



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

NARA RODRIGUES BARRETO

**MODELO DE MECANISMO DE RUPTURA DA VERTENTE
PELAS DESCONTINUIDADES HIDRÁULICAS EM LATOSSOLO
NO SÍTIO URBANO DE SANTA TERESA/ES**

Vitória-ES

2016

NARA RODRIGUES BARRETO

**MODELO DE MECANISMO DE RUPTURA DA VERTENTE
PELAS DESCONTINUIDADES HIDRÁULICAS EM LATOSSOLO
NO SÍTIO URBANO DE SANTA TERESA/ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Goulart

Co-orientadora: Prof^ª Dr^ª Ana Christina Wigneron Gimenes

Vitória-ES

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

B273m Barreto, Nara Rodrigues, 1989-
Modelo de mecanismo de ruptura da vertente pelas
descontinuidades hidráulicas em latossolo no sítio urbano
de Santa Teresa/ES / Nara Rodrigues Barreto. – 2016.
127 f. : il.

Orientador: Antonio Celso de Oliveira Goulart.
Coorientador: Ana Christina Wignerón Gimenes.
Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais.

1. Geomorfologia. 2. Estabilidade. 3. Estrutura do solo. 4.
Taludes (Geografia física) - Estabilidade. 5. Latossolos. I.
Goulart, Antônio Celso de Oliveira. II. Gimenes, Ana Christina
Wignerón. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
de Ciências Humanas e Naturais. IV. Título.

CDU: 91

**“MODELO DE MECANISMO DE RUPTURA DA
VERTENTE PELAS DESCONTINUIDADES
HIDRÁULICAS EM LATOSSOLO NO SÍTIO
URBANO DE SANTA TERESA/ES.”**

NARA RODRIGUES BARRETO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovada em 01 de Agosto de 2016.



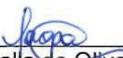
Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Goulart – ORIENTADOR– UFES



Profª. Drª. Ana Christina Wigneron Gimenes–UFES (CO-ORIENTADORA)



Prof. Dr. André Luiz Nascentes Coelho – PPGG/ UFES



Profª. Drª. Lorena Abdalla de Oliveira Prata Guimarães – INCAPER

AGRADECIMENTOS

Desenvolver uma dissertação para alguns parece uma tarefa simples. Basta definir um problema, objetivos, métodos e encontrar resultados. Definitivamente não é! Consiste sim em momentos de inevitável solidão, mas que, se alternam com manifestações de muito companheirismo e de amizade. Por isso, agradeço a todos de coração e sem distinção. Foram períodos inesquecíveis, árdua rotina de trabalho versus estudos, aprendizagem imensurável para a vida profissional e pessoal, muito desespero, mas também muitas alegrias.

Agradeço ao meu orientador Antonio Celso de Oliveira Goulart pela orientação, o apoio sempre prestado, confiança depositada no meu trabalho e por aguçar ainda mais a minha paixão pela Geomorfologia. À Ana Christina Wigneron Gimenes pela co-orientação, ajuda nos momentos desafiadores, por transformar o subjetivo em objetivo, pelas dicas e sugestões direcionadas ao levantamento de campo, laboratório, leitura e análise pedológica. Posso afirmar que meus orientadores fizeram o papel de pai e mãe acadêmicos, obrigada!

À amiga/mestranda/comadre Thatyane Mônico Nascimento por me apresentar os ensinamentos da yoga para levar a vida acadêmica com mais leveza, pelas terapias nos momentos críticos, pelo apoio durante esse caminhar, pela coleta de campo e principalmente, a amizade.

Aos professores Andre Luiz Nascentes Coelho, Dieter Carl Ernst Heino Muehe, Eberval Marchioro, Jacqueline Albino e Luis Carlos Tosta dos Reis pela contribuição acadêmica, críticas pertinentes e ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao professor Patrício Pires pela ajuda prestada na execução dos ensaios de mecânica dos solos e pela atenção dada à área de estudo.

À Maria Lúcia Leite Silvano pela atenção à área de estudo e o apoio no entendimento do radar geofísico.

À secretária do PPGG, Izadora Ramos, pela atenção, carinho e gentileza que sempre ofertou.

À turma do PPGG de 2014 pelas discussões, desesperos e risadas conjuntas.

Aos moradores do bairro de Vila Nova por permitir a realização do levantamento de campo ao redor de suas propriedades e apoio prestado na coleta dos materiais.

Ao Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa pela execução dos dados de física e química dos solos e ao Laboratório de Geografia Física da Universidade Federal do Espírito Santo no preparo de amostras, descrição e classificação do solo, análise dos dados e discussão dos resultados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES), pela concessão da bolsa de apoio técnico-científico.

