VJ Tech, apresentado na Figura 14, do laboratório da Fugro.

Neste equipamento, a tensão vertical (normal) é obtida via aplicação de uma força proveniente de um sistema de compressão de ar ao capacete de carga que é posicionado sobrejacente ao corpo de prova. Essa força é medida por meio de uma célula de carga – transdutores que, a partir da leitura de uma diferença de potencial elétrico, são capazes de medir força (ZORZAN, 2018). A tensão horizontal (cisalhante) é obtida por meio do deslocamento, imposto por um motor elétrico, da base da célula de cisalhamento, de modo que a metade superior da caixa reaja contra uma célula de carga horizontal que mede as forças tangenciais atuantes na amostra.

A leitura dos deslocamentos vertical e horizontal do corpo de prova de solo é realizada com a utilização de dois dispositivos LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) posicionados sobre o capacete de carga e na lateral da caixa de cisalhamento, na direção do deslocamento horizontal. O princípio de funcionamento do LVDT também é baseado na diferença de potencial elétrico, mas dessa vez correlacionado ao deslocamento. Tanto o LVDT quanto as células de carga são dispositivos automatizados que permitem a mensuração e transmissão contínua de dados à um computador.

Figura 14 - Posicionamento dos instrumentos na prensa de Cisalhamento Direto utilizada



Fonte: A autora (2019).

3.3 ANÁLISE DE SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

Considerando os diversos fatores e limitações envolvidos num processo de análise de estabilidade de taludes, a prática do zoneamento de escorregamentos requer os seguintes itens, segundo Soeters e Western (1996):

- i. Um detalhado inventário dos processos de instabilização dos taludes;
- ii. Um estudo da relação desses processos geodinâmicos com a configuração do meio em que está inserido;
- iii. Uma análise dos elementos condicionantes e deflagradores;
- iv. A representação da distribuição espacial desses fatores.

No presente trabalho serão empregadas duas metodologias de definição da susceptibilidade e do risco da região estudada à movimentos translacionais rasos. A primeira, de caráter qualitativo, é baseada em aspectos topográficos, em indícios de eventos perigosos em campo e no reconhecimento da vulnerabilidade da população exposta, determinando a susceptibilidade do terreno da comunidade de Vila Nova à ocorrência de deslizamentos de terra e os riscos resultantes das referidas ocorrências. A segunda, de caráter quantitativo, é baseada em aspectos topográficos e em parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos constituintes do substrato da região, associados à um modelo físico-matemático de estabilidade de taludes.

3.3.1 Histórico dos processos de movimentos gravitacionais de massa

A identificação dos tipos e configurações dos processos de instabilização que ocorrem em uma área na qual se deseja estimar a segurança dos seus taludes é de suma importância. Isso porque são diferentes as condicionantes envolvidas em cada um dos diferentes processos, como deslizamentos planares e deslizamentos rotacionais, influenciando em diferentes critérios técnicos e científicos aplicados no mapeamento de áreas de risco e na estimativa de fatores de segurança. Ademais, a identificação de um local onde ocorrera deslizamento de terra, pode servir como subsídio à classificação da área como de considerável perigo à ocorrência desse tipo de movimento.

A realização do inventário de deslizamentos em Vila Nova, isto é, o mapeamento das feições de movimentos gravitacionais de massa, se deu por meio de visitas de campo, concomitantemente com o trabalho de análise da vulnerabilidade das moradias.

De maneira abreviada, buscou-se identificar as seguintes informações:

- a) Tipo de movimento gravitacional de massa;
- b) Profundidade de ruptura;
- c) Materiais inconsolidados envolvidos;
- d) Localização no mapa base.

3.3.2 Avaliação de perigo, vulnerabilidade e risco

A premissa que orienta a elaboração da metodologia de análise qualitativa de susceptibilidade do terreno à deflagração de escorregamentos de terra empregada no presente trabalho é a influência da topografia na propensão de um terreno à deslizamento de terra e a de que não existe risco de desastres naturais sem a presença do perigo. Entende-se que a presença de cicatrizes de movimentos de massa pretéritos indica a propensão de ocorrência de novos movimentos nas proximidades do local e a presença de outros indícios, como embarrigamentos e trincas em muros, indicam os perigos potenciais da área à ocorrência de movimentos. Portanto, objetivou-se definir critérios topográficos e identificar indícios de movimentos de massa em campo que subsidiassem a classificação das magnitudes de perigo da área de estudo. Quanto à vulnerabilidade, buscou-se definir critérios de classificação do quão vulnerável à ocorrência de deslizamentos de terra as ocupações de Vila Nova são.

A sequência metodológica proposta a seguir é baseada nos manuais de mapeamento e análise de risco geológico, geotécnico e hidrológico desenvolvidos pelo Ministério das Cidades e pelo Serviço Geológico do Brasil (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2018; PIMENTEL e SANTOS, 2018), adaptada à realidade da área de estudo, com base em observações de campo.

3.3.2.1 Identificação e classificação de perigo

Como enunciado, para o cumprimento do presente objetivo, utilizou-se critérios topográficos e feições de instabilidade (indícios de perigo) como parâmetros indicativos de graus de perigo de uma determinada área à determinado movimento gravitacional de massa, tanto existente quanto potencial.

Quanto ao critério topográfico, procurou-se definir uma inclinação crítica favorável à deflagração de movimentos de massa, com base em estudos correlatos e interpretações das cicatrizes de deslizamentos identificadas em campo. Definiu-se, então, dois critérios topográficos.

O primeiro critério topográfico é baseado na Lei N° 6.766 de 1979, que dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano. Esta dispõe que terrenos com declividade igual ou superior a 30%, salvo casos em que se atende exigências específicas das autoridades competentes, não podem ser parcelados, isto é, ocupados. Assim, o primeiro critério topográfico adotado foi de áreas com declividades superiores à 17° (30%), sendo estas classificadas como de perigo moderado (P2).

O segundo critério topográfico, discorre sobre as inclinações com as quais é mais frequente a ocorrência de deslizamentos de terra identificados no Brasil. Ahrendt (2005), em estudos realizados nos solos residuais de gnaiss-migmatito e de aterro em áreas densamente povoadas no município de Campos do Jordão, identificou que as ocorrências de deslizamentos na localidade ocorreram em maior frequência em declividades superiores a 25°, sendo aqueles de maior magnitude entre as declividades de 30° a 40°. Em um estudo estatístico sobre diferentes tipos de movimentos de massa nos solos que ocorreram no Japão e no Brasil (PIMENTEL; SANTOS, 2018), identificou-se que 90% das encostas brasileiras com inclinação igual ou superior a 30° são propícias à deflagração desse tipo de processo. Entretanto, segundo Pimentel e Santos (2018), em função do adensamento populacional e ausência de planejamento adequado, as encostas brasileiras são ocupadas de forma desordenada com interferências antrópicas que contribuem para a fragilidade do terreno. Assim, quanto à inclinação crítica à deflagração de deslizamento de terra, recomenda a adoção de 25°.

Com bases nesses e em outros estudos similares que apontaram as mesmas magnitudes de inclinação, próximas à 30°, e no inventário de deslizamentos realizados na etapa de campo, adotou-se como segundo critério topográfico de qualificação de

áreas perigosas quanto à escorregamentos, a inclinação de 25°. Terrenos com inclinação superior a 25°, foram classificados como de perigo alto (P3). Um resumo dos critérios topográficos e as suas respectivas qualidades de perigo está representada no Quadro 4.

Quadro 4 - Qualificação do grau de perigo, baseada em critérios topográficos, referente ao processo de deslizamento de terra

Declividade	Perigo
Inclinação maior que 17°	P2
Inclinação maior que 25°	P3

Fonte: A autora (2019).

Quanto aos tipos de indícios de movimentações, e suas respectivas interpretações do fenômeno físico, estão dispostas nas alíneas a seguir, baseadas no manual da CPRM (PIMENTEL e SANTOS, 2018). O trabalho de identificação das feições de movimentos de massa e seus indícios de possível ocorrência, foi auxiliada pela ficha de campo presente no Anexo 1.

- a) Trincas no solo, especialmente no sopé de encostas. Essas fendas marcam a linha de movimentação do maciço e são perpendiculares ao deslocamento do terreno.
- b) Árvores inclinadas em direção à base da encosta. Sua direção indica a direção do movimento lento da massa de solo (fenômeno de rastejo).
- c) Muro de contenção embarrigado. Indica que os esforços atuantes sobre o muro, provenientes do empuxo do solo, já são maiores que a rigidez oferecida por este ao carregamento.
- d) Surgência de água ou disposição de água servida. Indica que o grau de saturação do solo pode estar elevado, ou até mesmo saturado, diminuindo a sua resistência ao cisalhamento.
- e) Degrau de abatimento. Indica um solapamento de uma massa de solo, isto é, o seu deslocamento vertical.
- f) Solapamento/descalçamento de fundações. Perda de material e deslocamento vertical da massa de solo de uma fundação. Indica a perda da capacidade de suporte do solo, podendo ocasionar deslizamentos de terra, caso este esteja na crista de um talude.

- g) Cicatrizes de deslizamento. Área marcada pela falta de vegetação, com solo exposto. Acúmulo de solo e detritos no sopé do talude (suas descrições conceituais e quanto ao o que observar em campo estão presentes no capítulo anterior).

A cada um desses índicos foi associado a um grau de perigo potencial do terreno para possibilitar à sua classificação quanto à propensão dos terrenos à movimentação de massa de maneira que retratasse a realidade identificada em campo, guiados pelo manual elaborado por Pimentel e Santos (2018). Salienta-se que a área de abrangência desta etapa de campo não contemplou a grande maioria da comunidade, mas não a sua totalidade. Salienta-se, também, que a identificação de tais indícios está limitada à experiência profissional de quem a realizou.

Todos os indícios, exceto as cicatrizes de deslizamento e degraus de abatimento/subsidência, foram classificados como perigo alto (P3). A ocorrência de deslizamento e deslocamento vertical pretéritos classificou a sua área de ocorrência como perigo muito alto (P4), uma vez que se entende que existem fragilidades ambientais, e/ou antrópicas, na localidade, que podem induzir a ocorrência de novos deslizamentos. Assim, tem-se no Quadro 5 a classificação adotada quanto ao tipo de indício de movimentação de talude e a magnitude associada do perigo.

Quadro 5 - Qualificação do grau de perigo, baseada em indícios de instabilidade do terreno, referente ao processo de deslizamento de terra, independente da classificação topográfica de perigo

Índicio de instabilidade	Perigo
Embarreamento/Trinca em muros de contenção	P3
Árvore inclinada	P3
Umedecimento do solo por deposição de esgoto	P3
Degrau de abatimento/Subsidência	P4
Cicatriz de deslizamento	P4

Fonte: A autora (2019).

Dessa forma, dado os critérios topográficos e de feições de instabilidade, definiu-se quatro classes de perigo, descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Descrição das classes de perigo de acordo com critérios topográficos e de feições de instabilidade

Perigo	Descrição
Baixo (P1)	Atende aos critérios topográficos favoráveis à estabilidade. Mantidas as condições existentes no terreno, é baixa a susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais
Médio (P2)	Atende ao primeiro critério topográfico (inclinação maior que 17°). O terreno não apresenta feições de instabilidade, assim como o registro de deslizamentos pretéritos. Mantidas as condições existentes no terreno e no clima, é média a susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais
Alto (P3)	Atende a todos os critérios topográficos desfavoráveis à estabilidade. Apresenta feições de instabilidade de maneira isolada, sem a presença de degraus de abatimento ou cicatrizes de deslizamento. Mantidas as condições existentes no terreno e no clima, é alta a susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais
Muito Alto (P4)	Atende a todos os critérios topográficos desfavoráveis à estabilidade. O terreno apresenta, com intensidade, feições de instabilidade e registros de deslizamentos pretéritos. Mantidas as condições existentes no terreno e no clima, é muito alta a susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos translacionais

Fonte: A autora (2019).

A qualificação da área de perigo seguiu a correspondência do maior grau de classificação, topográfico ou de feições, prevalecendo, no geral, a qualificação do perigo identificado em campo. Assim, se em uma área que não atendesse ao critério topográfico de deslizamento (inclinação maior que 30°), fosse identificado um muro de contenção embarrigado ou uma cicatriz de escorregamento, esta área receberia grau de perigo alto (P3) e muito alto (P4), respectivamente.

Quanto à delimitação da área de abrangência quando da ocorrência isolada dos indícios, adotou-se o critério de delimitação de uma área que abrangesse a mesma declividade de ocorrência do perigo, dentre as classificações topográficas (0° - 17°, 17° - 25°, 25°- inclinação máxima), restringindo-se à altura mínima do talude igual à 3 metros. Este critério também esteve associado ao estudo estatístico realizado no Japão e no Brasil de escorregamentos de solo (PIMENTEL; SANTOS, 2018), e em constatações de campo quanto às características (altura) dos taludes associados a escorregamentos de terra em Vila Nova. O manual da CPRM (PIMENTEL; SANTOS, 2018) propõe limitar as áreas críticas a escorregamentos a taludes com alturas maiores que 5 metros. No entanto, conforme constatado em campo, os deslizamentos recentes do tipo translacionais rasos, estiveram associados

a taludes de até 2,5 metros de altura e, no geral, 3 metros. Assim, preferiu-se adotar como altura mínima favorável a ocorrência de deslizamentos, a altura de 3 metros.

3.3.2.2 Identificação e classificação de vulnerabilidade

A identificação da vulnerabilidade das ocupações da área de estudo se deu de maneira visual buscando observar o padrão construtivo e os materiais empregados nas moradias. Assim como para definição dos graus de perigo ao longo da área, as características das ocupações foram classificadas em graus de vulnerabilidade. Empregou-se quatro classes de vulnerabilidade, de baixa (V1), associada a construções que apresentam laudo técnico que assegure a integridade física da construção frente a ocorrência de um movimento translacional raso, a muito alta (V4), que considera edificações precárias associadas a assentamentos não legalizados espalhados pelas várias regiões brasileiras, como também adotado pela por Pimentel e Santos (2018). As classes definidas e adotadas no presente trabalho estão apresentadas e descritas no Quadro 7.

Quadro 7 – Descrição das classes de vulnerabilidade das ocupações quanto ao padrão construtivo e materiais empregados

Vulnerabilidade	Descrição
Baixa (V1)	Construção em alvenaria bem construída assegurada por laudo técnico
Média (V2)	Construção em alvenaria visualmente bem construída e sem danos estruturais
Alta (V3)	Construção mista (alvenaria e madeira) ou totalmente em madeira visualmente bem construída e sem danos estruturais
Muito Alta (V4)	Construção em alvenaria e/ou em madeira com condições construtivas precárias e com danos estruturais presentes

Fonte: A autora (2019).

3.3.2.3 Classificação de risco

De modo geral, a qualificação de risco está fundamentada na análise do histórico de ocorrências, no reconhecimento de indícios de instabilidade no terreno e na resistência das construções frente à ocorrência do processo geodinâmico.

As classes de risco utilizadas no presente trabalho consideraram que a magnitude de um risco é definida de acordo com interação entre a intensidade do perigo e do grau de vulnerabilidade identificados em cada área. Conforme as quatro

classes de perigo e de vulnerabilidade pré-definidas, realizou-se multiplicações empíricas entre os graus de perigo e vulnerabilidade para se determinar o grau de risco, estabelecendo-se o grau para o risco maior do que o maior grau de perigo ou vulnerabilidade “multiplicados”, decisão tomada a favor da segurança, conforme também adotado no trabalho da CPRM (PIMENTEL e SANTOS; 2018). Assim, as quatro classes de risco, que vão de baixo (R1) a muito alto (R4), são resultado das interações apresentadas no Quadro 8, e os seus significados no Quadro 9.

Quadro 8 - Graus de intensidade de risco baseados na interação entre intensidade de perigo e graus de vulnerabilidade

Risco	Vulnerabilidade			
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Baixo	R1	R2	R3	R4
Médio	R2	R3	R4	R4
Alto	R3	R4	R4	R4
Muito Alto	R4	R4	R4	R4

Fonte: A autora (2019).

Quadro 9 – Descrição das classes de risco

Risco	Descrição
Baixo (R1)	Ausência de características topográficas desfavoráveis à estabilidade e de indícios de movimentos gravitacionais de massa. Alto nível de resistência das construções. Mantida as condições do terreno e da ocupação, é baixa a possibilidade de destruição das construções por escorregamentos de terra
Médio (R2)	Atende ao primeiro critério topográfico (inclinação maior que 17°), mas o terreno não apresenta indícios ou registros de movimentos de massa gravitacionais. Alto à moderável nível de resistência das construções. Mantidas as condições moderadas do terreno e da ocupação, é moderada a possibilidade de destruição das construções por escorregamentos de terra
Alto (R3)	Atende a todos os critérios topográficos desfavoráveis à estabilidade e apresenta indícios de movimentos gravitacionais de massa, apesar de não intensamente. Alto à baixo nível de resistência das construções. Mantidas as condições moderadas do terreno e da ocupação, é alta a possibilidade de destruição das construções por escorregamentos de terra
Muito Alto (R4)	Atende a todos os critérios topográficos desfavoráveis à estabilidade e o terreno apresenta intensos indícios ou registros de movimentos de massa gravitacionais. Alto a muito baixo nível de resistência das construções. Mantidas as condições do terreno e da ocupação, é muito alta a possibilidade de destruição das construções por escorregamentos de terra

Fonte: A autora (2019).

3.3.3 Análise de fatores de segurança

Para aplicação da modelagem matemática na área de estudo, a fim de quantificar as áreas suscetíveis a deslizamentos translacionais rasos segundo o cálculo de fatores de segurança, optou-se pela utilização do modelo do Talude Infinito, cujas principais premissas e formulação estão apresentados no Capítulo 2. A escolha do método se deve à quantidade relativamente pequena de parâmetros topográficos e geotécnicos do terreno que ele demanda para o cálculo do fator de segurança e à possibilidade de implementação em ambiente computacional georeferenciado e, então, quantificação do fator de segurança de extensas áreas. É, portanto, um método consideravelmente adequado para identificação de regiões mais ou menos suscetíveis à ocorrência de deslizamentos planares, desde que as condições de simulação sejam consideravelmente próximas à realidade. Segundo Ahrendt (2005), a vantagem de fazer a integração do modelo matemático com uma base cartográfica, a partir de dados topográficos, por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG), é a realização de análises espaciais. Ademais, segundo Hunt (1986), o método de análise de estabilidade de taludes utilizando o Talude Infinito é aplicável para solos residuais ou coluvionares sobre maciços rochosos pouco profundos, o que corresponde à área estudada.

A base cartográfica utilizada para cálculo dos fatores de segurança no presente trabalho é proveniente do levantamento topográfico descrito anteriormente. Por meio das curvas de níveis assim obtidas, equidistantes 0,5 m, gerou-se uma superfície *raster*, isto é, uma grade regular, em *software* com ambiente SIG, com resolução espacial de 0,5 m, com informações de elevações de cada célula (*pixel*) de tamanho 0,5 m por 0,5 m do mapa. Posteriormente, criou-se uma superfície *raster*, de mesma resolução da superfície criada com os valores de elevação do terreno, com os valores de inclinação de cada célula definida no mapa.

Dentre os parâmetros topográficos e geotécnicos requeridos para a análise de estabilidade utilizando a modelagem do Talude Infinito, está a inclinação do terreno, o peso específico, o intercepto coesivo e o ângulo de atrito das camadas de solo sobre a possível superfície de ruptura, bem como a sua profundidade, e a profundidade do nível d'água.

Por não se conhecer por completo os parâmetros geotécnicos que ocorrem na área estudada, definiu-se a determinação de três cenários com diferentes

parâmetros de peso específico, resistência ao cisalhamento e profundidades da superfície de ruptura, para dois grupos predominantes de solo que lá ocorrem, solos de aterro e solos residuais. Assim, buscou-se diminuir as incertezas das variabilidades geotécnicas dos solos de Vila Nova, baseando-se em análise de cenários com dados provenientes da literatura e dos ensaios realizados ao longo do presente trabalho. A descrição dos seis cenários modelados com suas respectivas profundidades de ruptura e parâmetros geotécnicos adotados está apresentada no Capítulo 5.

A classificação dos valores de fatores de segurança para estimativa dos níveis de susceptibilidade dos terrenos da comunidade a escorregamentos planares rasos, seguiu o seguinte critério:

- Fator de segurança menor do que 1,0: área com muito alta susceptibilidade a escorregamentos;
- Fator de segurança maior do que 1,0 e menor ou igual a 1,5: área com alta susceptibilidade a escorregamentos;
- Fator de segurança maior do que 1,5 e menor ou igual a 2,0: área com média susceptibilidade a escorregamentos;
- Fator de segurança maior do que 2,0: área com baixa susceptibilidade a escorregamentos.

Essa classificação de fatores de segurança buscou-se basear em interpretações físicas do seu resultado e em valores mínimos de segurança sugeridos por normas. Quando um fator de segurança é igual à 1, significa dizer que, fisicamente, o talude se encontra na eminência de ruptura, sendo os valores menores do que 1 indicativos de uma superfície em que a resistência ao cisalhamento do solo é menor do que a tensão cisalhante solicitante, apesar de não apresentar significado físico. A classificação segundo o valor de fator de segurança igual a 1,5 baseou-se no requisito da norma brasileira de estabilidade de taludes NBR 11682/2009, que estabelece 1,5 como o mínimo fator de segurança de locais que requerem alto grau de segurança, isto é, aqueles em que há intensa permanência de pessoas, como é no caso de Vila Nova, devido à intensa quantidade de residências. O valor de fator de segurança igual à 2, foi determinado como limite inferior para áreas de baixa susceptibilidade por ser um valor inteiro superior ao mínimo estabelecido pela NBR 11682/2009.

4 RESULTADOS

4.1 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

4.1.1 Mapa topográfico

Quanto às etapas de realização do aerolevante em Vila Nova, de maneira simplificada, iniciou-se com o planejamento de voo, quando se delimitou a área a ser sobrevoada e determinou a altitude e a velocidade de voo. Posteriormente, realizou-se o voo em campo a partir de um ponto de lançamento pré-definido ao passo que o operador acompanhava os parâmetros de voo como altitude, velocidade da aeronave e qualidade das fotos. O equipamento VANT utilizado em campo foi o modelo 4 da marca DJI (Figura 15).

Os principais produtos brutos obtidos a partir do aerolevante realizado em campo foram: (i) um mosaico, isto é, uma imagem georreferenciada de alta resolução obtida pela compilação de imagens de resolução 4 cm/pix, da área sobrevoada, e (ii) uma nuvem de pontos em formato LAS com coordenadas tridimensionais georreferenciadas do terreno e dos elementos sobrejacentes a ele (casas, árvores, etc), sendo sua densidade de 350 pontos/m². O sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais utilizado para ambos os produtos foi o Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22 sul, com datum horizontal SIRGAS2000, sendo as altitudes também referenciadas ao elipsoide do SIRGAS2000. Todos os dados obtidos em campo foram processados pelo Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação da UFPR (CEPAG).

Para garantir que as coordenadas das imagens obtidas pela tecnologia VANT tivessem qualidade geométrica e posicional adequadas de um produto cartográfico, realizou-se um georeferenciamento indireto (aerotriangulação) em pontos de controle e de checagem no campo para que fosse possível calibrar os dados obtidos pela técnica de aerofotogrametria e anular possíveis erros que possam ter sido processados por ela. Para tanto, utilizou-se um GPS900CS de dupla frequência da marca Leica, apresentado na Figura 15, disponibilizado pelo Laboratório de Topografia da UFPR. Observou-se que os dados obtidos pelo VANT estavam muito próximos aos obtidos com a calibração dos pontos de checagem.

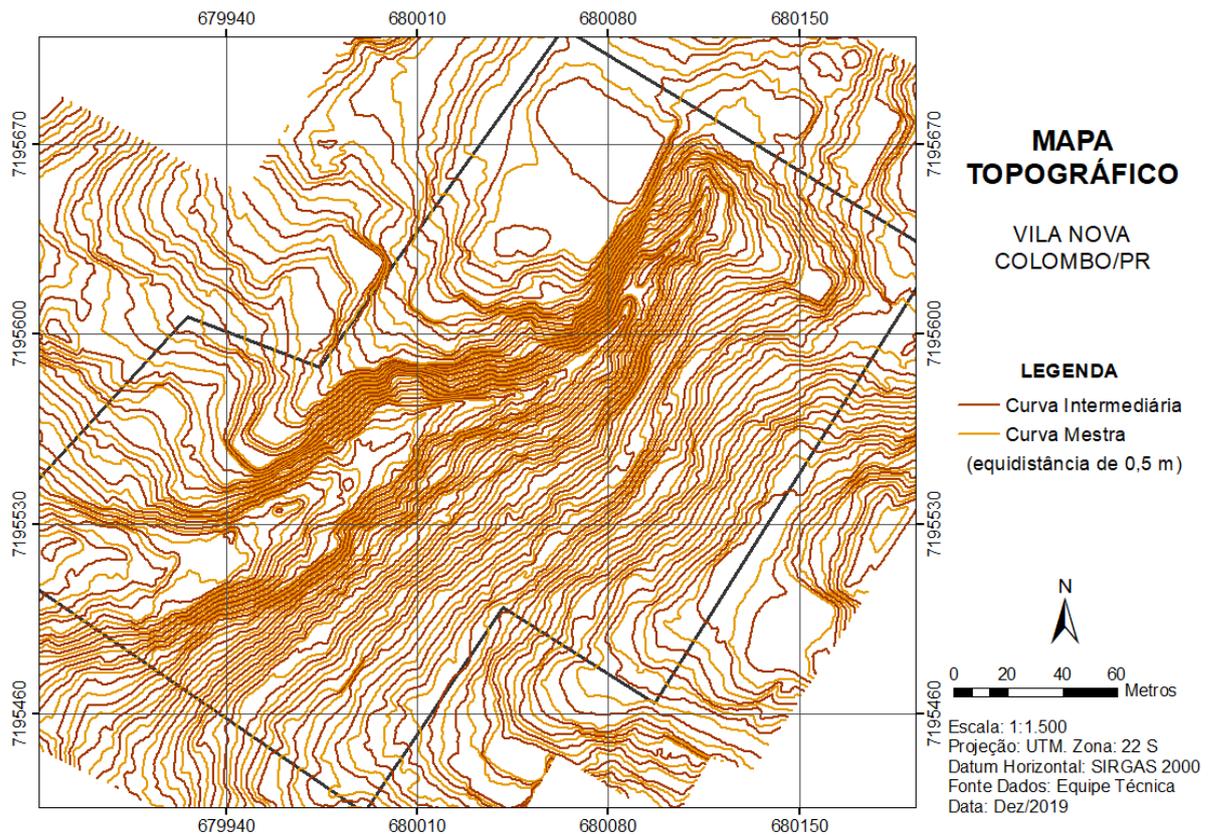
Figura 15 - Equipamentos utilizados no levantamento topográfico: (a) Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para aerolevanteamento; (b) GPS900CS para georeferenciamento



Fonte: A autora (2019).

Por fim, o terreno foi restituído por meio do processo de restituição estereofotogramétrica, pelo qual foi possível obter curvas de nível de equidistância de 0,5 m, a menor equidistância possível frente à quantidade de pixels obtidos pelo aerolevanteamento e densidade de residências e vegetação sobre o terreno. O mapa topográfico da região de estudo de Vila Nova pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Mapa topográfico do trecho de estudo de Vila Nova

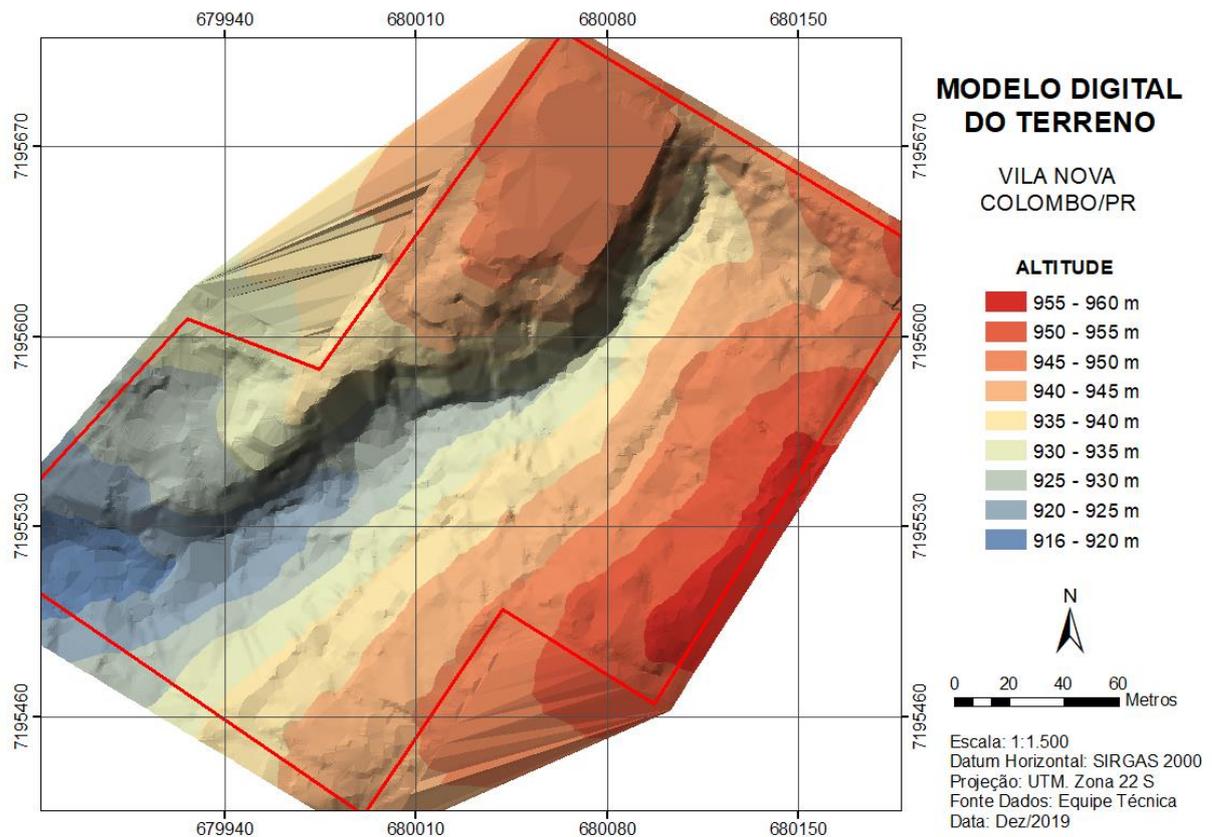


Fonte: A autora (2019).

4.1.2 Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo foi gerado em ambiente SIG a partir das curvas de níveis utilizando a técnica de interpolação *Triangulated Irregular Network* (TIN) que gera uma superfície triangulada, em que os vértices dos triângulos possuem coordenadas X, Y e Z. A menor elevação da área é de 916,5 m e a maior é de 957 m e o relevo é tipificado como um vale encaixado em “V”, podendo ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Modelo Digital do Terreno estudado de Vila Nova



Fonte: A autora (2019).

4.1.3 Mapa de declividade

O mapa de declividade da comunidade de Vila Nova está apresentado na Figura 18, e foi gerado a partir das curvas de nível do terreno, em ambiente SIG, criando-se uma feição do tipo *raster*, para ser possível calcular as declividades (i) de cada célula de resolução espacial de 0,5 m por 0,5 m.

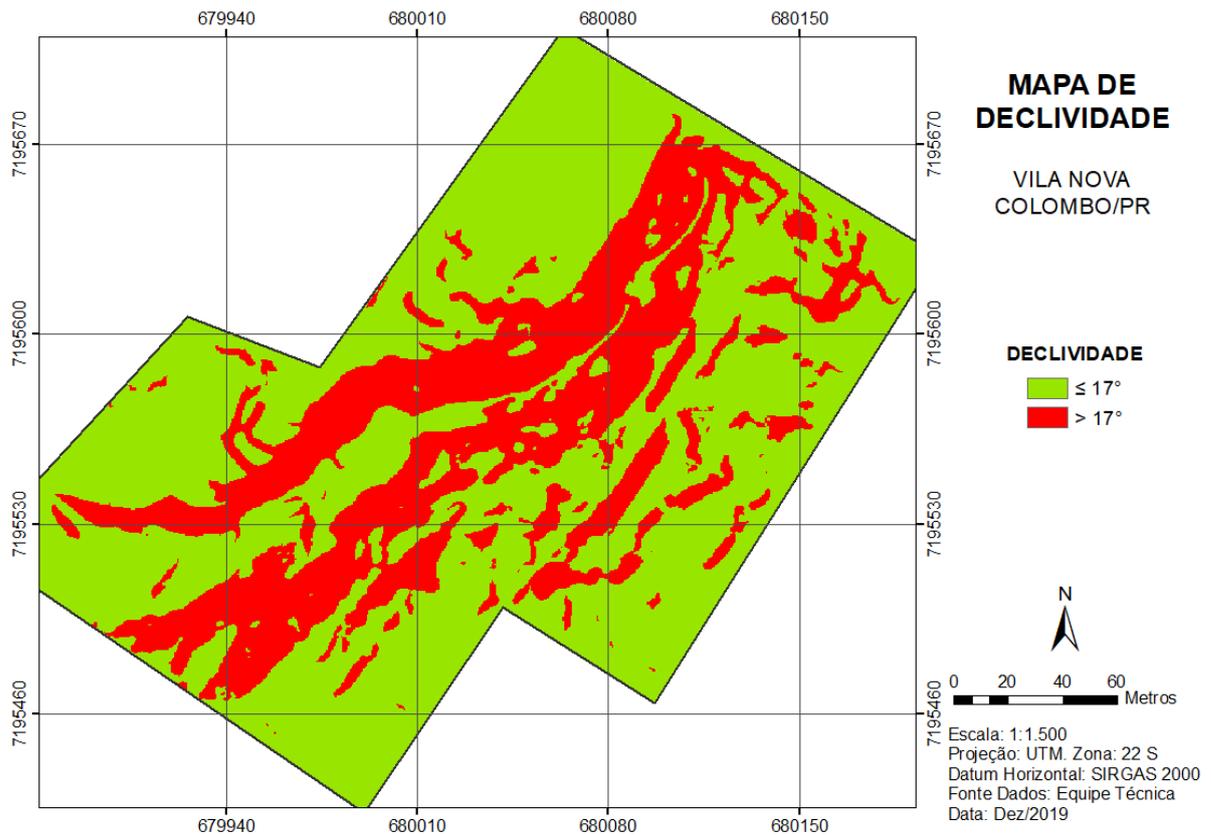
Na Tabela 1 apresenta-se nove classes de declividade adotadas para classificação dos terrenos de Vila Nova quanto à sua declividade e respectivas áreas de ocorrência. A classificação se baseou na classificação de relevos da EMBRAPA (2006), na Lei Nº 6.766, de 1979, que dispõe sobre a não ocupação de terrenos cuja declividade exceda 17° (30%), e na inclinação crítica à ocorrência de deslizamentos de terra no Brasil, 30° (SANTOS, 2014), a fim de facilitar o entendimento da geomorfologia local e as suas limitações à ocupação urbana.

Tabela 1 - Classes de declividade dos terrenos de Vila Nova

Classe	Declividade (°)	Área (m ²)	Porcentagem da área total (%)
1	$i \leq 2$	2082,25	4,31
2	$2 > i \leq 5$	5933,50	12,24
3	$5 > i \leq 10$	10880,75	22,44
4	$10 > i \leq 17$	14206,75	29,30
5	$17 > i \leq 20$	4636,50	9,56
6	$20 > i \leq 25$	4692,00	9,68
7	$25 > i \leq 30$	3303,25	6,81
8	$30 > i \leq 45$	2624,25	5,41
9	> 45	120,00	0,25

Observa-se que a maior ocorrência de declividades na região está entre 10° e 17°, o que corresponde a um relevo ondulado à fortemente ondulado, segundo a classificação EMBRAPA (2006). A ocorrência da declividade correspondente ao primeiro critério topográfico desfavorável à segurança de taludes adotado no presente trabalho, inclinações maiores que 17°, representa 32% do trecho estudado da comunidade.

Figura 18 - Mapa de declividade de Vila Nova



Fonte: A autora (2019).

4.1.4 Área de Preservação Permanente (APP)

De acordo com o Código Florestal brasileiro, alterado pela Lei nº 12.651/2012, são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP) aquelas legalmente protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com as funções ambientais de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade e o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura, como o caso do córrego que permeia Vila Nova, considera-se Área de Preservação Permanente a extensão de 30 (trinta) metros à direita e à esquerda do corpo d'água. Na Figura 19 apresenta-se a faixa de preservação permanente que, segundo o Código Florestal, devia existir em Vila Nova. Essa área equivale à, aproximadamente, 15,7 m², o que corresponde à 32% da área total analisada.

Figura 19 – Ideal Área de Preservação Permanente (APP) em Vila Nova



Fonte: A autora (2019).

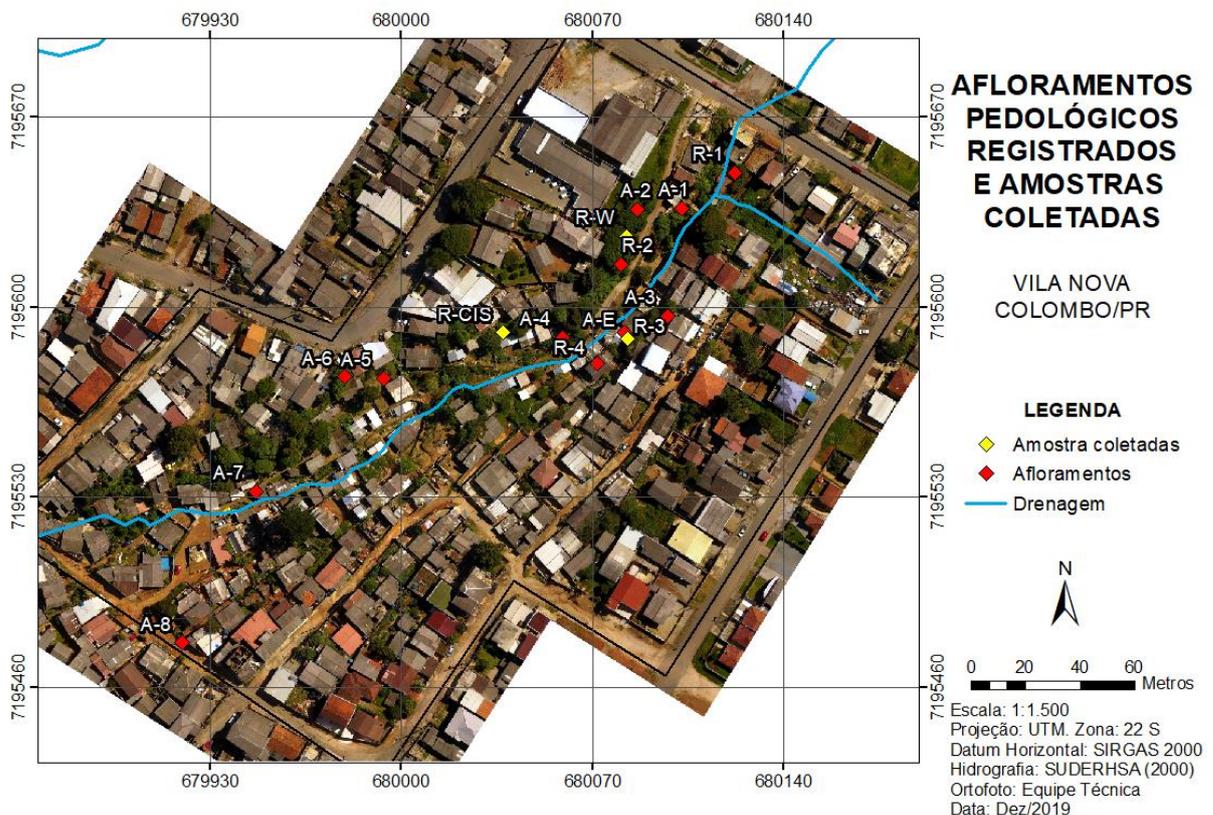
4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO GEOTÉCNICA

Geotecnicamente, a área estudada é caracterizada por uma intensa heterogeneidade de solos superficiais que vão desde os solos residuais de gnaisse-migmatito em diferentes graus de intemperismo até os solos aluvionares no leito do córrego que permeia o vale de Vila Nova, passando por aterros com elevada presença de resíduos sólidos domésticos e da construção civil, por materiais coluvionares e tálus e por afloramentos rochosos.