Aos amigos de trabalho da Petrobras, em especial ao Fabrício de Paula Corrêa, José Carlos Batista e Márcio da Silva Mendes pelo incentivo, grandes experiências profissionais, aprendizagem e a amizade cultivada no cotidiano.

Às amigas geógrafas Larissa Belo, Marcela Moreira e Priscila Florenço pela amizade sincera e por tornarem os momentos de descontração acolhedores e agradáveis.

Ao meu marido e companheiro Rafael Sampaio Cardoso que além do amor, carinho e apoio, me ensinou a lutar e saber que eu posso tudo.

Aos meus pais Sebastião Barreto e Silvana Rodrigues Barreto pelo apoio e amor incondicional. Sem dúvida, meus verdadeiros alicerces!

“La novela se hace con trabajo, el cuento con inspiración” (Isabel Allende, 1994).

RESUMO

O diagnóstico da estabilidade da vertente visa identificar rupturas, a partir da investigação de fatores condicionantes, considerando a água e a condutividade hidráulica importantes agentes que potencializam as estruturas de ruptura das encostas. O objetivo desta pesquisa consiste em analisar os mecanismos de ruptura da vertente pelas descontinuidades hidráulicas em latossolo no bairro de Vila, Santa Teresa (Espírito Santo, Brasil), por meio da análise integrada da compartimentação topográfica, estrutura superficial e fisiologia da paisagem, ressaltando as características pedológicas, geomorfológicas e hidrodinâmicas. Bases de hipsometria, inclinação e densidade de drenagem foram geradas para um modelo de susceptibilidade a movimento de massa como abordagem prévia às possíveis descontinuidades hidráulicas no sítio urbano de Santa Teresa. A descrição morfológica foi realizada em solo à montante de uma vertente submetida a corte de estrada. Para caracterização e definição da classe do solo pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, uma amostra do horizonte Bw foi coletada e na terra fina seca ao ar (TFSA) determinados Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 pelo ataque sulfúrico, K e Na Extrator Mehlich-1, Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} Extrator KCl 1 mol/L, H + Al Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0. Amostras foram coletadas para análises físicas, nas profundidades de 0,20; 0,40; 1,00 e 1,80 m, correspondentes aos horizontes Ap, Bw1, Bw2 e C. Amostras da TFSA receberam pré-tratamentos com dispersão química com NaOH e dispersão física em agitação lenta, e a análise granulométrica foi realizado pelo método da pipeta. A densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico e macro, micro e porosidade total pelo método da mesa de tensão. A condutividade hidráulica saturada (Ksat) em carga constante foi realizada em amostra indeformada de anel volumétrico, obtida pela lei de Darcy. Para determinação da curva de retenção da água no solo foram realizados ensaios em mesa de tensão, utilizando pressões de 6 e 10 (amostras indeformadas em anel volumétrico), e ensaio em câmara de Richards, utilizando tensões de 30, 300 e 1500 kPa (amostras deformadas). O horizonte C do Latossolo abaixo de 240 cm foi analisado com a operação do GPR (Ground-penetrating radar), para identificação de rupturas. Os resultados de análise morfológica e química do solo apontaram para a definição da classe (SiBCS) dos Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos típicos, e com mineralogia predominantemente caulínica e oxídica. Os ensaios de condutividade hidráulica e a curva de retenção mostraram a existência de uma descontinuidade hidráulica a 180 cm de profundidade, entre os horizontes Bw2 e C, correspondendo a um comportamento hídrico que leva ao desenvolvimento da poro-pressão positiva, perda de sucção do solo, aqui atribuído aos seguintes fatores condicionantes: a passagem de uma estrutura de agregados pedológicos de blocos subangulares fracos e microagregados (granular pequena) no horizonte Bw1 e de agregados pedológicos predominantemente microagregados no horizonte Bw2, devido à mineralogia caulínica e oxídica da fração argila, para um grau de estrutura maciço coerente no horizonte C; e a redução no teor de argila e aumento no teor de silte no horizonte C. As imagens oriundas das sondagens com georadar mostraram a existência de planos de ruptura decorrentes de deformações no material no horizonte C. A descontinuidade hídrica verificada no Latossolo demonstra a diminuição e a mudança de direção do fluxo hídrico em subsuperfície, passando de vertical para horizontal nesse limite, o que pode levar à formação de um plano de ruptura subsuperficial e estabelecimento de instabilidade na vertente.

Palavras-chave: geomorfologia de vertente; estabilidade de vertente; morfologia do solo; condutividade hidráulica no solo; retenção da água no solo.