Considerou-se como pertencentes a uma mesma unidade os solos que apresentassem a possível mesma gênese, fato evidenciado pelo seu grau de intemperismo, sua coloração, textura e presença de resíduos sólidos domésticos e de construção. Ao longo das vertentes, verificou-se a ocorrência predominante de solos residuais e solos de aterro e foram esses os solos caracterizados em laboratórios e utilizados nas análises de fatores de segurança dos taludes.

A amostra indeformada, identificada como R-CIS, foi coletada de um talude de solo residual na Encosta W, em uma área de elevada declividade, ao lado de uma ruptura translacional presente no talude, indício identificado como I-13 no item referente à identificação das feições de instabilização. Duas coletas deformadas foram realizadas, uma em um solo residual mais intemperizado que o da coleta indeformada, também na Encosta W, mas distantes em planta, denominado como R-W, e um em um solo de aterro na Encosta E, denominado A-E. O mapa de localização dos materiais inconsolidados identificados e dos locais de coleta das amostras é apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Localização dos pontos de identificação de afloramentos de solo e coleta de amostras



Fonte: A autora (2019).

4.2.1 Reconhecimento de campo

4.2.1.1 Solos residuais de gnaiss migmatito

Ao longo das duas encostas, W e E, foram identificados, em afloramentos e em profundidade, solos residuais de origem gnaiss migmatito em diferentes graus de

intemperismo. Estes solos, formados naturalmente ao longo das vertentes, aparecem em colorações e estruturas diferenciadas que vão de esbranquiçado a amarelado, passando pela coloração alaranjada, mas podendo-se observar a mesma gênese em estruturas reliquiares, veios, textura e coloração. Por vezes, sobreposta à camada de solo residual, encontra-se uma delgada camada de solo orgânico.

No pé de alguns taludes, em cavas mais profundas ou na transição horizontal entre a rocha mãe e o solo residual mais maduro, encontra-se um solo com marcantes estruturas reliquiares herdadas da rocha mãe, solo saprolítico, de elevada compacidade e coloração esbranquiçada com faixas pretas e esverdeadas. Na transição para o solo residual na Encosta W verifica-se a presença de veios centimétricos de quartzo.

Sobreposto a esse solo, identificou-se um solo residual com menor grau de intemperismo e com textura silto areno argilosa, conforme resultado dos ensaios apresentados adiante, e coloração amarela com veios esverdeados e esbranquiçados. Apresenta intensa heterogeneidade, veios de solo argiloso e planos preferenciais. Foi neste solo em que se realizou a coleta da amostra indeformada (R-CIS) para realização do ensaio de cisalhamento direto, apresentada na Figura 21, na profundidade de 35 cm no mesmo talude em que se encontrou uma cicatriz de deslizamento de terra planar com superfície de ruptura à 90 cm da crista do escorregamento (indício I-13). Durante a coleta, observou-se que o solo apresentava veios pretos de pequena espessura e veios de solo argiloso marrom.

Destaca-se que a coleta de amostra indeformada nas demais unidades pedológicas, especialmente a de aterro, não foi possível devido às dificuldades encontradas em campo para cravação do anel frente à elevada presença de resíduos domésticos, como plásticos, vidros, madeiras, e resíduos de construção civil. Os corpos de prova foram coletados diretamente na célula de cisalhamento, cuidando para que não ocorresse perda de material, talhados com auxílio de faca e estilete, embalados em papel filme e papel alumínio e acondicionados e transportados em caixa de isopor preenchida com sarrafina. Os resultados dos ensaios de Cisalhamento Direto estão apresentados no item subsequente.

Figura 21 – Coleta da amostra indeformada de solo residual diretamente nas células de cisalhamento. (a) poço e profundidade de coleta; (b) detalhe da amostra amarela esverdeada com veios argilosos



Fonte: A autora (2019).

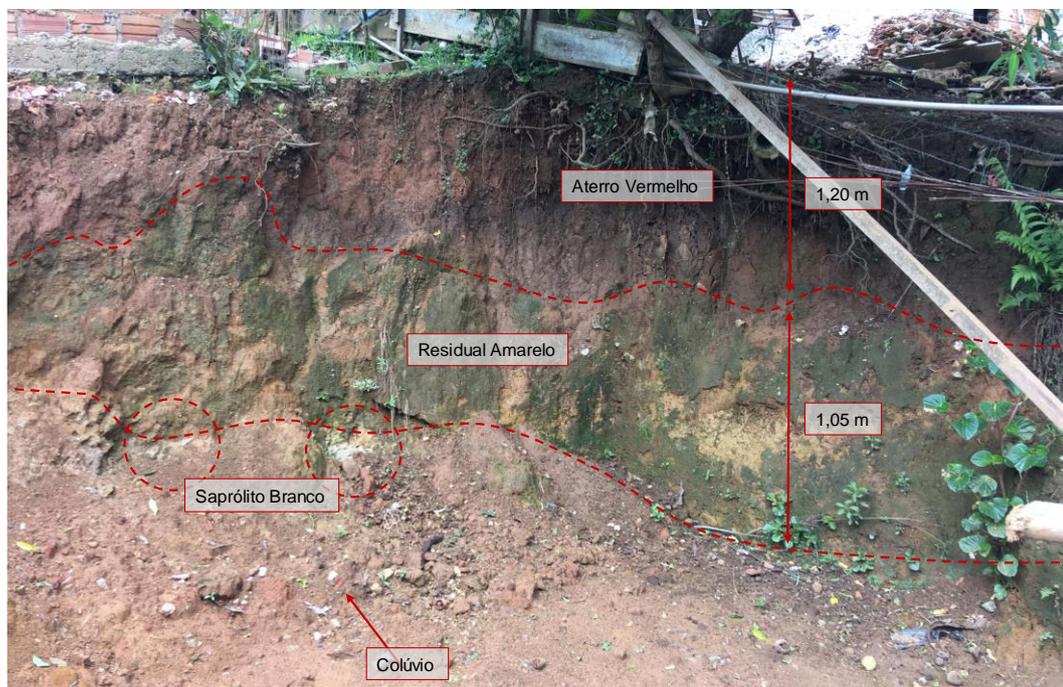
Por vezes, acima deste solo, verifica-se a presença de um solo de coloração amarela clara de textura predominantemente siltosa, de onde se coletou a amostra R-W. Esse solo possui menor intensidade de estruturas reliquiares e heterogeneidade quando comparado ao solo anterior, demonstrando estar sob um maior grau de intemperismo. As Figura 22 e Figura 23 apresentam exemplos típicos de perfis e transições dos solos residuais identificados.

Figura 22 - Perfil de alteração de solo residual típico de Vila Nova (complexo gnáissico migmatítico) – afloramento R-2



Fonte: A autora (2019).

Figura 23 - Perfil de alteração de solo residual, sobreposto à camada de aterro e de matéria orgânica. Presença de material movimentado (colúvio) - afloramento R-1



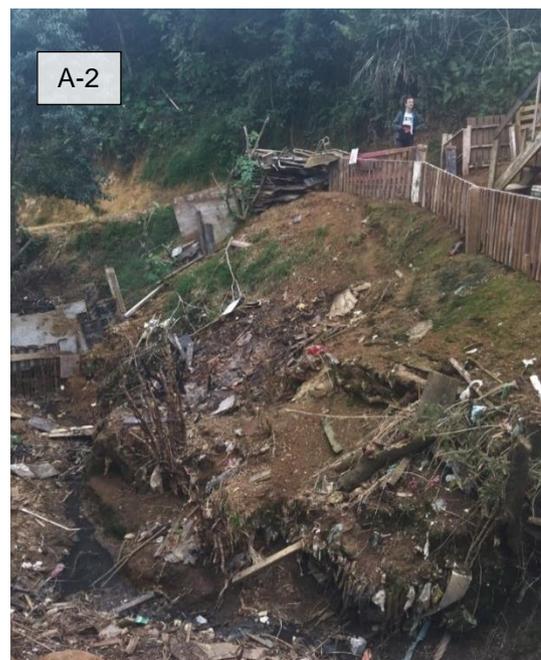
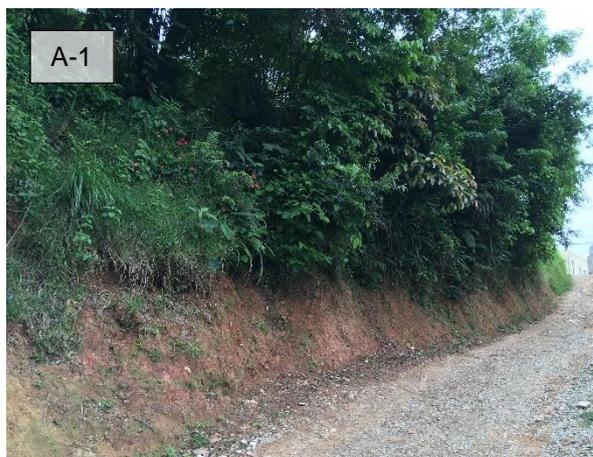
Fonte: A autora (2019).

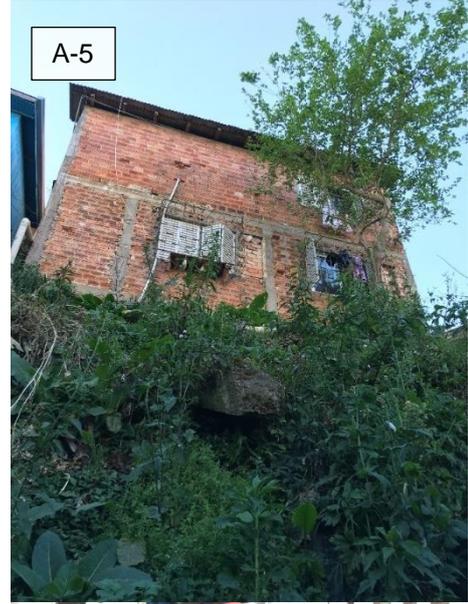
4.2.1.2 Solos de aterro

Presente em diversos pontos da comunidade, os solos de aterro aparecem com frequência como fundação das moradias, resultantes do corte e aterro dos solos residuais naturais da encosta para construção de platôs e assentamento das construções, ou em aterros de bota fora proveniente da abertura de vias e caminhamentos não asfaltados ou do próprio processo de escavação dos cortes para obtenção dos materiais para construção dos platôs.

Possuem textura mais argilosa em relação ao solo residual e aspecto avermelhado por já terem sido movimentados artificialmente do seu local de formação geológica e, por conseguinte, perdido ligações cimentantes (coesão) e estrutura mineralógica espacial, o que aumenta a entrada e iteração, e em constante e direto contato com agentes erosivos, água, vento e agentes biológicos, e desintegração físicas das suas partículas sólidas. Salienta-se que, alguns materiais exemplos de solo de aterro apresentados nas fotografias da Figura 24 podem ser, também, materiais coluvionares. Observa-se que abaixo da amostra de aterro A-E, há a presença de um solo residual. Mesmo com a pequena profundidade, e de não ser possível verificar todos os detalhes de coleta na fotografia, observou-se que a amostra coletada era similar aos solos que ocorriam em outras partes da comunidade.

Figura 24 - Afloramentos de solo de aterro em Vila Nova







Fonte: A autora (2019).

4.2.1.3 Afloramento rochoso

Identificou-se um expressivo afloramento rochoso em um trecho de 25 m em planta no sopé da Encosta W. O afloramento gnaíssico migmatito de elevada declividade compõe um perfil de intemperismo disposto na horizontal, conforme apresentado nos itens subseqüentes. Estruturalmente, o maciço se encontra consideravelmente fraturado com planos de fratura ora dispostos paralelamente ao talude, ora transversais, formando cunhas de fraturas (Figura 25). Além dos blocos de rocha fraturados, foram encontradas intrusões centimétricas de rocha folheada, isto é, cisalhada, indicando a ocorrência de movimento de cisalhamento na região ao longo de sua vida geológica. Veios de quartzo em dimensões centimétricas também foram encontradas tanto nos blocos de rocha quanto nas transições entre a rocha sã e o solo residual.

Figura 25 - Afloramento de xisto do Complexo Gnáisse-Migmatito: (a) fraturas paralelas e transversais ao talude formando cunhas; (b) fraturas perpendiculares ao talude.



Fonte: A autora (2019).

4.2.2 Ensaios de laboratório

4.2.2.1 Caracterização física

O solo residual coletado com maior grau de heterogeneidade e o qual foi submetido ao ensaio de Cisalhamento Direto, apresentou composição granulométrica predominantemente siltosa, mas com expressiva quantidade de areia e argila, sendo classificado como um solo silte areno argiloso. Observa-se o elevado teor de umidade natural, o que corresponde à aproximadamente 95% de grau de saturação, conforme pode-se calcular a partir dos dados da coleta da amostra indeformada.

Tabela 2 – Resultados da caracterização física do solo R-CIS

Umidade Natural	Massa específica real dos grãos	Composição granulométrica			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
%	(g/cm ³)	(% < 2 μm)	(2 μm < % < 0,06 mm)	(0,06 mm < % < 2,0 mm)	(2,0 mm < % < 60 mm)
32,04	2,57	27,5	43,5	28,5	0,4

Fonte: A autora (2019).

O solo residual amarelo R-W com maior grau de intemperismo quando comparado ao solo anterior identificado em Vila Nova, na encosta W, apresentou granulometria uniforme e predominantemente siltosa, conforme disposto na Tabela 3, junto a sua umidade natural quando da data da coleta e sua massa específica real dos grãos.

Tabela 3 – Resultados da caracterização física do solo R-W

Umidade Natural	Massa específica real dos grãos	Composição granulométrica			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
%	(g/cm ³)	(% < 2 μm)	(2 μm < % < 0,06 mm)	(0,06 mm < % < 2,0 mm)	(2,0 mm < % < 60 mm)
13,97	2,63	1,3	75,8	22,5	0,3

Fonte: A autora (2019).

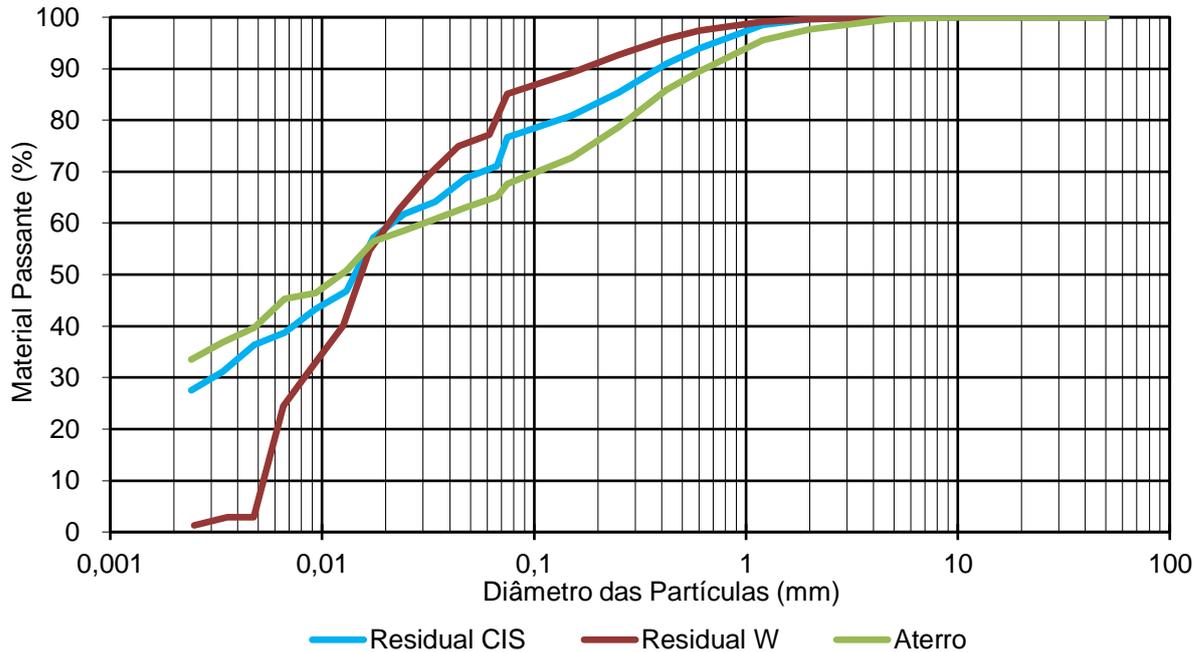
Por fim, o solo de aterro apresentou ligeira predominância de argila, sendo classificado como uma argila areno siltosa, o que corrobora com a assertiva de que solos mais intemperizados tendem a se tornar mais argilosos. Apresenta-se na Tabela 4 os demais dados físicos determinados em laboratório para o solo de aterro. A Figura 26 apresenta as curvas granulométricas dos solos ensaiados.

Tabela 4 – Resultados da caracterização física do solo de aterro

Umidade Natural	Massa específica real dos grãos	Composição granulométrica			
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho
%	(g/cm ³)	(% < 2 μm)	(2 μm < % < 0,06 mm)	(0,06 mm < % < 2,0 mm)	(2,0 mm < % < 60 mm)
31,93	2,52	33,5	31,7	32,5	2,3

Fonte: A autora (2019).

Figura 26 - Curvas granulométricas dos solos ensaiados



Fonte: A autora (2019).

4.2.2.2 Resistência ao cisalhamento

Foram realizados quatro (04) ensaios de cisalhamento direto na amostra indeformada de solo residual (R-CIS) nas tensões verticais de 200 kPa, 100 kPa, 50 kPa e 25 kPa, utilizando-se a técnica de reversão.

Durante a primeira fase do ensaio, a caixa de cisalhamento foi inundada com água destilada concomitantemente à aplicação da tensão vertical de ensaio. Após o período de adensamento, isto é, quando os deslocamentos verticais se estabilizaram, iniciou-se a etapa de cisalhamento. Nesta etapa, impôs-se uma velocidade constante de deslocamento na parte inferior da caixa suficientemente baixa para que não ocorresse excesso poropressão significativo na ruptura. Essa velocidade foi determinada com base na curva de adensamento obtida na primeira fase do ensaio (ensaio eodométrico), sendo o tempo de ruptura obtido conforme a metodologia proposta por Gibson e Henken (1954), indicado na Equação 6.

$$t_f = 12,7 t_{100} \quad (6)$$

Sendo:

t_f = tempo de ruptura, em minutos;

t_{100} = tempo necessário para ocorrer 100% do adensamento da amostra, em minutos (valor obtido do ensaio eodométrico).

O deslocamento relativo exigido pela amostra para a sua ruptura foi equivalente a uma deformação de 8%, o que equivale à 4,8 mm. Este valor se mostrou um pouco menor do que as referências da norma de ensaios ASTM D3080:2011 de modo a reduzir perdas de material durante os processos de reversão e “recisalamento”. Por fim, a velocidade de cisalhamento a ser imposta foi calculada segundo a Equação 7.

$$v_f = \frac{d_f}{t_f} \quad (7)$$

Sendo:

v_f = velocidade de ruptura, em mm/min;

d_f = deslocamento lateral estimado para ocorrer a ruptura, em mm.

Desse modo, a velocidade calculada para o deslocamento da caixa de cisalhamento foi de 1,26, uma vez que o tempo de adensamento da amostra submetida a maior tensão vertical foi de 3,81 minutos. No entanto, preferiu-se adotar uma velocidade menor, igual à 0,08 mm/min, correspondente a um tempo de ruptura de 60 minutos, pelo fato da velocidade calculada ser muito rápida, mesmo que teoricamente não gerasse poropressões. Os valores de velocidade calculados e adotados nos processos de cisalhamento estão sumarizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Velocidades adotadas no ensaio de Cisalhamento Direto com reversão

t_{100} (min)	Tempo de Ruptura (min)	Velocidade de Cisalhamento Calculada (mm/min)	Velocidade de Cisalhamento Adotada (mm/min)	Tempo para Atingir a Resistência de Pico (min)	Velocidade de Reversão Calculada (mm/min)	Velocidade de Reversão Adotada (mm/min)
0,30	3,81	1,26	0,08	39,32	0,18	0,18

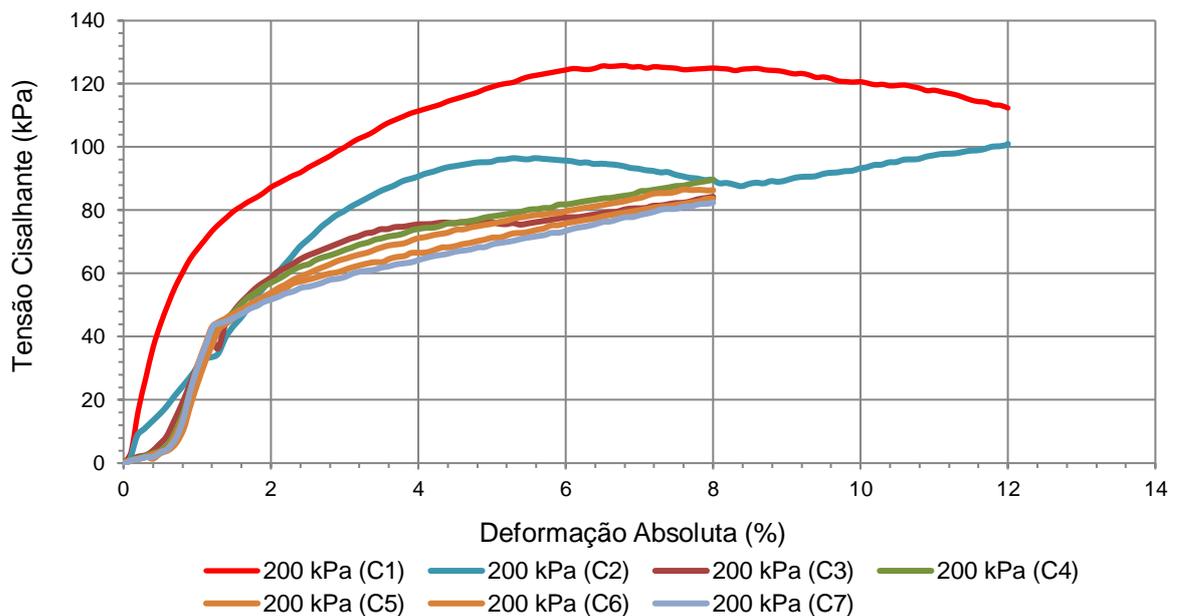
Fonte: A autora (2019).

Para realizar a técnica de reversão e obter os parâmetros de resistência residual do solo, seguiu-se as prescrições da BS 1377-7 (1990) retornando a caixa de cisalhamento para a sua posição inicial após cada ciclo de cisalhamento a uma velocidade determinada segundo o tempo em que a amostra levou para atingir a sua maior resistência ao cisalhamento (resistência de pico) no primeiro ciclo de

cisalhamento. Nos quatro corpos de prova, realizaram-se aproximadamente 10 ciclos de cisalhamento, sendo o primeiro ciclo correspondente a sua maior resistência ao cisalhamento.

As curvas tensão cisalhante e deformação horizontal obtidas nos, aproximadamente, 10 ciclos de cisalhamento para cada um dos 4 corpos de prova ensaiados estão apresentados na Figura 27 à Figura 30, correspondentes às tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, respectivamente. Cada curva presente no gráfico representa um ciclo de cisalhamento, denominados de C1 à C10. Denomina-se no gráfico como deformação absoluta às deformações ocorridas em cada um dos corpos de prova quando estes foram submetidos novamente ao cisalhamento, e não as deformações acumuladas ao longo da técnica de reversão. Conforme pode ser observado, a crescente submissão de cisalhamentos nos corpos de prova diminui gradativamente a resistência ao cisalhamento deste.

Figura 27 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 200 kPa durante a técnica de reversão



Fonte: A autora (2019).

Figura 28 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 100 kPa durante a técnica de reversão

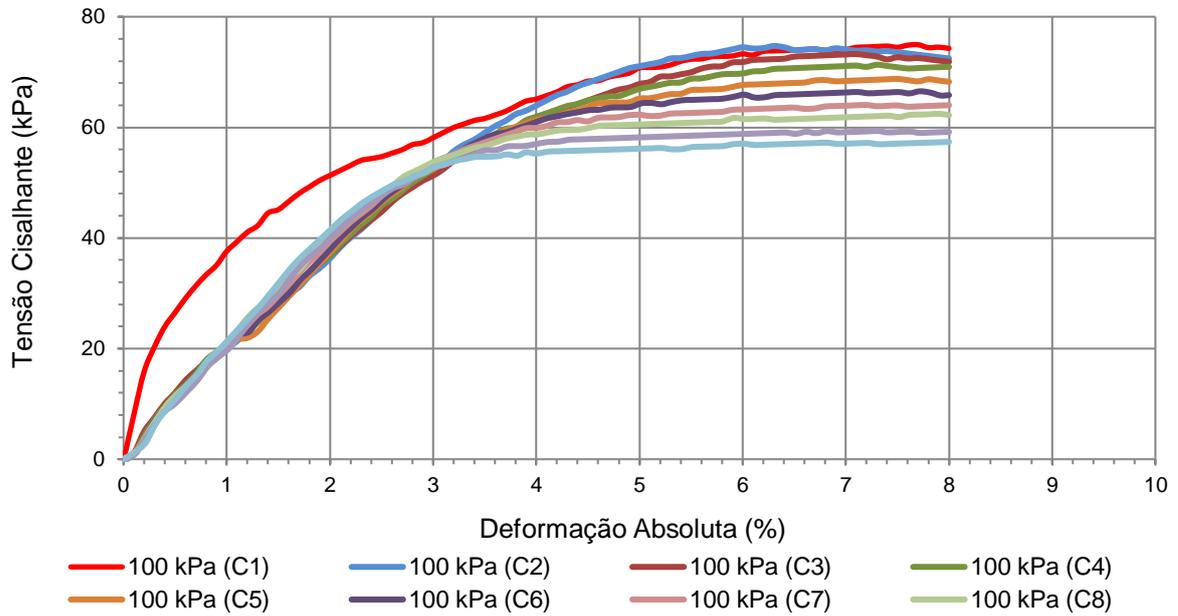


Figura 29 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 50 kPa durante a técnica de reversão

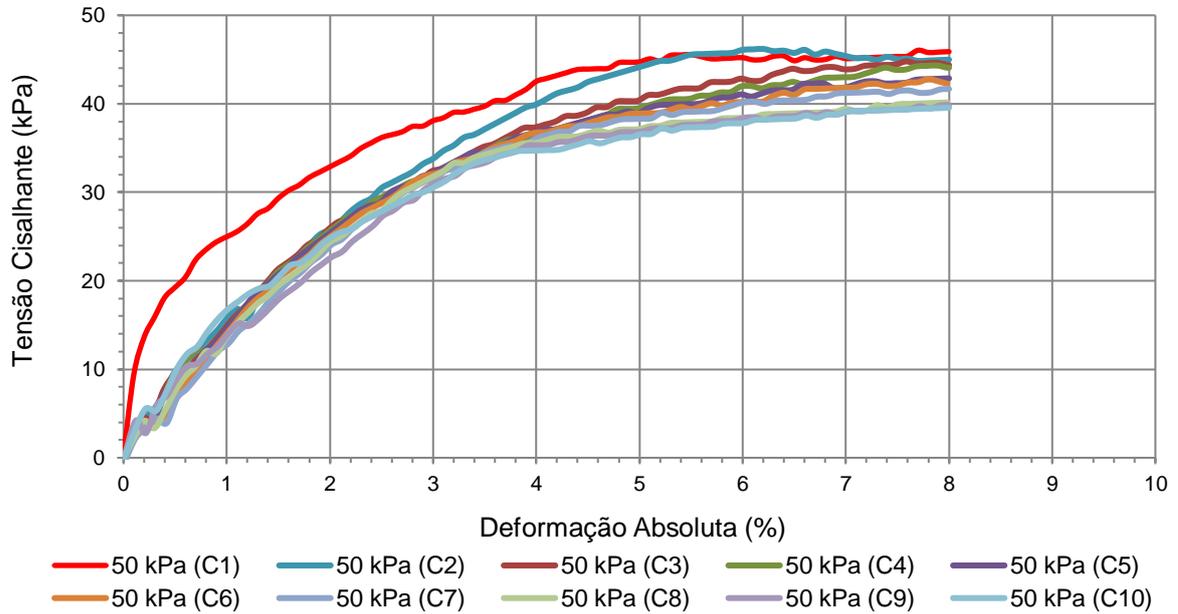
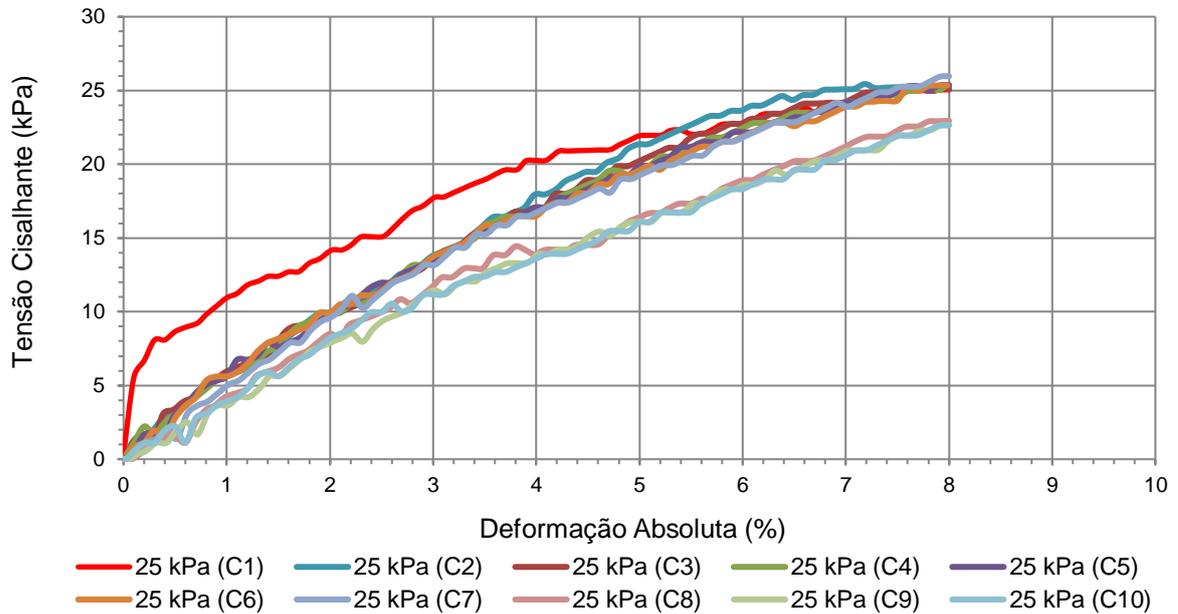


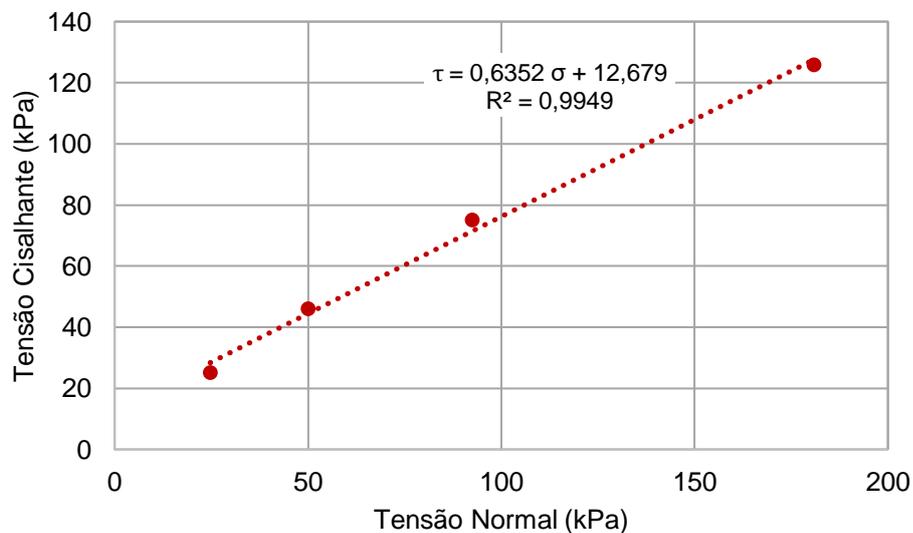
Figura 30 - Curvas tensão cisalhante e deformação horizontal do corpo de prova confinado à 25 kPa durante a técnica de reversão



O peso específico natural do solo calculado a partir dos dados da massa e do volume da célula de cisalhamento é em torno de 17,5 kN/m³ e o grau de saturação natural em torno de 95%, quando da data da coleta em campo.

A envoltória de resistência ao cisalhamento de Mohr Coulomb correspondente ao primeiro cisalhamento (C1), quando ocorre a máxima resistência ao cisalhamento do solo, está representada na Figura 31.

Figura 31 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para os valores de tensões cisalhantes máximas dos primeiros cisalhamentos



Conforme o ajuste linear proposto pelo método, obteve-se um valor de intercepto coesivo igual à 12,68 kPa e um valor de ângulo de atrito de 32,42°, os maiores parâmetros para este solo (Tabela 6).

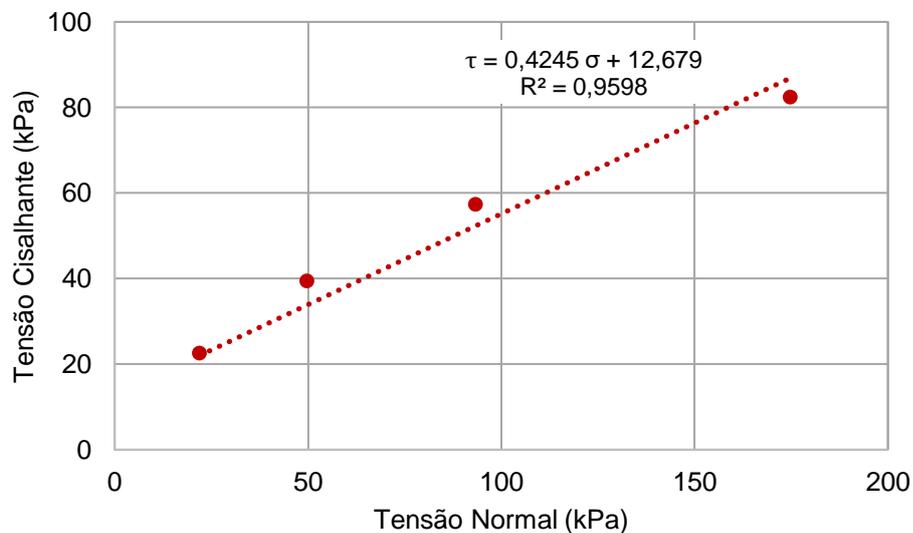
Tabela 6 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de pico (primeiros cisalhamentos)

Intercepto Coesivo (c') (kPa)	Ângulo de Atrito (φ') (°)
12,68	32,42

Fonte: A autora (2019).

A envoltória de resistência ao cisalhamento de Mohr Coulomb correspondente ao último cisalhamento (C10), quando ocorre a resistência ao cisalhamento do solo a grandes deformações – resistência residual, está representada na Figura 32.

Figura 32 - Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para os valores de tensões cisalhantes máximas dos últimos cisalhamentos



Fonte: A autora (2019).

Com melhor ajuste linear possível, obteve-se um valor de intercepto coesivo maior que o encontrado para o primeiro ensaio, igual à 18,26 kPa. Assim, por se tratar de um ajuste de reta, impôs-se que o intercepto coesivo fosse igual à 12,68 kPa, o valor obtido com os dados referentes aos primeiros cisalhamentos, e encontrou-se um ângulo de atrito correspondente igual à 23°, conforme disposto na Tabela 7. Tal

medida foi adotada pois não é razoável que a coesão do solo aumente com 10 cisalhamentos impostos em um mesmo plano de ruptura.

Tabela 7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento residuais (últimos cisalhamentos)

Intercepto Coesivo (c')	Ângulo de Atrito (ϕ')
(kPa)	(°)
12,68	23,00

Fonte: A autora (2019).

Baseados nesses valores de resistência residual que se determinou os parâmetros utilizados na modelagem do Talude Infinito para os cenários de solo residual, tanto intercepto coesivo como ângulo de atrito, e para os cenários de solo de aterro, no que tange o ângulo de atrito. As variações dos cenários, a partir dos resultados dos ensaios e da literatura adotada, considerou um aumento gradual da resistência do solo conforme o aumento da profundidade deste.

4.3 SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA – ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa de susceptibilidade dos terrenos de Vila Nova a escorregamentos translacionais foi realizada conforme apresentado no Capítulo 3, buscando-se cadastrar as feições e os indícios de instabilidade para que, junto aos critérios topográficos pré-definidos, fosse possível qualificar a intensidade dessa susceptibilidade ao longo da área. De maneira análoga, analisando a interação entre as intensidades dos perigos e os graus de vulnerabilidade frente ao processo de escorregamento de cada área mapeada, foi possível qualificar os níveis de riscos a escorregamentos translacionais, com base nos critérios definidos no Capítulo 3.

4.3.1 Cadastro das feições de movimentos gravitacionais de massa

O reconhecimento *in situ* de escorregamentos em Vila Nova se deu em visitas de campo realizadas entre outubro de 2018 e dezembro de 2019, sendo as realizadas a partir de meados de 2019 auxiliadas pela ficha de campo inserida no Anexo 1. Assim, tratam-se de escorregamentos recentes e deflagrados em diferentes épocas do ano. Em fotografias aéreas obtidas pelo Google Earth Pro, não foi possível

identificar escorregamentos antigos, fato atribuído à provável pequena magnitude dos movimentos datados do início de monitoramento de satélites disponibilizado pelo programa na área (2004), e pela densa vegetação que, ao longo do tempo, foi substituída por residências. Além disso, ressalta-se que não foram realizados estudos acerca da correlação existente entre a ocorrência de eventos pluviométricos e a deflagração de deslizamentos de terra, limitação que impossibilita a determinação de intensidades de precipitação críticas à deflagração de deslizamentos.

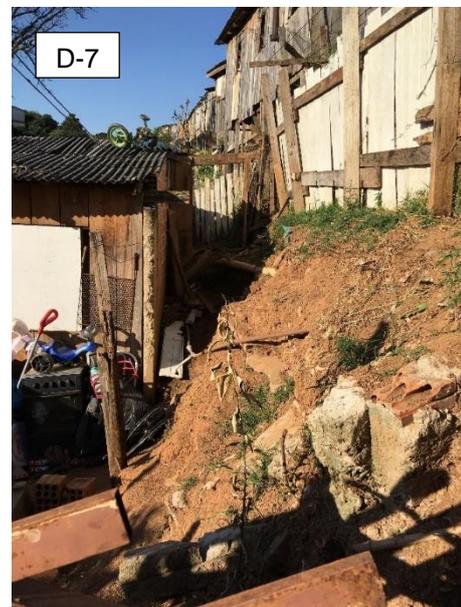
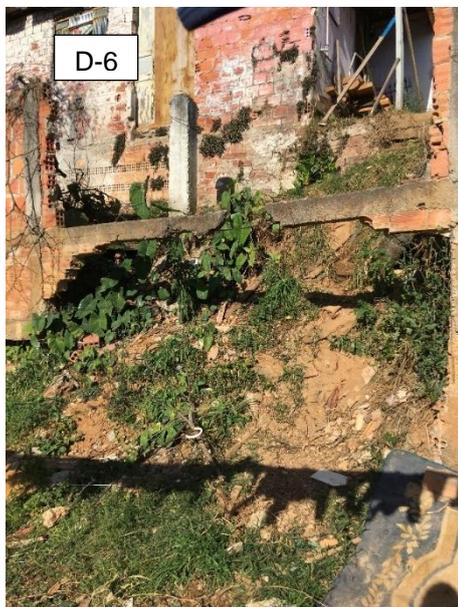
Ao todo, foram registrados sete escorregamentos, denominados D-1 a D-7, sendo possível observar as seguintes características:

- a) Tipo de movimento gravitacional: todos os movimentos (D-1 a D-7) se tratam de escorregamentos translacionais, devido aos fatos de as superfícies de cisalhamento se apresentarem majoritariamente retilíneas e paralelas à encosta ou ao talude e à considerável deformação e heterogeneidade da massa deslocada;
- b) Profundidade de ruptura: todos os movimentos (D-1 a D-7) estavam delimitados à aproximadamente um metro de profundidade, caracterizando-os como deslizamentos rasos;
- c) Materiais inconsolidados envolvidos: todos os movimentos (D-1 a D-7) foram deflagrados em solos de aterro;
- d) Localização no mapa base: verificar Figura 34.