ABSTRACT

The diagnosis of the slope stability is to identify breaks, from research conditioning factors, considering water and hydraulic conductivity important agents that enhance the mechanisms break from the slopes. The objective of this research is the ratio of saturated hydraulic conductivity (Ksat) in Oxisols with the stability condition of the urban arm of the Vila Nova neighborhood, Santa Teresa (Espírito Santo, Brazil), through integrated analysis of topographic subdivision surface structure and landscape physiology, emphasizing the soil characteristics, geomorphological and hydrodynamic. Hypsometry bases, slope and drainage density were generated for a mass movement susceptibility model as a preliminary approach to possible discontinuities in the hydraulic urban area of Santa Teresa. The morphological description of the soil was held in soil upstream of a strand subjected to roadblock. For characterization and definition of soil class by the Brazilian System of Soil Classification, a sample of the Bw horizon was collected and thin dry land to air (TFSA) certain Fe_2O_3 , Al_2O_3 and SiO_2 by sulfuric attack, K and Na Mehlich-1 extractor, Ca^{2+} , Mg^{2+} + Al^{3+} extractor KCl 1 mol / L, H + Al extractor Calcium acetate 0.5 mol / L - pH 7.0. Samples were collected for physical, in the depths of 0,20; 0,40; 1,00 and 1,80 m, corresponding to Ap horizons, Bw1, Bw2 and C. Samples of the TFSA received pre-treatment with chemical dispersion with NaOH and physical dispersion in slow agitation, and Particle size analysis was conducted by the method of the pipette. The bulk density was obtained by the volumetric ring method and macro, micro and total porosity by voltage table method. Saturated hydraulic conductivity (Ksat) at constant load, was held in undisturbed sample volumetric ring, obtained by Darcy law. For determining the water retention curve in the soil tests were carried out in tension table, using pressures of 6 to 10 (soil samples of volumetric ring), and testing in Richards chamber, using voltages of 30, 300 and 1500 kPa (samples deformed). The horizon C Latossol below 240 cm was analyzed with the operation of the GPR (ground-penetrating radar), to identify breakages. The results of morphological and soil chemical analysis pointed to the class definition (SiBCS) of Red-Yellow Oxisols typical Dystrophic, and predominantly kaolinitic mineralogy and oxidic. The hydraulic conductivity tests and retention curves show the existence of a hydraulic discontinuity at 180 cm depth between Bw2 and C horizons, corresponding to a water behavior that leads to the development of the positive pore pressure and soil suction loss here attributed to the following conditioning factors: the passage of a pedological aggregate structure weak and microaggregates subangular blocks (small grain) on the horizon Bw1 and predominantly microaggregates pedologic aggregates in Bw2 horizon due to kaolinitic mineralogy and oxidic clay fraction to a degree of coherent massive structure on the horizon C; and reducing the clay content and increase in the silt content in the horizon C. The images derived from surveys with georadar onstrated the existence of breaking plans due to deformation of the material in the horizon C. The water discontinuity observed in Latossolo shows the decrease and the change of direction of fluid flow in the subsurface, from vertical to horizontal at this limit, which may lead to the formation of a subsuperficial break up and establishment of instability in the shed.

Keywords: strand of geomorphology; slope stability; soil morphology; hydraulic conductivity in the soil; water retention in the soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da vertente, objeto de estudo, situada no bairro de Vila Nova – sede municipal de Santa Teresa/ES.	22
Figura 2 – Diversos tipos de feições tridimensionais presentes numa vertente (RUHE, 1979). Legenda: 1 – forma convexo-convexo (poli convexa); 2 – formas convexo-linear; 3 – forma convexo-côncavo; 4 – linear-convexo; 5 – forma linear-linear; 6 – forma linear-côncavo; 7 – forma côncavo-convexo; 8 – forma côncava linear; 9 – forma côncavo-côncavo (poli côncava).	27
Figura 3 - As nove partes hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968).....	28
Figura 4 – Estimativa de permeabilidade e condutividade hidráulica de acordo com diferentes materiais (FREEZE e CHERRY, 1979).	39
Figura 5 – Variação vertical da condutividade hidráulica saturada, medida <i>in situ</i> com o permeâmetro de Gelpi, em um perfil de alteração próximo à borda da cicatriz de um deslizamento na bacia do rio Papagaio. Fonte: Fernandes et al. (2001).....	41
Figura 6 – Variação da K_{sat} em profundidade. A macroporosidade apresenta a mesma tendência da K_{sat} entre as profundidades de 60 e 90 cm. No entanto, entre os 90 e 120 cm, não há uma correlação positiva entre a K_{sat} e a macroporosidade. Fonte: Vieira e Fernandes (2004).	42
Figura 7 – Diagrama dos perfis formados a partir da sobreposição dos perfis do topo e do centro das cicatrizes, mostrando a variação do material, da K_{sat} em cinza e o possível plano de ruptura em vermelho, os símbolos C1, C2 e C3 indicam as cicatrizes Fonte: Gomes (2012).	43
Figura 8 – Vertente de análise. Bairro Vila Nova, Santa Teresa (ES), coordenada UTM - Datum Sirgas 2000 - 326883,29 E/ 7794121,36 N.	48
Figura 9 - Uso e Cobertura da Terra.....	53
Figura 10 – Características das zonas naturais do município de Santa Teresa. Fonte: http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/?pagina=carac , acesso em 17 fevereiro 2015.	54