Ressalta-se que o registro de alguns dos movimentos esteve intimamente ligado à um evento pluviométrico anterior. A água da chuva que infiltra pela superfície do terreno, diminui a sucção, isto é, a poropressão de água negativa, de solo que atua como uma coesão “aparente”, elevando a resistência ao cisalhamento do material. Observa-se que, durante a movimentação, a massa de solo tende a englobar a vegetação e os entulhos sobre ela, aumentando o volume de material em movimento. Na Figura 33 apresenta-se o registro fotográficos dos escorregamentos identificados.

Figura 33 - Deslizamentos registrados em Vila Nova entre outubro de 2018 e dezembro de 2019





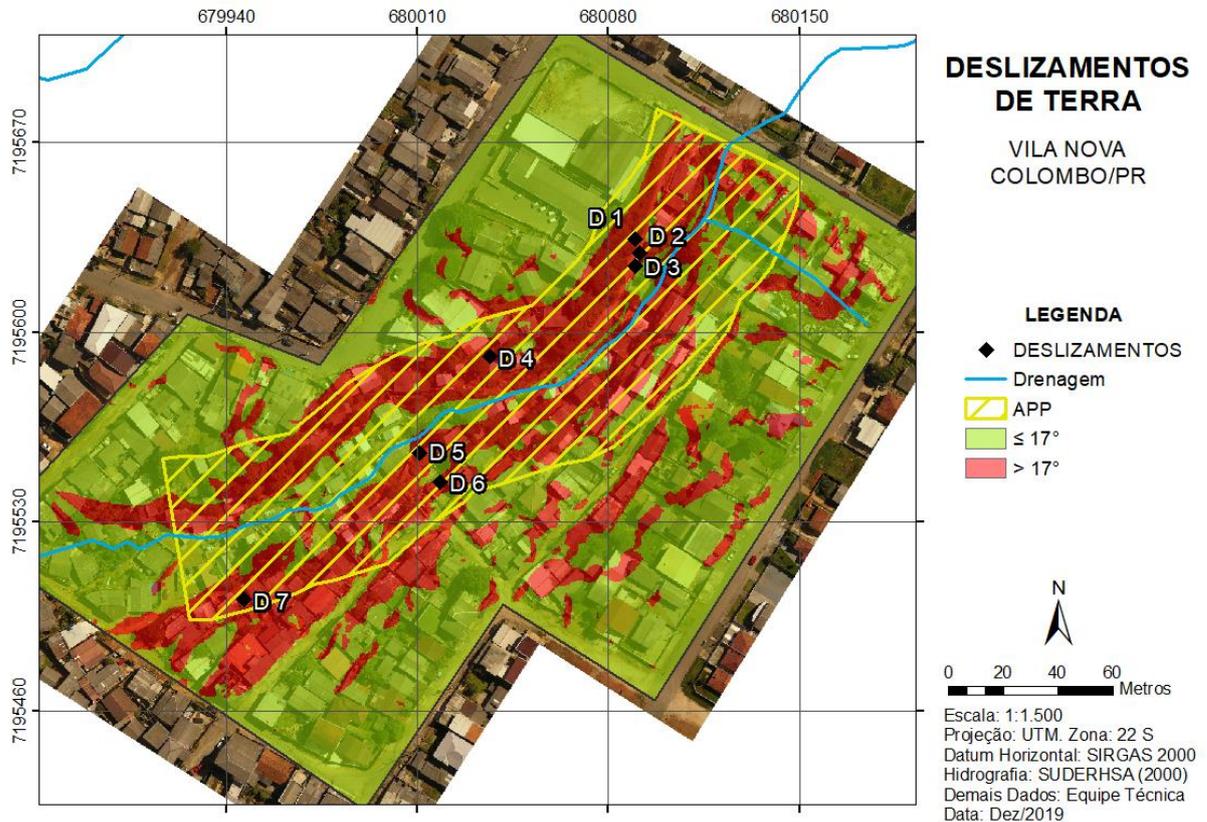
Fonte: A autora (2019).

No item seguinte, esses escorregamentos são classificados quanto ao grau de perigo para realização da análise espacial da distribuição das susceptibilidades do terreno de Vila Nova quanto a escorregamentos.

Em uma análise da relação existente entre a declividade do terreno e a deflagração de um escorregamento translacional raso, utilizando-se a base cartográfica já apresentada, em escala 1:1.500, e de posse das coordenadas geográficas das ocorrências dos deslizamentos recentes, verificou-se que, nas proximidades dos registros, a declividade do terreno se encontra entre 25° e 40°, sendo o deslizamento D-6 associado à menor declividade, igual à 27°, e o D-1, à maior, 40°, corroborando com a escolha de classificação das áreas de perigo alto (P3)

àquelas cuja declividade do terreno é maior do que 25° . Na Figura 34 pode-se observar o local de ocorrência do deslizamento sobreposto ao mapa de declividades e da Área de Preservação Permanente da região.

Figura 34 - Mapa de registros de deslizamentos de terra recentes em Vila Nova



Fonte: A autora (2019).

4.3.2 Identificação e classificação de perigos e vulnerabilidades

Como parte do escopo da metodologia proposta, a identificação de indícios de movimentos de massa, concomitante ao reconhecimento *in situ* de escorregamentos pretéritos, e de verificação das condições de ocupação, foram subsídios para analisar os perigos e vulnerabilidades frente ao processo de escorregamento translacional de terra. Assim, com auxílio da ficha de campo, descreveu-se 18 pontos, denominados de I-1 a I-18 considerando-se os sete pontos de escorregamentos apresentados anteriormente, em que se observou a ocorrência de degraus de abatimento, subsidências, cicatrizes de escorregamento, embarrigamentos e trincas em muros de contenção, troncos de árvores inclinados e vazamentos de tubulação de água/esgoto. Observou-se, também, que a totalidade das construções nos pontos discretizados,

eram em, majoritariamente, madeira, algumas em alvenaria, com precárias técnicas construtivas, tanto de infraestrutura (fundação), quanto de superestrutura, algumas apresentando danos estruturais.

Apresenta-se no Quadro 10 o registro fotográfico dos indícios de instabilidade identificados e a sua classificação de intensidade de acordo com a metodologia proposta no Capítulo 3. Classifica-se, também, o grau de vulnerabilidade da edificação associada ao ponto analisado.

Quadro 10 - Indícios de instabilidade e verificação de vulnerabilidade

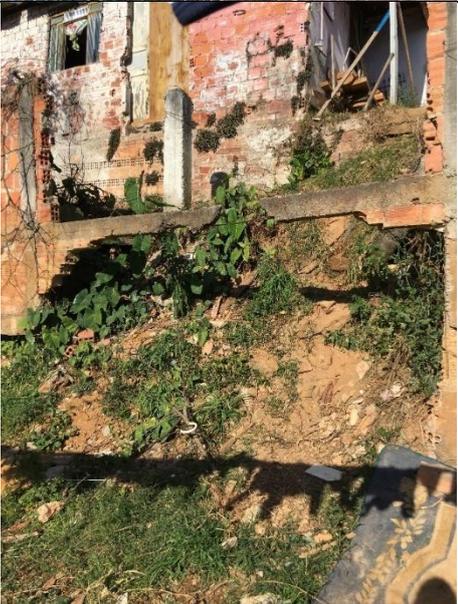
Ponto	Indício de instabilidade/ Grau de Perigo	Grau de Vulnerabilidade	Fotografia
I-1	Subsidência e degrau de abatimento Alto (P4)	Muito Alta (V4)	
I-2	Subsidência e degrau de abatimento Alto (P4)	Muito Alta (V4)	

I-3	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	-	
I-4	<p>Degrau de abatimento</p> <p>Alto (P4)</p>	Muito Alta (V4)	
I-5	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	-	

I-6	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	-	
I-7	<p>Umedecimento por vazamento esgoto</p> <p>Alto (P3)</p>	Muito Alta (V4)	
I-8	<p>Embarrigamento e trinca em muro de contenção</p> <p>Alto (P3)</p>	Muito Alta (V4)	

I-9	Trinca em muro de contenção e tronco de árvore inclinada Alto (P3)	Muito Alta (V4)	
I-10	Subsidência e umedecimento por deposição de esgoto Alto (P4)	Muito Alta (V4)	

I-11	<p>Umedecimento por vazamento de esgoto</p> <p>Alto (P3)</p>	Muito Alta (P4)	
I-12	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	Muito Alta (V4)	
I-13	<p>Umedecimento por deposição de esgoto</p> <p>Alto (P3)</p>	Muito Alta (V4)	

I-14	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	Muito Alta (V4)	
I-15	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	Muito Alta (V4)	
I-16	<p>Tronco de árvore inclinado</p> <p>Alto (P3)</p>	Muito Alta (V4)	

I-17	<p>Embarrramento e trincas em muro de contenção</p> <p>Alto (P3)</p>	Alta (V4)	
I-18	<p>Cicatriz de deslizamento translacional raso</p> <p>Muito Alto (P4)</p>	Muito Alta (V4)	

Fonte: A autora (2019).

4.3.3 Carta de susceptibilidade à escorregamentos

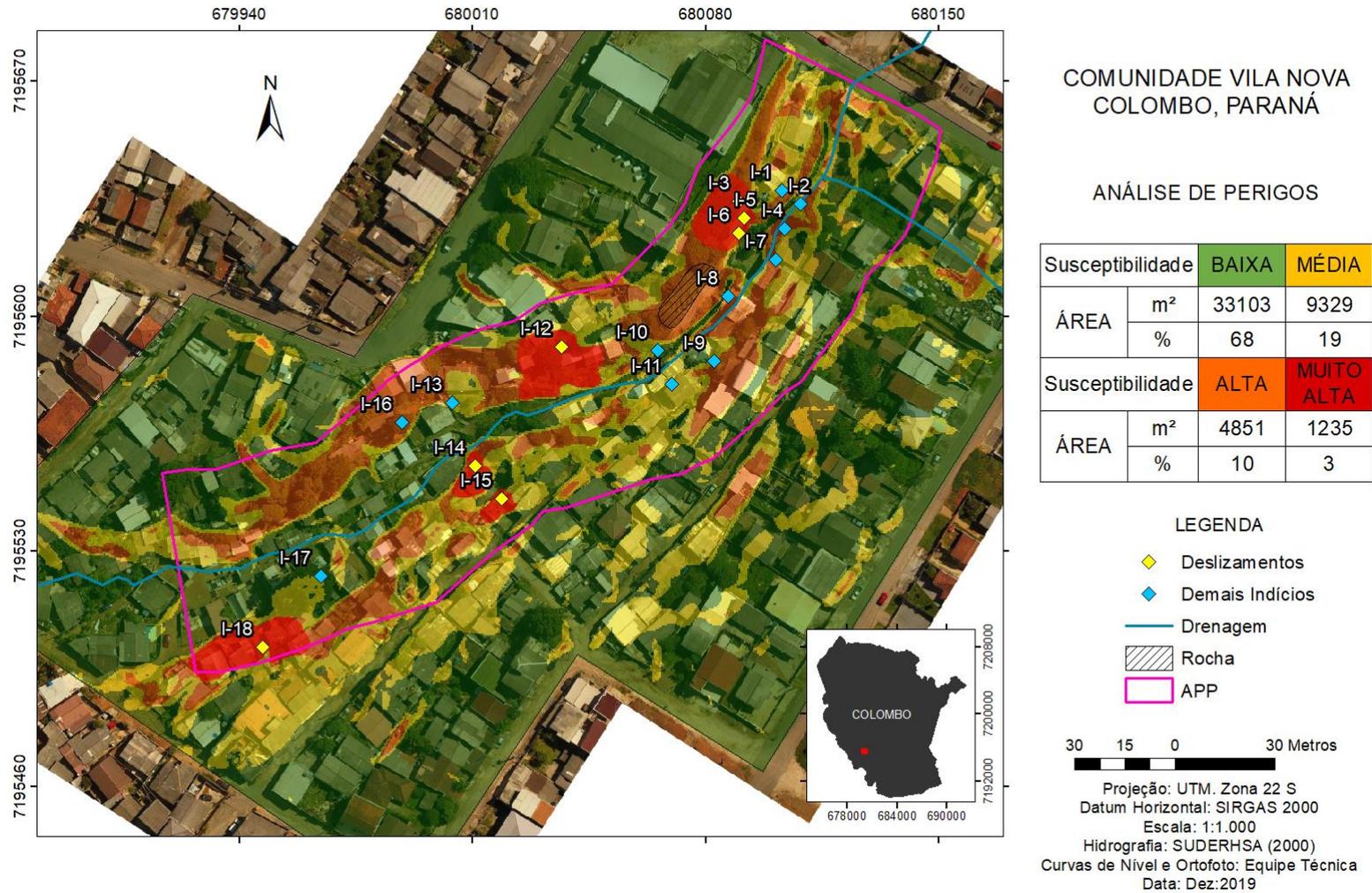
A carta de susceptibilidade à escorregamentos foi elaborada segundo os critérios topográficos, inclinação maiores que 17° e maiores que 25° como inclinações críticas à deflagração de escorregamentos, e de indícios de movimentações identificados em campo, isto é, baseado na análise de perigo do terreno. A Figura 35 apresenta a carta de susceptibilidade a deslizamentos translacionais rasos do trecho estudado de Vila Nova, obtida conforme a metodologia qualitativa empregada, com a distribuição espacial dos indícios identificados em campo e das regiões com diferentes graus de perigo/susceptibilidade.

Obteve-se que 3% da área da comunidade de Vila Nova, o correspondente à 1.235 m², encontra-se em um nível de susceptibilidade muito alta à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos e 10% da área em uma área de alta susceptibilidade. Em porcentagens maiores, 19%, encontra-se em uma área de média susceptibilidade e 68% em um terreno de baixa susceptibilidade ao processo geológico analisado.

Ressalta-se a ocorrência de um afloramento rochoso na encosta W, o qual não foi analisado estruturalmente para verificação da sua susceptibilidade à ocorrência de algum tipo de movimento gravitacional de massa. A área estimada de abrangência do afloramento, apesar de representado no mapa como uma área classificada, não foi tabulada no cálculo da qualificação dos graus de susceptibilidade dos terrenos.

Figura 35 - Carta de susceptibilidade a deslizamentos de terra – análise qualitativa

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA



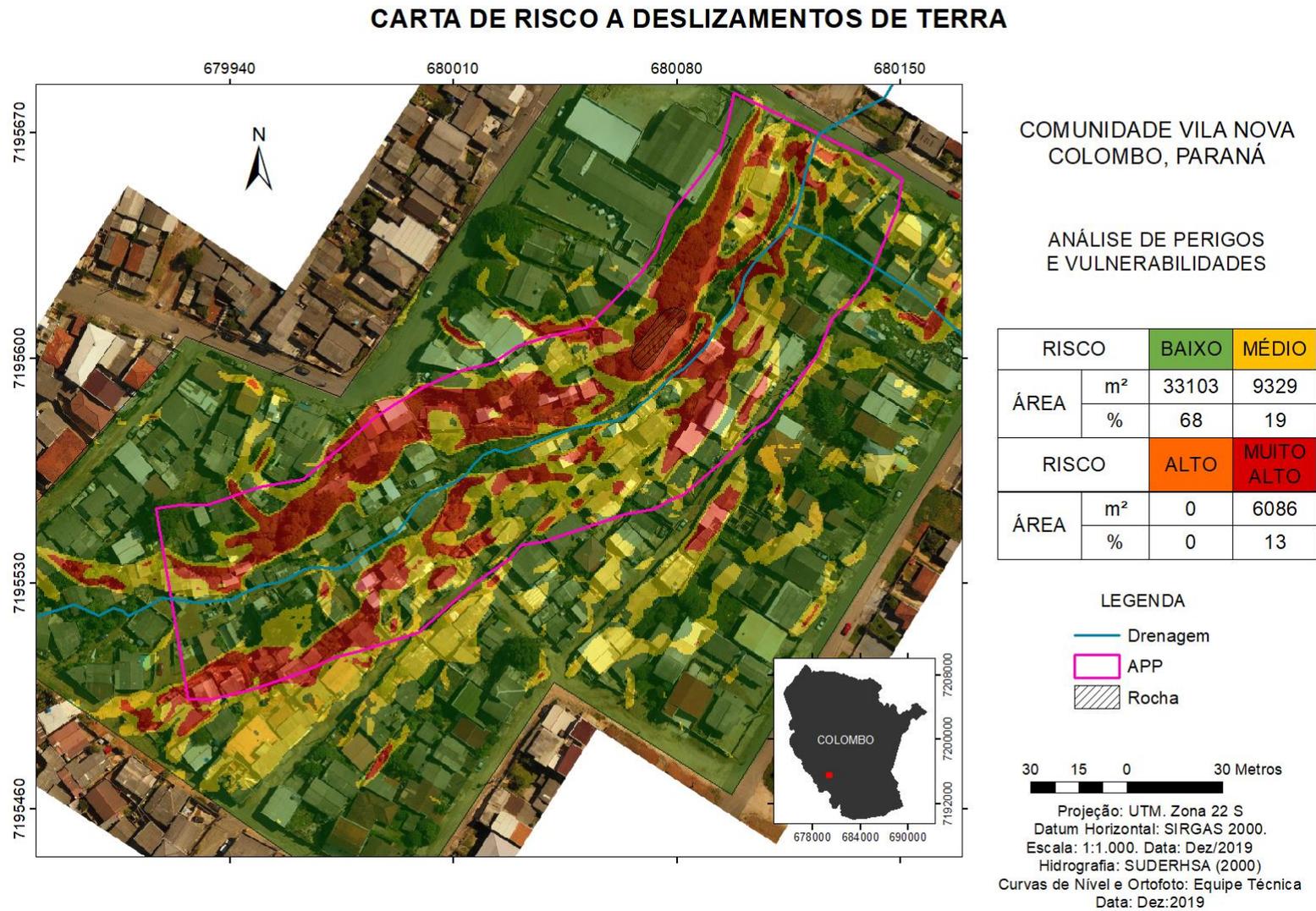
Fonte: A autora (2019).

4.3.4 Carta de risco à escorregamentos

A carta de risco, também elaborada conforme disposto no Capítulo 3, baseou-se na análise dos perigos e do grau de vulnerabilidade verificados em pontos discretos em campo. Conforme o critério de interação entre as duas variáveis – perigo e vulnerabilidade –, para cenários em que o perigo apresentasse intensidade alta e vulnerabilidade muito alta, o risco seria muito alto. E esse foi o caso da totalidade da área classificada anteriormente como de perigo/susceptibilidade alta (P3), pois a vulnerabilidade de todos os pontos levantados foi muito alta (V4), resultando em risco muito alto (R4). Assim, de modo geral, as áreas de perigo/susceptibilidade alta são áreas de risco muito alto, frente à vulnerabilidade muito alta identificada em pontos discretos e extrapolada para o restante da área. A Figura 36 apresenta a carta de risco a deslizamentos translacionais rasos do trecho estudado de Vila Nova, obtida conforme a metodologia qualitativa empregada.

Obteve-se que 13% da área da comunidade de Vila Nova encontra-se em risco muito alto quanto a intensas susceptibilidades a ocorrências e consequências provenientes de um evento de deslizamento de terra. Em porcentagens maiores, 19%, encontra-se em uma área de risco médio e 68% em um local de baixo risco de ocorrências e consequências a escorregamentos translacionais.

Figura 36 - Carta de risco a deslizamentos de terra – análise qualitativa



Fonte: A autora (2019).

4.4 SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS DE TERRA – ANÁLISE QUANTITATIVA

Conforme verificado em campo, as profundidades mais recorrentes dos escorregamentos levantados estão em torno de 1 metro, em uma superfície de ruptura predominantemente plana, com heterogeneidade de materiais envolvidos, por muitas vezes ocorrerem em solos de aterro, caracterizando-os como escorregamentos translacionais rasos. Definiu-se então, as possíveis profundidades de ruptura iguais à: 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m, tanto para cenários de solo de aterro, quanto para cenário de solo residual.

Os parâmetros geotécnicos adotados nos cenários de solo de aterro foram baseados na bibliografia e nos ensaios realizados durante esta pesquisa. Ahrendt (2005) realizou ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo residual e de aterro em ocupações urbanas precárias e geologicamente fragilizadas, semelhantes às do presente estudo, na cidade de Campos do Jordão e, além disso, os solos ensaiados eram originários de rocha gnaisse migmatítica, a mesma rocha mãe do embasamento rochoso de Vila Nova.

Portanto, para os solos de aterro, que não puderam ser ensaiados ao longo desta pesquisa, os interceptos coesivos simulados foram baseados nos resultados de ensaios de cisalhamento direto, realizados sob as tensões verticais de 15 kPa, 30 kPa e 50 kPa, em amostras saturadas e coletadas a aproximadamente 50 cm de profundidade, do trabalho de Ahrendt (2005), que encontrou valores entre 0,5 kPa e 1,0 kPa, tanto para os solos residuais quanto para os solos de aterro. Assim, adotou-se os valores de intercepto coesivo iguais a 1 kPa para a superfície de ruptura de 0,5 m, 1,5 kPa para superfície de ruptura de 1,0 m e de 2,0 kPa para a superfície de ruptura de 1,5 m, assumindo que em campo a coesão é crescente até a profundidade máxima simulada. Ressalta-se que a coesão não é, via de regra, crescente com a profundidade, e sim função do grau de intemperismo do solo ao longo do perfil estratigráfico, o qual pode ser crescente em algumas profundidades devido à presença de agentes intempéricos, como lençóis de água, conforme observado por Boszczowski (2008).

Para os valores de peso específico e ângulo de atrito, preferiu-se adotar valores baseados nos resultados de ensaio de cisalhamento direto realizado durante o presente estudo, admitindo-se que os solos de aterro da comunidade, conforme

pode-se observar em resquícios visualizados em campo e apresentados no Capítulo 4, muito provavelmente são provenientes de cortes e aterros dos solos naturais das vertentes – os solos residuais – para construção de platôs. Apesar das inestimáveis diferenças geotécnicas, sobretudo pelos solos de aterro perderem suas ligações cimentantes e sua estrutura mineralógica durante a remoção mecânica do seu local de origem e pelas inexistentes técnicas e controles adequados de compactação, adotou-se os valores de ângulo de atrito residuais do solo residual, uma vez que este parâmetro foi obtido quando o solo estava submetido a grandes deformações, e valores de peso específico natural ligeiramente menores que os encontrados para o solo residual, devido justamente à seu aspecto menos denso.

Definiu-se, então, os pesos específicos naturais iguais à 17 kN/m^3 e à $17,5 \text{ kN/m}^3$ para o solo de aterro e residual, respectivamente; o intercepto coesivo variando de $0,5 \text{ kPa}$ à $1,5 \text{ kPa}$ para o solo de aterro e de 12 kPa à 14 kPa para o residual, conforme o aumento da profundidade; o ângulo de atrito variando de 21° à 23° para o solo de aterro e de 23° à 25° para o residual. Na Tabela 8 apresenta-se o resumo dos parâmetros geotécnicos utilizados nas simulações.

Tabela 8 - Parâmetros geotécnicos utilizados nos cenários de suscetibilidade a deslizamento planar por meio do modelo do Talude Infinito

Solo	Cenário	Profundidade de ruptura (h)	Peso específico natural (γ)	Intercepto Coesivo (c')	Ângulo de Atrito (ϕ')	Fonte
		(m)	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	
Aterro	1	0,5	17,0	1,0	21	Ahrendt (2005) e ensaios solo residual
	2	1,0	17,0	1,5	22	Ahrendt (2005) e ensaios solo residual
	3	1,5	17,0	2,0	23	Ahrendt (2005) e ensaios solo residual
Residual	4	0,5	17,5	12,0	23	Ensaio de laboratório
	5	1,0	17,5	13,0	24	Ensaio de laboratório
	6	1,5	17,5	14,0	25	Ensaio de laboratório

Fonte: A autora (2019).

Não foi considerada a presença de nível d'água até 1,5 metro de profundidade, por este não ser sido encontrados em afloramentos nas encostas nas inspeções de campo e, principalmente, por não se conhecer as condições hidrogeológicas do substrato através de ensaios de campo. Apesar disso, considerou-se parâmetros de resistência ao solo quando este se encontra próximo à saturação, condição que pode ser concretizada em condições durante a ocorrência de eventos pluviométricos e/ou por despejo/vazamentos de tubulações de água e de esgoto. Nessas condições, o solo apresenta menores valores de intercepto coesivo e não apresenta sucção matricial, que contribui na sua resistência ao cisalhamento.

A base teórica do modelo matemático para definição dos fatores de segurança calculados toda a área estudada, foi definida no Capítulo 2. O fator de segurança, utilizando-se a formulação do Talude Infinito, foi determinado para cada *pixel* (célula), de 0,5 por 0,5 metros, da superfície *raster* do terreno de Vila Nova que contém os diferentes valores de declividades e os parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento e profundidade da superfície de ruptura, conforme apresentado na Tabela 8, no Capítulo 3. Ressalta-se que, para cada um dos seis cenários analisados, os valores de peso específico, intercepto coesivo, ângulo de atrito e profundidade da superfície de ruptura foram mantidos constantes, sendo a inclinação o único atributo espacialmente variável.

Assim, utilizando álgebra de mapas no *software* de geoprocessamento, sendo todas as variáveis da formulação do fator de segurança um arquivo do tipo *raster*, implementou-se os seis cenários. Ressalta-se que o afloramento rochoso identificado em campo está destacado nos mapas para enfatizar que, apesar da sua área estimada de ocorrência ter sido consideradas nos cálculos, essa foi descontada dos resultados finais.

4.4.1 Mapa de fatores de segurança para o solo de aterro

A determinação da susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos nos solos de aterro no trecho analisado de Vila Nova, assumindo a sua ocorrência geológica em toda a extensão do trecho estudado da comunidade, baseou-se no mapa de fatores de segurança determinado para este solo com os parâmetros de resistência e superfícies de ruptura estipulados e apresentados na Tabela 8.

O primeiro cenário, referente à superfície de ruptura igual a 0,5 m, coesão igual à 1 kPa e ângulo de atrito igual à 21°, resultou em uma conjuntura em que 8% da área encontra-se em um cenário de muito alta suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos ($FS \leq 1$), 17% em um cenário de alta susceptibilidade, 17% em um contexto de média susceptibilidade e 58% em uma área de baixa susceptibilidade à ocorrência dos movimentos (Figura 37).

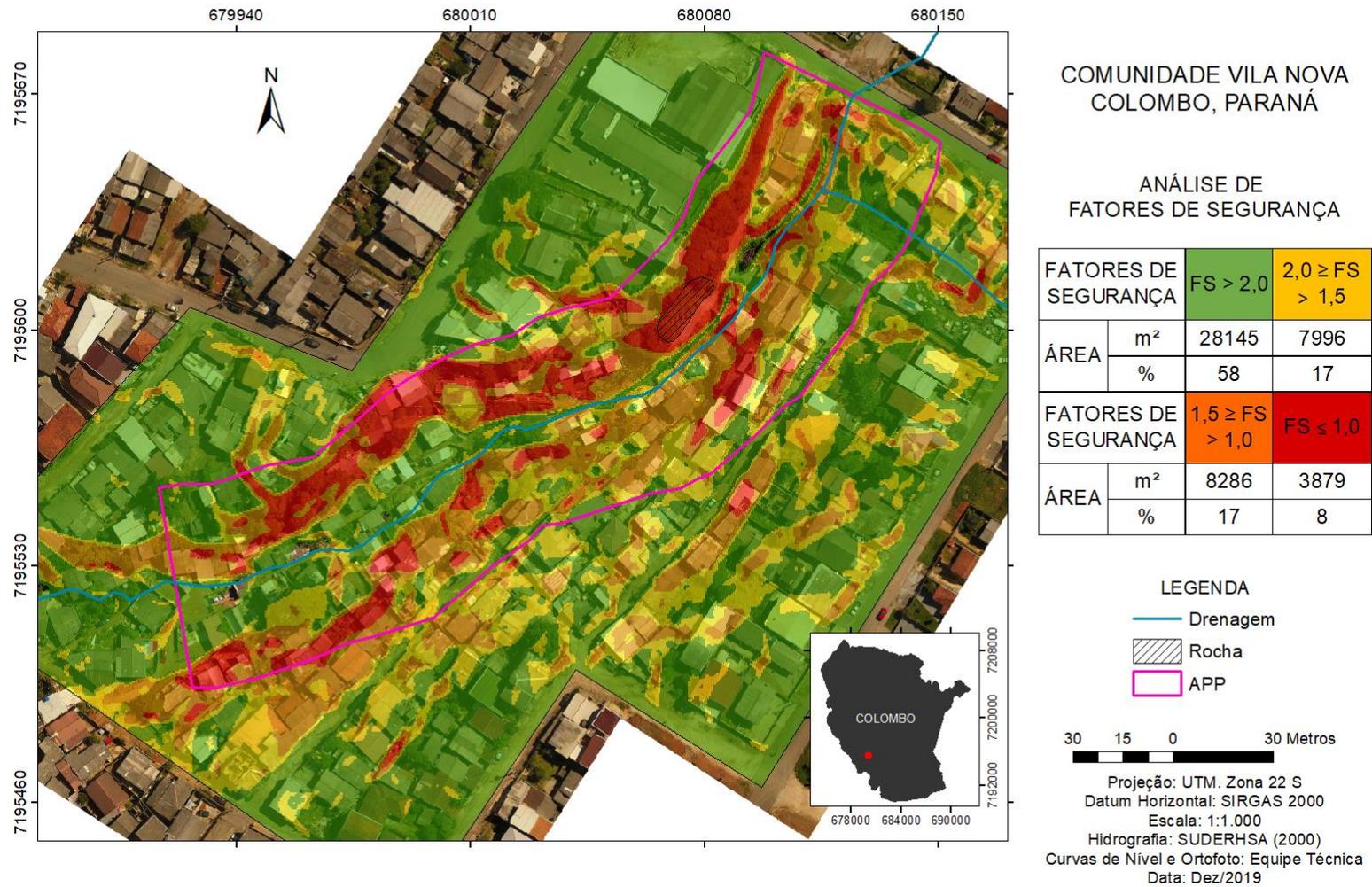
O segundo cenário, referente à superfície de ruptura igual a 1,0 m, coesão igual à 1,5 kPa e ângulo de atrito igual à 22°, resultou em uma conjuntura em que 9% da área encontra-se em um cenário de muito alta suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos ($FS \leq 1$), 17% em um cenário de alta susceptibilidade, 16% em um contexto de média susceptibilidade e 56% em uma área de baixa susceptibilidade à ocorrência dos movimentos (Figura 38).

No terceiro cenário, referente à superfície de ruptura igual a 1,5 m, coesão igual à 2 kPa e ângulo de atrito igual à 23°, resultou em uma conjuntura em que 9% da área encontra-se em um cenário de muito alta suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos ($FS \leq 1$), 17% em um cenário de alta susceptibilidade, 16% em um contexto de média susceptibilidade e 58% em uma área de baixa susceptibilidade à ocorrência dos movimentos (Figura 39).

Figura 37 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 1 referente ao solo de aterro

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

CENÁRIO 1 - SOLO DE ATERRO - $h = 0,5 \text{ m}$ - $c' = 1,0 \text{ kPa}$ - $\phi' = 21^\circ$

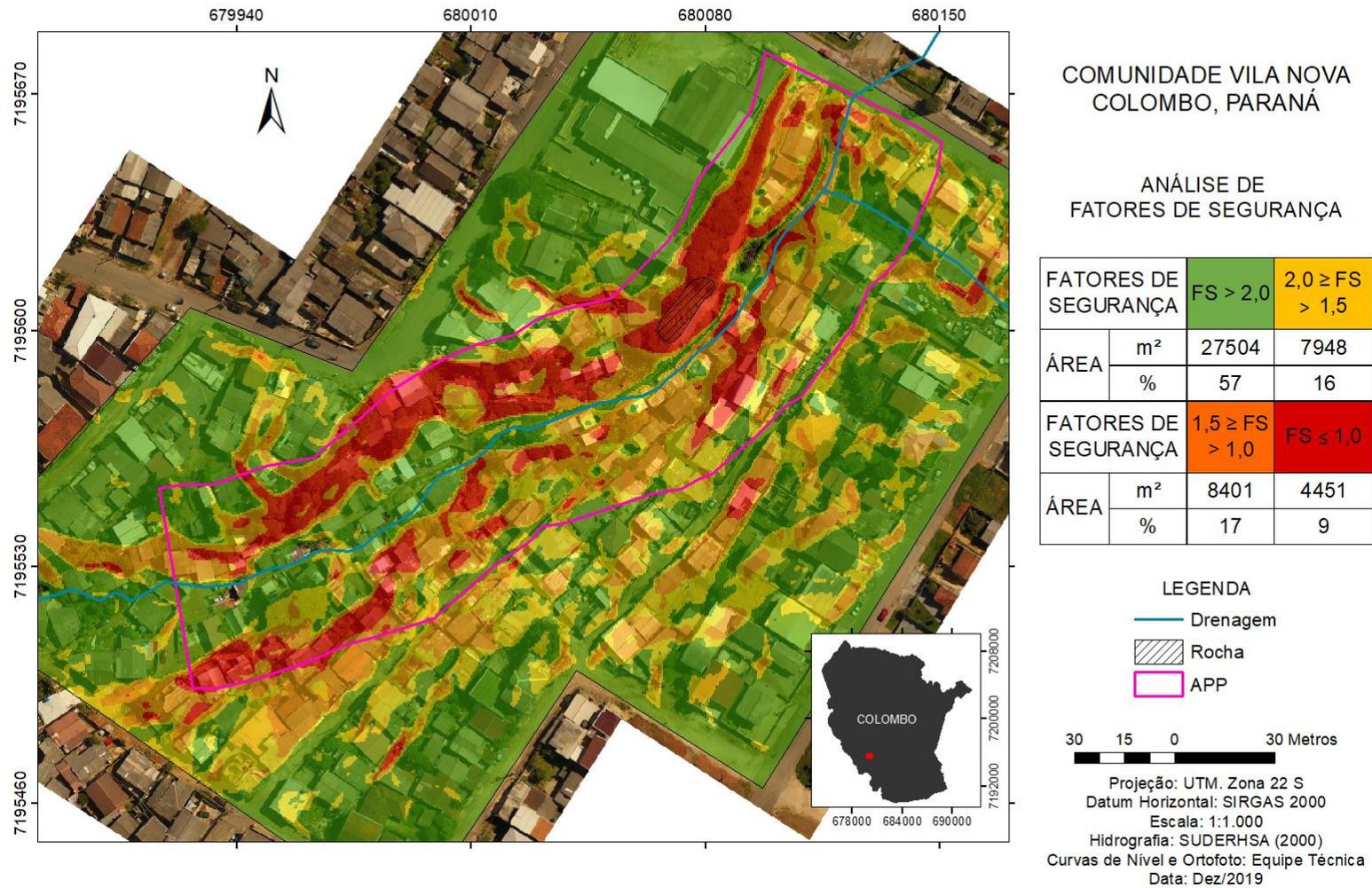


Fonte: A autora (2019).

Figura 38 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 2 referente ao solo de aterro

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

CENÁRIO 2 - SOLO DE ATERRO - $h = 1,0 \text{ m}$ - $c' = 1,5 \text{ kPa}$ - $\phi' = 22^\circ$

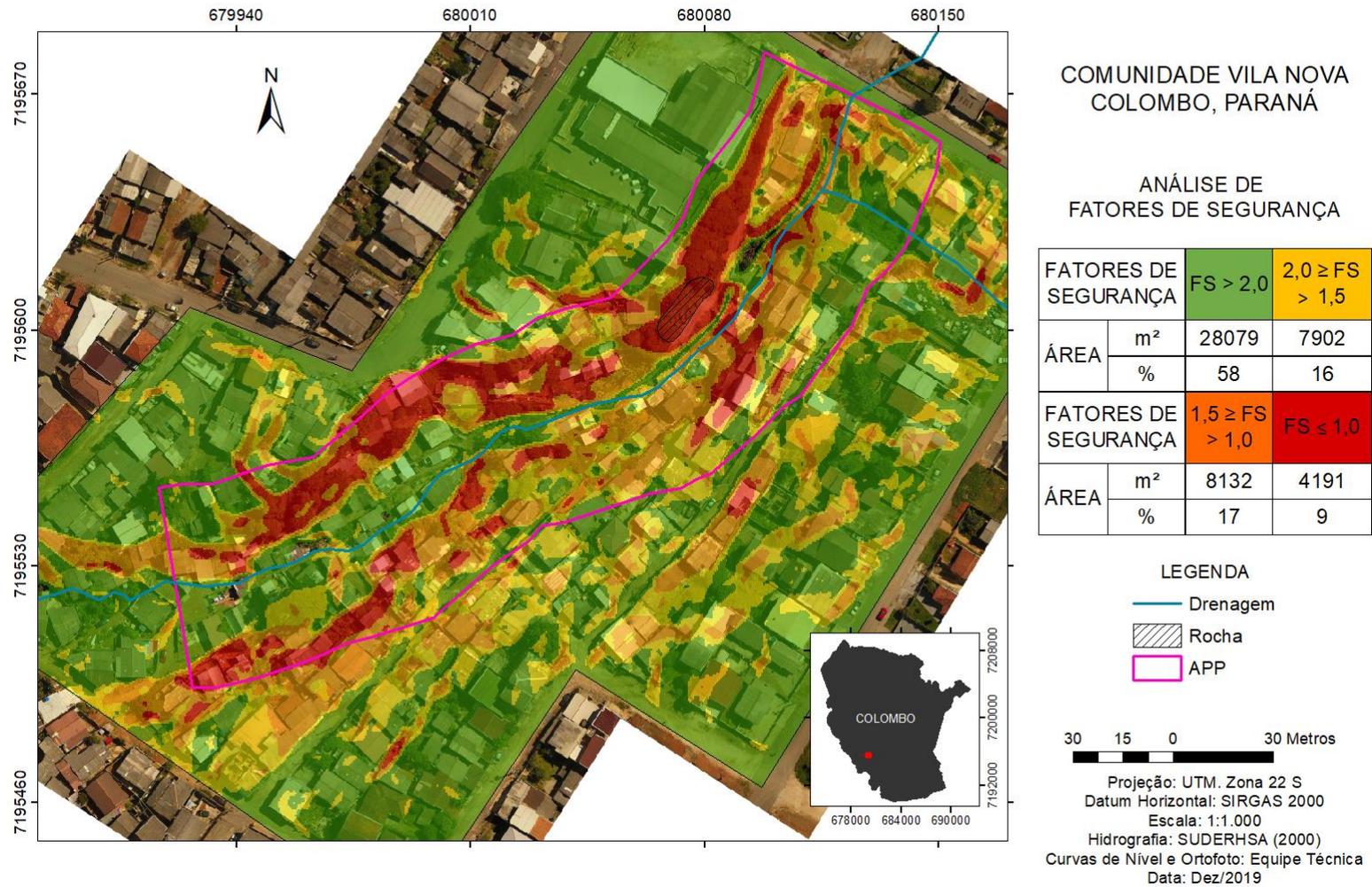


Fonte: A autora (2019).