Figura 11 – Localização da área de Coleta das Amostras de Solo e Imageamento de GPR	63
Figura 12 – As linha vermelhas indicam os pontos de deformção do pavimento ao longo do qual foi efetuada a varredura com o GPR. Do lado direito da imagem o corte do talude em estudo.	65
Figura 13 – Levantamento geofísico na estrada (estrada vicinal para o distrito de Aparecidinha).	66
Figura 14 – Processamento básico do “ <i>Easy Processing</i> ” no <i>software</i> RADAN 7.	67
Figura 15 – Processamento avançado do ” <i>Processing</i> ” no <i>software</i> RADAN 7.	67
Figura 16 – Perfil do Latossolo e local de coleta das amostras deformadas e indeformadas.	69
Figura 17 – Amostras deformadas coletadas em campo.	69
Figura 18 – Coleta de amostra indeformada em anel volumétrico.	73
Figura 19 - Permeâmetro de coluna vertical e carga constante. (Fonte: Ferreira, 2002). Sendo, V o volume de água coletado na proveta, 1 o anel volumétrico vazio, 2 o anel volumétrico com a amostra de solo e L altura do anel volumétrico 2 e l a coluna d’água de 3 cm sobre a amostra de solo indeformada correspondente ao anel volumétrico 2... 77	77
Figura 20 – Amplitude topográfica da sede de Santa Teresa e foco para o perfil da vertente do Bairro Vila Nova.....	81
Figura 21 – Amplitude topográfica do terço inferior da vertente de estudo.....	82
Figura 22 – Inclinação da sede de Santa Teresa.	82
Figura 23 – Densidade de Drenagem da sede de Santa Teresa.	83
Figura 24 - Susceptibilidade a Movimento de Massa, os pontos (a) e (b) correspondem as figuras 25 (a) e (b).	84
Figura 25 - Áreas susceptíveis a movimentos de massa – Bairro Vila Nova.....	86
Figura 26 – Recorte espacial da vertente de Vila Nova.	87
Figura 27 – Perfil longitudinal de georadar da vertente de estudo.....	89

Figura 28 - Imageamento de GPR dos perfis transversais. a) Transversal 'A' b) Transversal 'B' c) Transversal 'C' com infiltração e percolação hídrica em vermelho e evidência da raiz da jaqueira em verde.....	90
Figura 29 - Perfil esquemático da situação do corte no Transversal C no perfil de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, com linhas tracejadas mostrando a situação pretérita do perfil, o traço em preto contínuo identifica sua condição atual após o corte e em verde o perfil entre estrada e o corte.....	92
Figura 30 – Resultados de Granulometria obtida de acordo com os horizontes estudados.	101
Figura 31 - Curvas de retenção de água nos horizontes Ap, Bw1, Bw2 e C de um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso de Santa Teresa –ES, ajustadas com o auxílio do software SWRC 3.0.	110
Figura 32 - Valores de Condutividade Hidráulica Saturada e suas diferentes entre os horizontes.	112
Figura 33 – Imagem do perfil de solo espesso e homogêneo.....	113
Figura 34 – Avaliação do Plano de Ruptura da vertente com base na Descontinuidade Hidráulica.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de cada unidade (DALRYMPLE, BLONG E CONACHER, 1968).....	28
Tabela 2 – Fatores que contribuem para o aumento e redução da tensão cisalhante de uma vertente (SELBY, 1993).	31
Tabela 3 – Etapas de execução da pesquisa.	61
Tabela 4 - Feições morfológicas, amplitude topográfica, inclinação e seu percentual registrado na área de estudo.....	85
Tabela 5 - Descrição morfológica por horizonte e profundidade do Latossolo Vermelho-Amarelo.	95
Tabela 6 - Características químicas do horizonte Bw2 do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.....	97
Tabela 7 – Continuação das Características químicas do horizonte Bw2 do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, teor de argila e índice Ki.....	97
Tabela 8 - Análise Mineralógica: Porcentagem relacionada ao total de cada fração	98
Tabela 9 – Resultados da Análise Granulométrica, Argila Dispersa em Água, Relação Silte/Argila e Classes Texturais.....	100
Tabela 10 – Comparação dos resultados de argila dispersa em água segundo sua classificação de resistência dos agregados.	103
Tabela 11 – Valores de Porosidade Total, Microporosidade, Macroporosidade, Densidade de Partículas e Densidade do Solo.....	105
Tabela 12 – Valores de Ksat nos horizontes avaliados.	111