Figura 39 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 3 referente ao solo de aterro

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

CENÁRIO 3 - SOLO DE ATERRO - $h = 1,5 \text{ m}$ - $c' = 2,0 \text{ kPa}$ - $\phi' = 23^\circ$



Fonte: A autora (2019).

4.4.2 Mapa de fatores de segurança para o solo residual

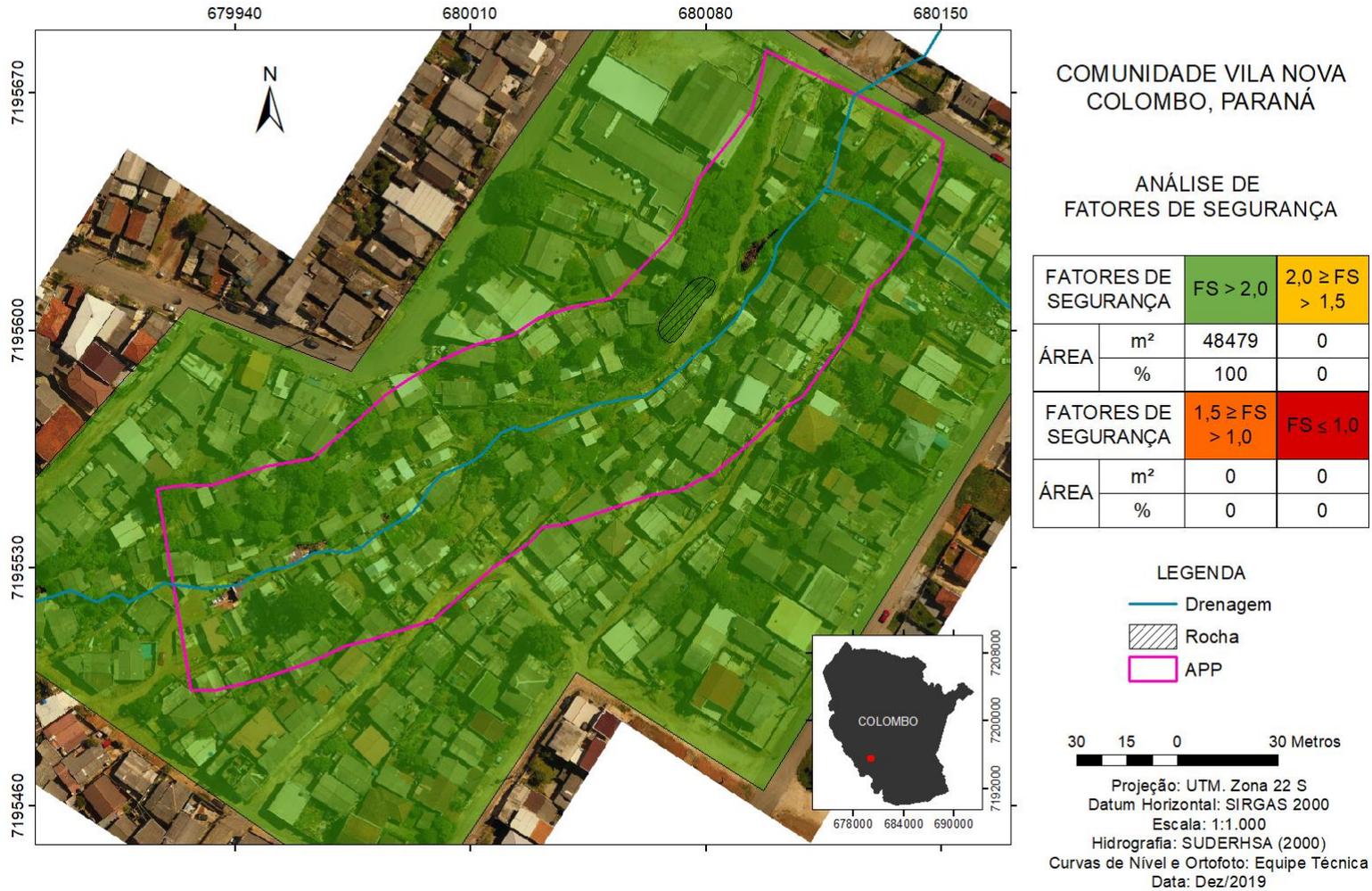
Quanto à análise de susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos dos terrenos de Vila Nova possivelmente compostos por solos residuais, baseado da análise de fatores de segurança pelo método do Talude Infinito, verificou-se que, adotando os parâmetros de coesão entre 12 kPa e 14 kPa e de ângulo de atrito entre 23° e 25°, nenhuma área, para nenhuma das profundidades de 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m, apresentou indício de instabilidade, considerando esses como fatores de segurança iguais ou menores do que 1,0.

Observa-se que, para a profundidade de 0,5 m (coesão igual à 1 kPa e ângulo de atrito igual à 21°), a totalidade da região enquadrou-se em uma área de baixa suscetibilidade a escorregamentos, com todos os fatores de segurança maiores do que 2. Para possível superfície de ruptura à 1,0 m (coesão igual à 1,5 kPa e ângulo de atrito igual à 22°), uma porcentagem equivalente a 0,46% da região apresentou fatores de segurança entre 1,5 e 2,0, característicos de um cenário de susceptibilidade média, e, o restante, com fatores de segurança maiores do que 2,0. À 1,5 m, o fator de segurança atingiu o seu valor mínimo para as análises do solo residual, sendo este valor igual à 1,46. Os mapas referentes às três análises estão apresentados nas Figura 40 à Figura 42.

Figura 40 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 4 referente ao solo residual

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

CENÁRIO 4 - SOLO RESIDUAL - $h = 0,5 \text{ m}$ - $c' = 12,0 \text{ kPa}$ - $\phi' = 23^\circ$

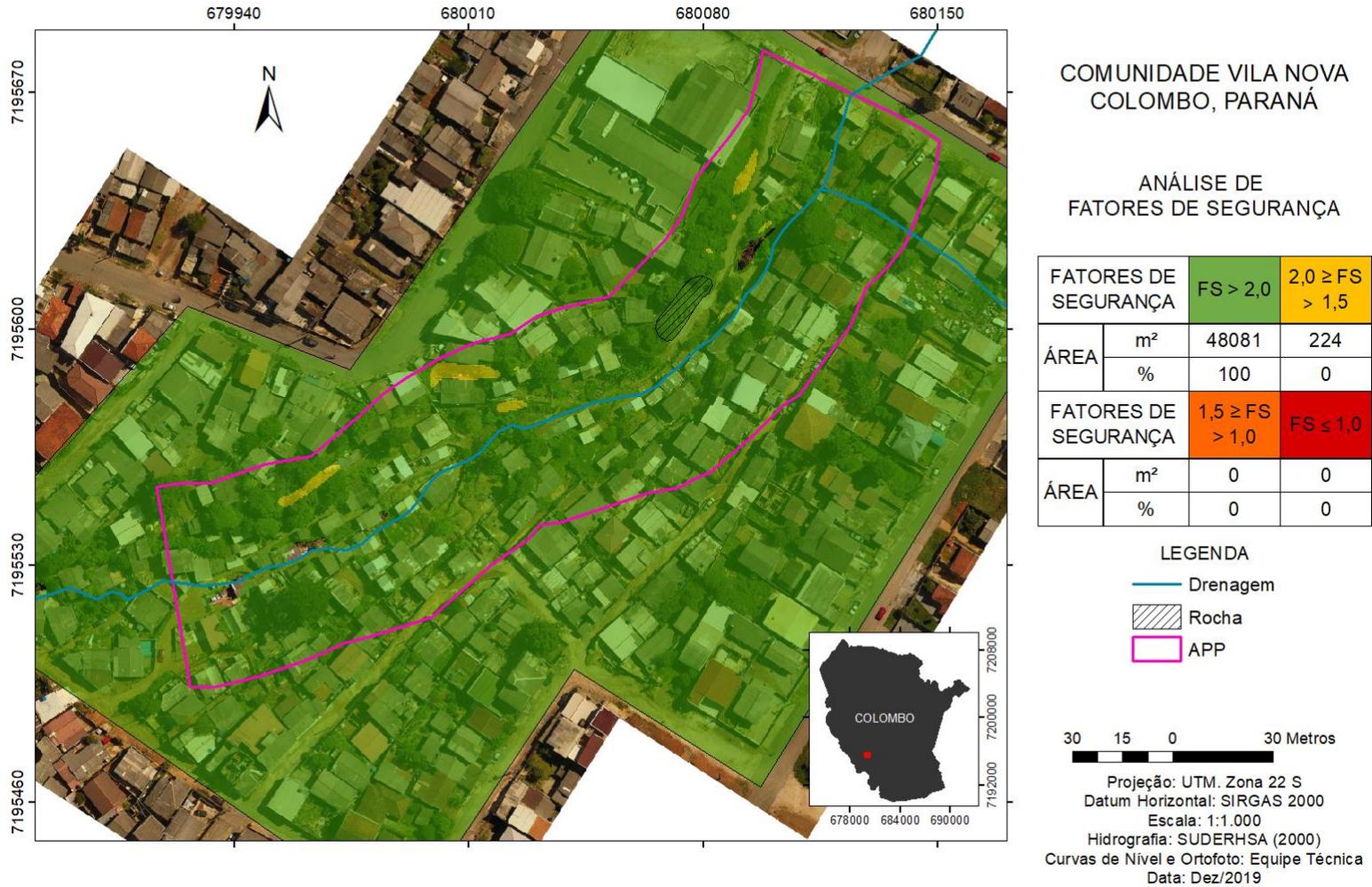


Fonte: A autora (2019).

Figura 41 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 5 referente ao solo residual

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

CENÁRIO 5 - SOLO RESIDUAL - $h = 1,0 \text{ m}$ - $c' = 13,0 \text{ kPa}$ - $\phi' = 24^\circ$

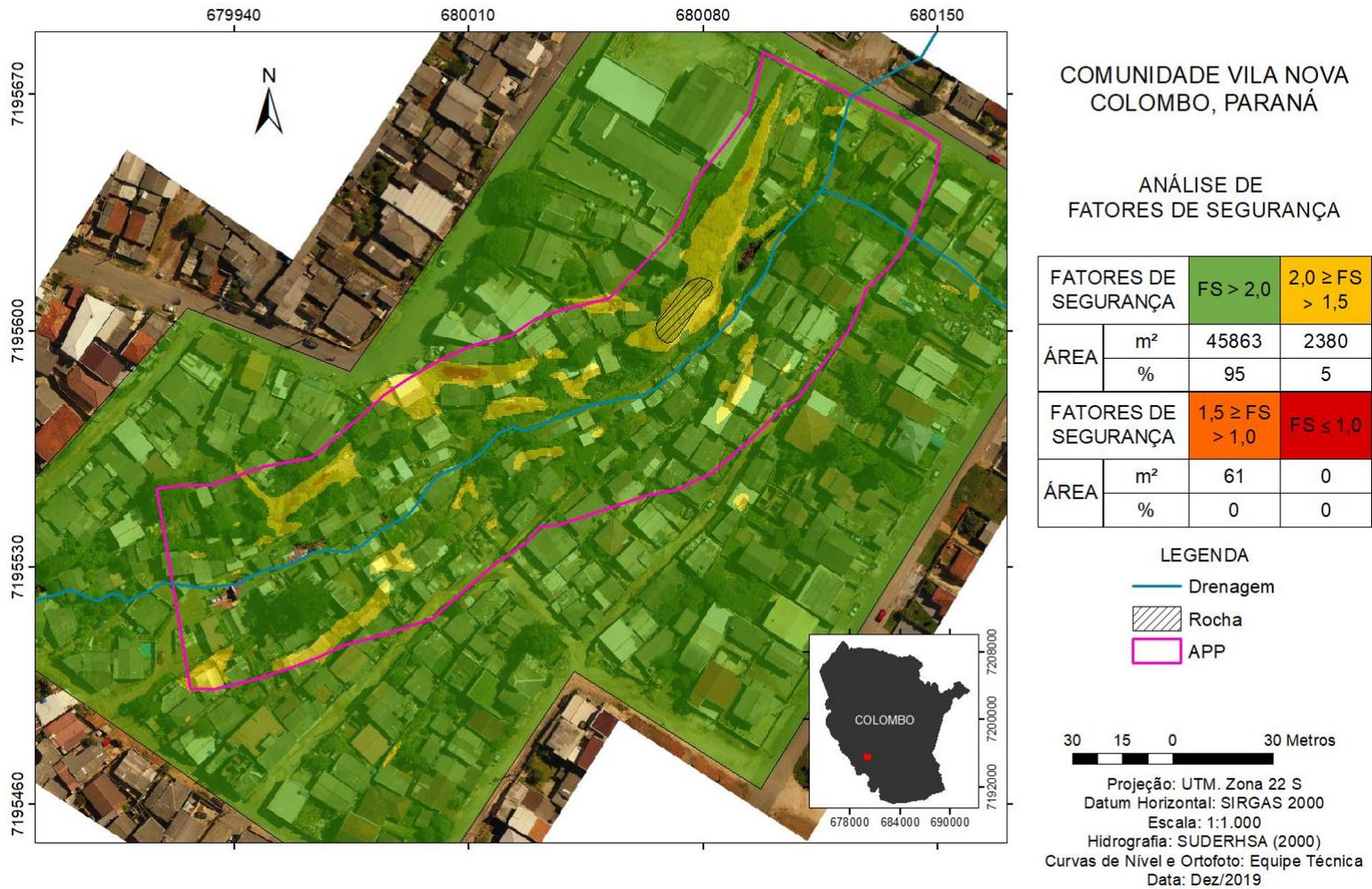


Fonte: A autora (2019).

Figura 42 - Mapa de fatores de segurança para o cenário 6 referente ao solo residual

CARTA DE SUSCEPTIBILIDADE A DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS

CENÁRIO 6 - SOLO RESIDUAL - $h = 1,5 \text{ m}$ - $c' = 14,0 \text{ kPa}$ - $\phi' = 25^\circ$



Fonte: A autora (2019).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Durante a etapa de caracterização do meio físico por meio de reconhecimento de campo, puderam ser observados dois tipos predominantes de materiais inconsolidados nas encostas de Vila Nova: solos residuais e solos de aterro, além dos materiais coluvionares provenientes de movimentos gravitacionais de massa. O solo residual, originado do substrato de rochas migmáticas, apresenta textura predominantemente siltosa, ocorrendo também siltes areno argilosos, a depender do grau de intemperismo e heterogeneidade, como da presença de faixas de materiais argilosos, coloração amarelada e espessura média aproximada de 2 a 3 metros nos afloramentos observados. O solo de aterro apresenta composição granulométrica predominantemente argilosa, mas com considerável presença de silte e areia, caracterizando-o com um solo argilo areno siltoso. Nos afloramentos observados, ocorre em cortes de aproximadamente 2 m de altura sendo estes aterros também compostos por resíduos domésticos e de construção. Apesar da presença de resíduos sólidos nos aterros, a sua matriz pedológica se apresentou mais homogênea que os solos residuais, por estarem mais intemperizados por agentes naturais. Devido à dificuldade de limitar a área de ocorrência dos materiais identificados em campo, não foi possível determiná-las em planta, apenas se indicando a localização pontual dos afloramentos analisados.

Durante a etapa de reconhecimento de feições de instabilidade, verificou-se uma intensa gama de indícios, como degraus de abatimento, subsidências, embarrigamentos de muros de contenção, troncos de árvores inclinadas, além da presença de ameaças à saturação das camadas superficiais de solo pela disposição ou vazamento de água e esgoto. Cicatrizes de deslizamentos recentes foram encontradas em sete pontos ao longo da área concentrados nos locais de maiores declividades, conforme verificado no mapa da Figura 34. Por meio das cicatrizes, foi possível verificar que os movimentos que mais acometem Vila Nova em termos de frequência, dado a amostragem realizada limitada temporalmente, são do tipo escorregamentos translacionais rasos. Essa constatação foi decisiva para a escolha do método de modelagem física-matemática de estabilidade de taludes que melhor representasse os movimentos que lá foram identificados. Observou-se, também, que os solos de aterro são os solos críticos à estabilidade na comunidade, uma vez que todas as cicatrizes de movimentos identificadas foram verificadas nestes materiais.

Quanto ao padrão de ocupação, verificou-se a realização de numerosos cortes com geometria e técnicas de contenção inadequadas ou insuficientes à garantia da segurança dos moradores. Os objetivos fins dessas interferências denotam a construção de platôs ao longo das vertentes para instalação das moradias e a abertura das vias pavimentadas que circundam a área, especialmente ao longo da Rua Rio Capivari, aonde é possível observar materiais de bota fora em taludes e fundações em locais adjacentes às vias asfaltadas (Figura 24 (A-6)). Durante as fases de campo, foi possível identificar em numerosos pontos resquícios de materiais do solo residual amarelo nos solos de aterro, indicando que os aterros são provenientes de alterações antrópicas do meio físico natural da comunidade. Tratam-se de aterros construídos com solos, entulhos e, por vezes, blocos de rocha visualmente mal compactados.

Conforme a metodologia qualitativa aplicada, cujos resultados estão apresentados nos mapas das Figura 35 e Figura 36, as áreas de maiores perigos se concentraram próximas aos registros de escorregamentos, sendo todos esses ocorridos em áreas cuja declividade é maior do que 25° e em solos de aterro. Apesar de espaçados ao longo da área, foi possível observar que os registros de movimentos e de possível instabilidade se concentraram na porção superior da comunidade e na Encosta W, sendo estes os locais de inclinações mais acentuadas e de maior concentração de residências de madeira construídas com precárias técnicas construtivas sobre solos mal compactados misturados a resíduos sólidos urbanos – os solos de aterro.

Quanto aos ensaios de resistência ao cisalhamento direto com reversão realizado em um solo residual pouco intemperizado, este apresentou, como sua maior resistência, um intercepto coesivo de 12,67 kPa e ângulo de atrito de $32,42^\circ$, e, como resistência residual, 12,67 kPa de intercepto coesivo e $23,00^\circ$. Apesar de realizados 10 cisalhamentos em um mesmo corpo de prova, utilizando a técnica de reversão a uma deformação de 8% por ciclo de cisalhamento, este não foi suficiente para diminuir a sua coesão devido à sua considerável fração argilosa verificada por um veio durante a coleta e pela análise granulométrica. Por outro lado, o ângulo de atrito sofreu brusca redução, fato atribuído à perda contínua da estrutura inicial do seu arranjo mineral no plano de cisalhamento.

Nas análises de estabilidade de taludes, utilizando o modelo do Talude Infinito, realizadas com os parâmetros de resistência de um solo de aterro próximo à

saturação, provenientes da literatura, com peso específico igual à 17 kN/m^3 , intercepto coesivo variando de 1 kPa a 2 kPa , ângulo de atrito variando entre 21° e 23° e profundidade da superfície de ruptura variando entre $0,5 \text{ m}$ e $1,5 \text{ m}$, foi possível verificar os piores cenários de estabilidade da comunidade. Assim como na análise dos solos residuais, os fatores de segurança para os três cenários de profundidade de superfície de ruptura se mostrou sensível, mas não de maneira significativa, à variação proposta para os parâmetros de resistência. Essa pequena variação dos resultados de fatores de segurança se deve ao fato de os próprios parâmetros inseridos não terem sido demasiado diferentes. Mesmo assim, a superfície à $1,5 \text{ m}$ de profundidade se mostrou a mais crítica, com valor de fator de segurança mínimo igual à $0,47$, indicando que a ação do peso próprio do solo foi preponderante em relação à variação proposta de parâmetros na estabilidade do solo ao longo da profundidade.

Nas análises determinísticas de estabilidade de taludes para simulação do comportamento do solo residual, utilizou-se os parâmetros de resistência residual do solo saturado ensaiado, devido ao não conhecimento de em qual estágio de resistência os solos residuais se encontram ao longo do seu perfil estratigráfico. Nos três cenários de profundidade e parâmetros geotécnicos propostos, (profundidades de ruptura iguais a do solo de aterro, interceptos coesivos variando entre 12 kPa e 14 kPa e ângulos de atrito variando entre 23° e 25°), nenhuma área apresentou fatores de segurança iguais ou menores do que 1 (Figura 40 à Figura 42). Este fato pode justificar a não frequência de ocorrência de escorregamentos translacionais rasos envolvendo solos residuais na região durante o ano de realização deste estudo, uma vez que esses apresentam considerável resistência mecânica mesmo quando submetido a grandes deformações. No entanto, ressalta-se que o solo ensaiado era de um afloramento residual e este possuía médio a baixo grau de intemperismo, sendo esses parâmetros, então, os maiores encontrados na área a pequenas profundidades.