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação para determinar a Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat}).....	37
Equação 2 - Fórmula da Calculadora Raster com base na álgebra de mapas.....	63
Equação 3 – Equações para determinar as frações granulométricas das amostras de solo.	71
Equação 4 – Equação para determinar a Relação de Silte e Argila nos horizontes estudados.	72
Equação 5 – Equação para determinar a Densidade do Solo.	72
Equação 6 – Equação para determinar a Densidade de partículas.	73
Equação 7 – Equação para determinar a microporosidade do solo.	74
Equação 8 - Equação para determinar a Porosidade Total.	74
Equação 9 - Equação para determinar a Macroporosidade	75
Equação 10 – Determinação da retenção de água no solo.....	75
Equação 11 – Equação de van Genuchten (1980).	76
Equação 12 – Equação para representação gráfica dos diferentes pontos experimentais.	76
Equação 13 – Equação da condutividade hidráulica.	77
Equação 14 – Equação de fluxo e gradiente hidráulicos.	78
Equação 15 – Equação da área e diâmetro da coluna do solo.	78
Equação 16 – Equação da K_{sat} sobre ação da temperatura em 20°C.....	78

LISTA DE SIGLAS

ψ_m - Potencial matricial zero

ADA - Argila Dispersa em Água

AHP - Análise Hierárquica de Processos

Ap - Horizonte A antrópico

B - Extrator água quente

Bw - Horizonte B Latossólico

CC - Capacidade de Campo

CPRM - Serviço Geológico Brasileiro

D'água - Densidade da Água

Dp - Densidade de Partículas

Ds = Densidade do Solo

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ES - Espírito Santo

GPR - Ground Penetration Radar

H - Altura

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEMA - Instituto Estadual de Meio Ambiente

IJSN - Instituto Jones dos Santos Neves

IMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ISNa - Índice de Saturação por Sódio

K - Condutividade Hidráulica

K_{sat} - Condutividade Hidráulica Saturada

LVad2 - Latossolo Vermelho Amarelo Álico distrófico (Sistema de classificação do solo antigo do Sistema Brasileiro de Classificação do Solo - SiBCS)

m - Índice de Saturação por Alumínio

M - Massa

Ma - Macroporosidade

MDE - Modelo Digital de Elevação

Mi - Microporosidade

MR - Massa do Recipiente

p - Densidade do Solo

PMRR - Plano Municipal de Redução de Riscos

P-rem - Fósforo Remanescente

p_s - Densidade de Partículas

Pt - Porosidade Total

R - Recipiente (Anel Volumétrico)

RJ - Rio de Janeiro

SB - Soma de Bases Trocáveis

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SP - São Paulo

T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0

t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

TFSA - Terra Fina Seca ao Ar

TFSE - Terra Fina Seca em Estufa

U - umidade

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

UFV - Universidade Federal de Viçosa

USP - Universidade São Paulo

UTM - Universal Transversa de Mercator

V - Índice de Saturação por Bases

V_s - Volume das Partículas de Solo

V_b - Volume do Balão

V_g - Volume Total de Álcool

θ - Quantidade de Água Retida

θ_r - Umidade Residual

θ_s - Umidade do Solo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	20
2. A ESTABILIDADE DA VERTENTE E O SEU COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO	24
2.1 O conceito de vertente e a sua estabilidade condicionante.....	24
2.2 Condutividade hidráulica dos solos (K).....	36
2.3 Propriedades físicas e hidrológicas dos solos e a estabilidade da vertente.....	40
3 ÁREA DE ESTUDO: SEDE DO MUNICÍPIO DE SANTA TERESA (ES) E A VERTENTE DO BAIRRO DE VILA NOVA.....	47
3.1 Geologia.....	48
3.2 Geomorfologia e Solos	49
3.3 Uso e cobertura da terra	51
3.4 Regime pluviométrico e principais processos.....	53
4 METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.1 Níveis de abordagem em geomorfologia	55
4.2 Arranjo Metodológico e Obtenção de dados	60
4.2.1 Susceptibilidade a movimento de massa	62
4.2.2 Localização da vertente de estudo, dos perfis de GPR e coleta de amostras	63
4.2.3 Método de Ground Penetrating Radar (GPR) – Georadar.....	64
4.2.4 Coleta de Amostras, Morfologia e Análises do Solo.....	68
4.2.5 Análises Físicas do Solo	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1 Susceptibilidade a Movimento de Massa.....	81
5.2 Comportamento hidrológico de subsuperfície por GPR.....	88
5.3 Morfologia do Solo	94
5.3.1 Descrição Geral e Morfologia do Solo	94
5.3.2 Química dos Solos	95
5.3.3 Análise Mineralógica.....	97