Foi possível observar que o intercepto coesivo é o parâmetro de resistência ao cisalhamento dos solos que detêm a maior responsabilidade sobre a resistência deste, uma vez que foi o parâmetro com maior variação numérica entre os cenários propostos de solo de aterro (menores valores de coesão) e solo residual (maiores valores de coesão), enquanto os valores de ângulo de atrito permaneceram semelhantes entre si, o que pode justificar a expressiva diferença entre os valores de fatores de segurança observados entre os cenários dos dois solos. Associado à esta interpretação, ressalta-se a considerável influência da infiltração da água da chuva

e/ou do próprio córrego que permeia o vale na estabilidade de solos superficiais, seja pela diminuição da parcela de coesão aparente (sucção) nos vazios do solo ou da coesão efetiva entre as partículas sólidas pela presença da água. Acrescenta-se que não foi escopo deste trabalho analisar quando as condições de saturação do solo ocorreriam frente à ocorrência de chuvas típicas ou extremas que ocorrem na região ao longo das estações do ano. Ainda assim, importante salientar que a exposição dos solos de Vila Nova às cheias do córrego da Bacia do Córrego Manjolo, às águas pluviais e à realização de cortes e aterros que enfraquecem as ligações coesivas dos solos, diminuem sobremaneira a sua resistência podendo acarretar deslizamentos.

Destaca-se que o considerável percentual de áreas cujos fatores de segurança são menores do que 1,0 nas análises realizadas para o solo de aterro, pode ser atribuída às simplificações do método do Talude Infinito adotado que não considera, por exemplo, cenários de solos não saturados, solos esses que possuem a parcela de sucção (poropressão negativa) como contribuinte na sua resistência ao cisalhamento. Apesar disso, considerações sobre as sobrecargas devido às construções não foram realizadas. Ainda assim, os resultados indicam a considerável propensão do terreno a ocorrência de movimentos translacionais de massa.

Apesar da constatação de campo de que os solos de aterro são os mais fragilizados mecanicamente quanto à ocorrência de escorregamentos de terra, por serem originados de cortes e aterros dos solos naturalmente formados ao longo das encostas perdendo sua estrutura original, não foi possível coletar amostras indeformadas desse solo. As dificuldades encontradas na coleta devido à elevada presença de resíduos sólidos e pelo tempo disponível de execução do presente trabalho, impossibilitou a realização de ensaios de cisalhamento direto nestes solos.

Além das verificações de movimentos de massa, foi possível observar a intensidade de ocorrência de processos erosivos e enxurradas. Esses processos, naturais de ocorrerem em regiões de vale a depender das condições climáticas, são intensificados em Vila Nova pela remoção da vegetação de mata nativa, de Campos Gerais e de mata ciliar, culminando em uma irrisória cobertura vegetal que expõe horizontes superficiais de solo e induz à um intenso e generalizado processo erosivo destes. Associado ao processo erosivo, o assoreamento no leito d'água ao fundo do vale contribui para ocorrência de inundações. Ademais, observou-se um intenso despejo de resíduos sólidos doméstico ao longo das encostas e do leito do rio, a

existência de redes irregulares e danificadas de água e esgoto, que podem contribuir na fragilização dos terrenos quanto à deflagração de deslizamentos.

Quanto ao levantamento topográfico realizado com aerofotogrametria, foi possível inferir que, para trabalhos similares de mapeamento de risco geológico-geotécnico realizados em um curto período de tempo em uma área de difícil acesso e com recursos financeiros menos expressivos, mostra-se vantajosa em relação à topografia convencional. Se trata de um levantamento prático, rápido e de considerável acurácia, estando ciente de que se trata de uma técnica indireta de obtenção de coordenadas planialtimétricas. Esta limitação pode ser observada em cortes verticais de aproximadamente 2 m de altura atrás de algumas moradias que não foram identificados pelo VANT. O que se observa é que a inclinação das vertentes obtidas por este equipamento, no caso do levantamento realizado neste estudo, foram inclinações médias e, ainda assim, essas foram críticas à susceptibilidade a movimentos de massa. De modo geral, a técnica de aerofotogrametria atendeu às necessidades que este estudo de mapeamento geotécnico requeria na comunidade.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar um trecho da comunidade de Vila Nova, em Colombo/PR, quanto à sua susceptibilidade a escorregamentos de terra, a fim de identificar as regiões e moradias em maiores intensidades de risco a movimentos gravitacionais de massa. Buscou-se analisar o grau de perigo, de vulnerabilidade, de risco e de fatores de segurança da área com base em um método qualitativo de mapeamento de risco geológico-geotécnico e em um método determinístico de análise de estabilidade de encostas. De posse das informações coletadas em campo e em laboratório e posteriormente analisadas em escritório, com auxílio de ferramentas de geoprocessamento, este estudo culminou na elaboração de mapas de susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos e, assim, identificação das áreas mais vulneráveis a processos geológicos na comunidade.

Importante ressaltar que o reconhecimento das unidades pedológicas, dos indícios de movimentos de massa e das vulnerabilidades do ambiente, apesar de estruturados segundo uma padronização de ficha de campo, foi realizado em pontos discretos, não representando da maneira mais exata possível todos os perigos e vulnerabilidades que acometem a comunidade. Apesar disso, os pontos analisados estão apresentados nos mapas relacionados.

Com base na análise qualitativa da susceptibilidade a movimentos de massa dos terrenos da área estudada na comunidade de Vila Nova, baseada na avaliação de perigos/indícios de instabilidade presentes no terreno e na vulnerabilidade da população exposta a tais eventos perigos, 13% da sua extensão, isto é, 6.086 m², encontra-se em uma área de risco muito alto. O número de residências, ou parte delas, atingidas por essa classe de risco, é em torno de 59, o que corresponde à 20% das moradias no local.

Nas análises de estabilidade de taludes, utilizando o modelo do Talude Infinito junto ao geoprocessamento, foi possível verificar que, dentre as profundidades de ruptura analisadas (0,5 m, 1,0 m e 1,5 m) e os solos analisados (solo de aterro e solo residual) com os respectivos parâmetros de resistência apresentados no Capítulo 4, os piores cenários foram verificados à 1,5 m de profundidade no solo de aterro, com coesão igual à 0,5 kPa e 21° de ângulo de atrito. Neste cenário, 9% da área estudada de Vila Nova, isto é, 4.191 m², encontra-se em um cenário de susceptibilidade muito alta ($FS \leq 1$) à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos (Figura 39).

Constata-se que, pela metodologia aplicada, o cenário de susceptibilidade muito alta atinge cerca de 46 residências, o que equivale a, aproximadamente, 15% das moradias do local.

De posse das duas metodologias aplicadas, a com base qualitativa e a com base quantitativa, foi possível identificar a Encosta W e o norte da Encosta E como áreas de elevada susceptibilidade à estabilidade de taludes. Isso se deve, principalmente, ao fato de serem essencialmente baseadas em aspectos topográficos – as duas metodologias indicaram as áreas de maiores declividades como as mais críticas a escorregamentos – e a presença visualmente identificável de solos de aterro de baixa resistência mecânica.

Assim, pode-se inferir que, para o caso analisado, onde as condições de precariedade urbana e geotécnica estavam expostas à olho nu nas investigações geológicas-geotécnicas de campo e exigia-se agilidade na execução do estudo, a metodologia qualitativa, que demanda menores recursos financeiros e computacionais, é uma alternativa eficaz para mapeamento de risco geológico-geotécnico. Ainda assim, importante ressaltar a relevância das análises quantitativas de deslizamentos de terra para realização de uma estimativa mais acurada das condições de estabilidade de um talude, especialmente nas avaliações temporais e espaciais – podendo ser, nestes casos, ferramenta insubstituível.

Conclui-se que aproximadamente 10% do trecho de estudo em Vila Nova, em Colombo/PR, nas áreas destacadas em vermelho das cartas geotécnicas da Figura 36 à Figura 39, encontra-se com indicativos de extremo ou muito alto risco geotécnico de deslizamentos translacionais rasos, associados a solos de baixa resistência mecânica (solos de aterro) e profundidades de ruptura de 1,5 m. Essa área abrange aproximadamente 50 residências em terrenos de elevadas e danosas alterações antrópicas.

Ressalta-se que, apesar de não mensurado o volume de material movimentado, o solo de aterro – o mais crítico à estabilidade dos taludes – é solo de fundação de diversas residências na área, agravando a vulnerabilidade das construções sobre ele a processos como subsidências e aos próprios escorregamentos, podendo acarretar em danos e prejuízos materiais e sociais de grandes volumes e intensidades.

Importante observar que a área identificada nos mapas de perigo, de risco e de fatores de segurança como de alta susceptibilidade a deslizamentos translacionais

rasos encontra-se na área de abrangência da Área de Preservação Permanente (APP). Para além do contexto dos movimentos gravitacionais de massa, é relevante se enfatizar a importância de se atender o Código Florestal brasileiro (Lei nº 12.651/2012) e preservar o ecossistema natural nos 30 m que permeiam o corpo d'água perene no fundo do vale de Vila Nova. Uma vez respeitada a faixa de preservação da mata ciliar e, então, realocadas as moradias ali instaladas para locais geotécnicos e humanamente seguros, eliminar-se-ia a vulnerabilidade da atual população exposta a deslizamentos.

Tecnicamente identificadas as áreas de elevado risco geotécnico, mesmo se utilizando de métodos simplificados, e reconhecida a precariedade das condições urbanísticas do local, os próximos passos do presente trabalho pretende fornecer os mapas de susceptibilidade, com as devidas futuras melhorias, a órgãos de segurança contra desastres ambientais. Pretende-se contribuir para com o conhecimento de tais entidades sobre as fragilidades da comunidade a escorregamentos rasos e para a mobilização de soluções emergenciais de redução de riscos a desastres geotécnicos, sendo a mais humanamente justa, a realocação das moradias para assentamentos geologicamente seguros.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- i. Definição detalhada da estratigrafia de taludes identificados no presente trabalho como de área crítica, com auxílio de ensaios de campo como sondagens de simples reconhecimento e ensaios geofísicos, por exemplo, para conhecimento de das camadas pedológicas do subsolo e as suas condições hidrogeológicas, a fim de complementar análises de estabilidade utilizando-se métodos de Equilíbrio Limite mais completos;
- ii. Nessas mesmas regiões, a realização de mais ensaios de resistência ao cisalhamento e ensaios de permeabilidade e sucção nos solos de aterro e nos solos residuais para entendimento dos seus comportamentos hidromecânicos nas condições não saturadas e posteriores estudos referentes à identificação de cenários de precipitações capazes de diminuir significativamente sua sucção, podendo o levar a ruptura;
- iii. Realização de análises cinemáticas das famílias de fraturas identificadas no afloramento rochoso do talude W para verificação da existência de possíveis superfícies ou cunhas de ruptura no local frente à configuração de direção e inclinação do talude e das fraturas;
- iv. Realização de mobilizações técnicas, políticas e sociais para levar o estudo aqui realizado a instâncias responsáveis pelo gerenciamento de áreas de risco e de ordenamento do território urbano, a fim de se encontrar, em conjunto com órgãos públicos, a melhor solução ambiental e social para a comunidade frente aos desastres naturais que a acomete.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Estabilidade de encostas.** – NBR 11682:2009.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo – Análise Granulométrica.** – NBR 7181, 2016.
- ABRAMSON, L.W. et al. **Slope Stability and Stabilization Methods.** 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 736 p.
- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.** 2005. 390 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos da USP. São Carlos, 2005.
- ASTM. D 3080: **Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.** ASTM International, West Conshohocken, USA, 2011.
- ATLAS **Comentado da Geologia e dos Recursos Minerais do Estado do Paraná.** Curitiba: Mineropar, 2001. Escalas variam.125 p.
- ATLAS **Geomorfológico do Estado do Paraná.** Curitiba: Minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná, 2006. Escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. 63 p.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA PARA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. Anais. Rio de Janeiro, v. 2, p. 721-733, 1992.
- BITAR, Y. O. **Cartas de susceptibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000: nota técnica explicativa.** São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014.
- BOSZCZOWSKI, R. B. **Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR. 2008.** 577p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Instrução Normativa nº 2, de 20 de dezembro de 2016.** Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos municípios, estados e Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Anexo V – Codificação Brasileira de Desastres – COBRADE. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 de dez. 2016. Disponível em: <<http://www.defesacivil.sp.gov.br/decretos-leis-federais-e-recomendacoes/>>. Acesso em 16 de maio de 2019.

BRASIL. **Lei nº 875, de 16 de fevereiro de 2004.** Institui o Plano Diretor do município de Colombo, estado do Paraná, e dá outras providências. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-colombo-pr>>. Acesso em 20 de junho de 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012.** Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em 16 de abril de 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em 24 de julho de 2019.

BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 2012.** Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6766.htm>. Acesso em 16 abril de 2019.

BUDHU, Muni. **Soil Mechanics and Foundations.** 3. ed. United States Of America: John Wiley & Sons, 2010. 761 p.

CASSETI, V. **Ambiente a apropriação do relevo.** São Paulo: Contexto, 1991.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres.** 2ª ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 173 p, 1998.

CRAIG, R. F. **Soil Mechanics.** 8. ed. United States Of America: Crc Press, 2012. 584 p.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Solos – Determinação da Densidade Real** – Norma Rodoviária – Método de Ensaio. – DNER-ME 093, 1994.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil Strenght and Slope Stability.** 2ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 317 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 2006. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília, 412p.

FELL, R. et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engeneering Geology**, 102, 2008, p. 99-111.

FIORI, A. P.; SALAMUNI, E. In: TWIN CITIES. 2012, São Paulo. **Geologia de Curitiba e Arredores.** Curitiba, 2012. p. 45 - 63.

FONSECA, A. P. **Análise de mecanismos de escorregamento associados a voçorocamento em cabeceira de drenagem na Bacia do rio Bananal (SP/RJ)**. 2006. 373 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

HUNT, R. E. **Geotechnical engineering techniques and practices**. USA, Mc GrawHill, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil dos municípios brasileiros**. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro, 106 p, 2017.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 109 p, 2006.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1969. 553 p.

MARANDOLA, E.; HOGAN, D. J. **As dimensões da vulnerabilidade**. São Paulo em Perspectiva, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 33-43, jan./mar. 2006.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curva Básico de Geotecnia**. 2ª ed. Oficina de Textos, 2003, 216 p.

MINEROPAR. **Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná**: mapas geológicos para download, 2005. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=154> . Acesso em 20 de março de 2019.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco**. CEPED/UFSC, IPT, 2004. 122 p.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Manual técnico para redução de riscos de desastres aplicado ao planejamento urbano** – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais – Projeto GIDES. 2018. Disponível em: <https://www.jica.go.jp/brazil/portuguese/office/publications/c8h0vm000001w9k8-att/volume6.pdf>. Acesso em 6 de out. de 2019.

NAKAZAWA, V. A. et al. **Cartografia geotécnica: a aplicação como pressuposto**. In: 2º Simpósio de Geologia do Sudeste (SGS/SP-RJ). São Paulo, 8 p, 1991.

PIMENTEL, J.; SANTOS, T. D. **Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa** – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil, 2018. E-book. Disponível em:

<<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres-Naturais/Projeto-GIDES-JICA-5393.html>>. Acesso em 6 de out.de 2019. 123 p.

PRANDINI, F. L et al.. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: PRANDINI, Fernando Luiz. **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente**. São Paulo: ABGE, 1995. p. 187-202.

PREFEITURA DE COLOMBO. **Relatório final de saneamento**. Construtora e planejamento AMPLA. 2018. Disponível em <http://www.colombo.pr.gov.br/downloads/psbaapes/Relatorio_Final_Colombo.pdf>. Acesso em 05 de setembro de 2019.

ROBAINA, Luís Eduardo de Souza. Espaço urbano: relação com os acidentes e desastres naturais no Brasil. In: ROBAINA, Luís Eduardo de Souza. **Ciência e Natura**. Santa Maria: Ufsm, 2008. p. 93-105.

SALAMUNI, E. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR)**. 1998. 235 p. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.
SANTOS, Á. R. dos. Manual básico para a elaboração e para o uso da Carta Geotécnica. São Paulo: Editora Rudder, 2014. 109 p.

SANTOS, Á. R. dos. **Manual básico para a elaboração e para o uso da Carta Geotécnica**. São Paulo: Editora Rudder, 2014. 109 p.

SCOTT, R.F. **Principles of Soil Mechanics**. USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1963, 572 p.

SIGA JÚNIOR, O. et al. O Complexo Atuba: um cinturão paleoproterozóico intensamente retalhado no Neoproterozóico. **Bol.IG-USP, Sér. Cient.**, 26:69-98, 1995.

SKEMPTON, A. W.; HUTCHINSON, J. Stability of natural slopes and embankment foundations. In: **Soil Mechanics & Foundations Engineering Conference Proceedings**. México, 1969, p 291-340.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Slope stability: recognition, analysis and zonation. In: TURNER, A.K.; SCHUSTER, R.L.. **Landslides investigation and mitigation**. Washington: Transportation Research Board, National Research Council – Special Report, 247, 1996, cap 8, p 129-177.

SOUZA, L. A.; SOBREIRA, F. G. **Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais**, 2014. 68 p.

SUDERSHA. **Instituto das Águas do Paraná**: dados para download, 2000. Disponível em: < <http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-79.html>> acesso em 20 de março de 2019.

TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 2007. 240 p. Tese

(Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TROE, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, vol 263, summer 1965, p. 616-627, 1965.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012**. 2ª ed. Florianópolis: CEPED UFSC, 126 p, 2013.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: **Landslides: Analysis and Control**. Washington D. C., 1978. Ed. Schuster, R. L. & Krizek, R. J. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, 11-33.

ZORZAN, L. G. **Resistência ao cisalhamento do solo pelos ensaios de Cisalhamento Direto e DSS: análise experimental e aplicação na estabilidade de taludes**. 2018. 125 p. Trabalho Final de Curso – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ZUQUETTE, L. V. **Riscos, desastres e eventos naturais perigosos**. Elsevier, vol 1, 2018.

ZUQUETTE, L. V; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004, 190 p.

ANEXO 1 – FICHA DE CAMPO

FICHA DE CAMPO	MAPEAMENTO GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO, DE OCUPAÇÃO E INDÍCIOS MOVIMENTOS DE MASSA		VILA NOVA COLOMBO - PR	
Ponto:	Encosta:	Altitude:	Seção:	Data:
	Ponto referência:		Coordenadas UTM:	
1. Geomorfologia	Aclive ou Planície:	Curvatura:	Inclinação:	
	Talude natural:	Talude de corte:	Talude de aterro:	
2. Geologia	Litologia:		Grau de alteração:	
	Fratura/Foliação:		Direção:	
			Mergulho:	
	Blocos:		Raízes e/ou água:	
3. Pedologia	Talude em solo natural:		Talude em solo de aterro:	
	Cor:	Espessura:	Umidade:	
	Textura:	Presença de matéria orgânica e/ou lixo:		
4. Vegetação	Tipo:			
5. Indícios de movimentos gravitacionais de massa	Cicatriz de deslizamento:		Blocos de rocha:	
	Degrau de abatimento:		Trinca em paredes/muros contenção	
	Embarigamento de muro de contenção:		Árvores/postes inclinados:	
6. Padrão de ocupação	Material construção:			
	Posição na encosta:		Lançamento esgoto:	
	Distância leito córrego:		Distância topo ou base talude:	

7. Outros processos geodinâmicos		
8. Movimento de massa gravitacional pretérito/provável	Queda, tombamento, rolamento	Escorregamento circular
	Escorregamento planar:	Escorregamento irregular:
	Rastejo	Corrida
Perfil de Alteração/Croqui/Observações		