5.4	Análise Física do Solo	99
5.4.1	Análise Granulométrica	99
5.4.2	Porosidade e Densidade do Solo	104
5.4.3	Retenção de Água no Solo.....	109
5.4.4	Condutividade Hidráulica Saturada.....	111
6	CONCLUSÃO	115
7	ANEXO	118
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

1. INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Este trabalho apresenta a análise da condutividade hidráulica dos solos (K_{sat}) em latossolo e a sua influência na estabilidade de uma vertente urbana do bairro de Vila Nova, na sede municipal de Santa Teresa – ES (**Figura 1**), em uma escala de detalhe, para a determinação dos parâmetros de instabilidade, tais como descontinuidades hidráulicas, profundidade de ruptura potencial e limiar de inclinação de estabilidade da vertente.

Nesse contexto, o diagnóstico de estabilidade da vertente compõe uma previsão a deflagração de movimentos de massa¹, a qual obtém como fundamental etapa de investigação os fatores condicionantes e os mecanismos de ruptura.

A precipitação pluviométrica em ambiente tropical é um dos principais fatores condicionantes do processo de equilíbrio limite de uma vertente. A água da chuva infiltra e percola nos solos, quando na medida em que a água se acumula, ocorre o aumento da pressão hidrostática, e conseqüentemente a diminuição da coesão do solo, resistência e diminuição do fator de segurança da vertente.

Para avaliar a condição de equilíbrio limite, a condutividade hidráulica dos solos é um parâmetro hidrológico cuja mensuração é importante no que tange a compreensão do comportamento hidrológico dos solos em relação à estabilidade de vertentes. Refere-se à dinâmica de transporte do fluido em meio poroso, tendo um comportamento que reflete as características físicas dos solos (FREEZE e CHERRY, 1979; BRADY, 1989).

Gomes (2013) considera que os solos são de natureza anisotrópica e heterogênea, possuindo continuidades espaciais em todas as direções. A K_{sat} é uma propriedade hidrológica sujeita a variações ao longo do perfil do solo, podendo gerar descontinuidades hidráulicas. A existência dessas descontinuidades atua nos modelos hipotéticos de mecanismos de ruptura, visto que o seu aumento ou diminuição ao longo do perfil determina o tipo de mecanismo investigado. A mensuração de K_{sat} em diferentes profundidades do solo, seja ela realizada *in situ* ou em laboratório, podem contribuir diretamente para a identificação do mecanismo de ruptura que predomina no manto de alteração.

¹ Os movimentos de massa de acordo com Selby (1993) são movimentos de solo ou rocha, encosta abaixo, sob a influência da gravidade, sem ação direta da água ou do gelo.

Esta temática têm se tornado cada vez mais recorrente na realidade dos municípios brasileiros. Visto que, a dinâmica hidrológica em subsuperfície é complexa e importante no estudo dos fluxos superficiais no desenvolvimento de processos de ruptura do solo (WHIPKEY e KIRKBY, 1978). Por isso, De Ploey e Cruz (1979) consideram que a hidrologia de encostas deve ser estudada em detalhe, devido a sua importância nos processos hídricos subterrâneos.

Contudo, levando em consideração o panorama sobre a dinâmica hidrológica dos solos na deflagração dos movimentos de massa, a K_{sat} permite fornecer informações para analisar a sua variação espacial existentes na vertente do bairro de Vila Nova, em que o seu emprego contribui significativamente para as pesquisas que tem por objetivo entender os mecanismos de instabilização de vertentes, haja vista a importância da investigação geomorfológica e a sua dinâmica atuante.

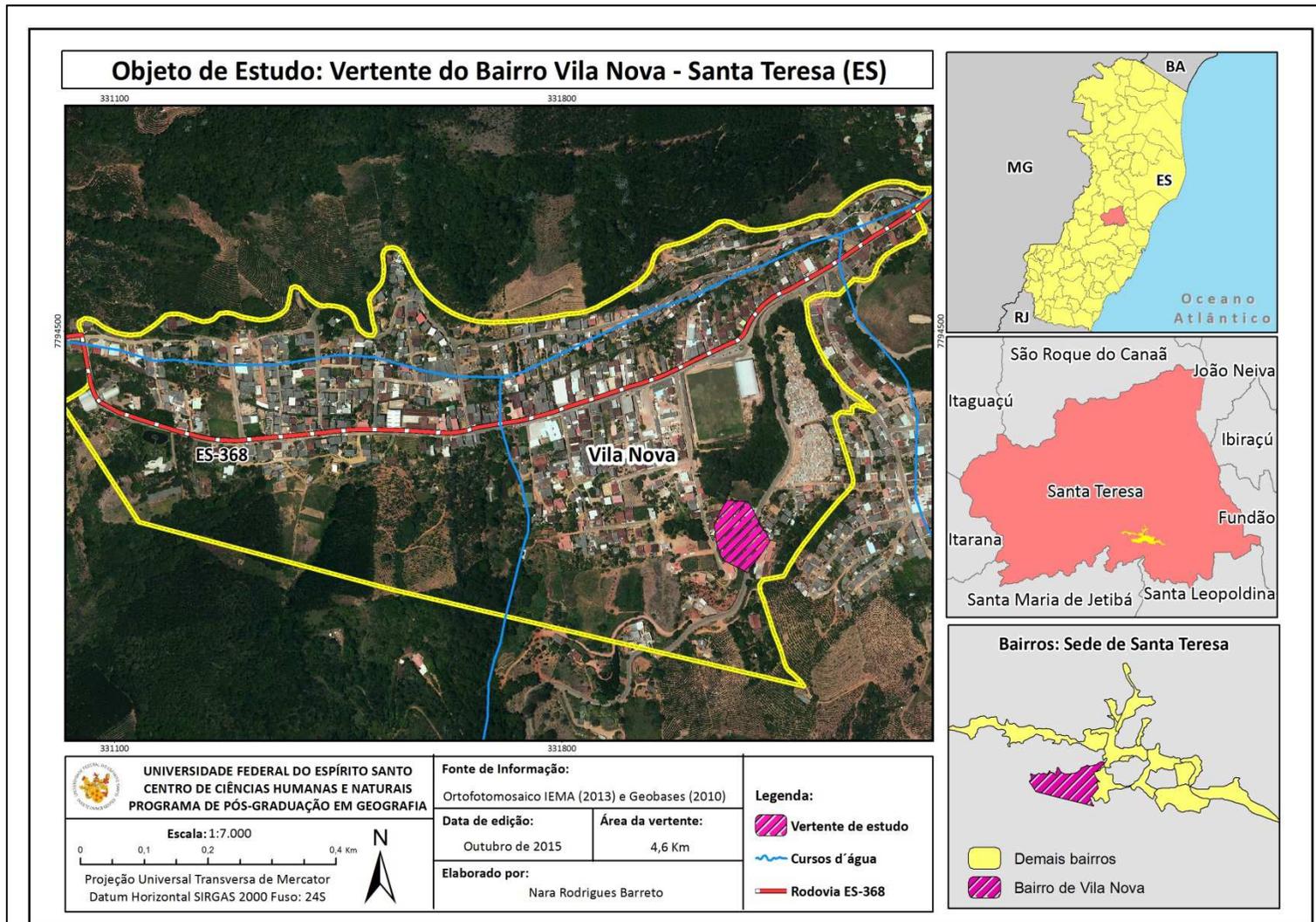


Figura 1 - Localização da vertente, objeto de estudo, situada no bairro de Vila Nova – sede municipal de Santa Teresa/ES.

Considerando o panorama sobre o papel da dinâmica hidrológica e física do solo na deflagração da instabilidade da vertente, bem como para a identificação de áreas susceptíveis no sítio urbano de Santa Teresa/ ES, a presente pesquisa tem como objetivo principal analisar os mecanismos de ruptura da vertente pelas discontinuidades hidráulicas em latossolo no bairro de Vila Nova. Para tanto, serão necessários os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar os três níveis de tratamento de uma pesquisa geomorfológica (AB'SÁBER, 1969), destacando a compartimentação topográfica, sua estrutura superficial e a fisiologia da paisagem;
- b) Discutir a susceptibilidade a ruptura no contexto de fragilidade do bairro de Vila Nova;
- c) Identificar os fatores associados às discontinuidades hidráulicas do material associado à estabilidade máxima da vertente com a aplicação do georadar (*GPR - Ground Penetration Radar*);
- d) Descrever o perfil pedológico e analisá-lo quanto à estrutura dos agregados, consistência seca, úmida e molhada, profundidade dos horizontes e transições;
- e) Determinar as propriedades físicas do solo em diferentes profundidades, das quais, granulometria e textura, porosidade (macro, micro e total), densidade do solo, curva de retenção da água no solo e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), utilizando a técnica do cilindro e permeâmetro de carga constante; e
- f) Contribuir com o conhecimento de estabilidade de um latossolo.

Os Latossolos são representados como solos naturalmente profundos, muito intemperizados e texturalmente homogêneos até o horizonte B latossólico (Bw), dessa forma espera-se uma entrada significativa das águas pluviais, configurando um receptor volumoso e posteriormente, de ultrapassada a capacidade de campo, esse fluxo apresenta uma drenagem subsuperficiais muito verticalizada, portanto, aspectos de promoção à estabilidade das vertentes. No entanto, este fator não tem ocorrido nas vertentes do sítio urbano de Santa Teresa, devido ao padrão de ocupação que prioriza cortes nas vertentes que atrapalham essa dinâmica natural. Com isso, a compreensão da dinâmica hidrológica e a influência na deflagração dos processos de instabilidade da vertente urbana irão buscar parâmetros que contribuem para o entendimento dessas premissas apresentadas.

2. A ESTABILIDADE DA VERTENTE E O SEU COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO

As vertentes ocupam grande parte das paisagens e elas têm sido o foco central na ciência geomorfológica, a qual estuda as formas do relevo, os processos que dão origem a essas formas e seus materiais constituintes, tendo um papel significativo na compreensão dos ambientes transformados pelo homem (GUERRA, 2011).

A intervenção humana sobre o relevo terrestre demanda a ocupação e transformação da superfície do terreno. Dependendo do tamanho dessa intervenção, das práticas conservacionistas utilizadas e dos impactos geomorfológicos envolvidos, as fragilidades ambientais associadas poderão causar grandes prejuízos no meio físico e aos seres humanos. Dessa forma, a ocupação crescente e desordenada nas vertentes viabiliza a susceptibilidade dos terrenos a movimentos de massa, sem a devida precaução ambiental, este fator se intensifica nos períodos chuvosos (FERNANDES *et al*, 2008).

Na evolução da paisagem em terrenos acidentados, os movimentos de massa são os processos predominantes associados às vertentes. Sua ocorrência está condicionada à razão entre as forças que promovem a resistência do material em relação ao seu deslocamento e as forças solicitantes (SELBY, 1993).

Os fatores que levam ao aumento da instabilidade nas vertentes podem atuar de forma isolada ou em conjunto, tornando a sua investigação uma etapa imprescindível para a compreensão dos mecanismos de ruptura. A condutividade hidráulica saturada dos solos é uma propriedade hidrológica que, além de expressar a dinâmica da água no solo, pode também refletir na influência de outros condicionantes associados.

Este capítulo tratará do conceito de vertente, suas formas e os seus principais condicionantes de estabilidade, a condutividade hidráulica saturada dos solos (K_{sat}) e, por fim, o papel das propriedades físicas e hidrológicas dos solos no processo de estabilidade da vertente.

2.1 O conceito de vertente e a sua estabilidade condicionante

O estudo das vertentes constitui, desde muito tempo, um mecanismo importante para a ciência geomorfológica. As vertentes são fatores constituintes da paisagem, em que fornecem água e sedimentos para os cursos d'água que drenam as bacias hidrográficas.

Sendo assim, diversos autores conceituam e definem os processos de transformação da vertente (BIGARELLA et al., 2007; CASSETI, 1991; CHRISTOFOLETTI, 1974; DYLIK, 1968; GUERRA, 1998; TRICART, 1957 e outros).

A vertente, segundo Bigarella et al. (2007), refere-se a uma estrutura inclinada (em graus ou porcentagem; ângulo da vertente), sem qualquer implicação genética ou de posicionamento. É a superfície propriamente dita e frequentemente é referida como vertente de morro ou vertente lateral de vale. Em sentido amplo, Christofolletti (1980) define a vertente como uma superfície alinhada, não horizontal, sem apresentar qualquer conotação genética ou locacional. Já para Dylík (1968), a vertente está associada a uma dinâmica dos processos fluviais caracterizada por processos denudacionais.

Segundo Casseti (1991), o relevo é um produto do antagonismo das forças endógenas e exógenas, sendo um importante componente do estrato geográfico, como suporte das propriedades sócio reprodutoras. Sendo a vertente o elemento dominante do relevo, é nela que se materializam as relações das forças produtivas, ou seja, onde ficam impregnadas as transformações que compõem uma paisagem. Para STRAHLER (*apud* FAIRBRIDGE, 1968) as vertentes são resultados de processos endógenos e exógenos, relacionados aos efeitos de denudação, pelos processos de intemperismo, movimentação de massa e escoamento de água, ajustados à geometria do sistema fluvial.

MCCULLAGH (1978 *apud* CASSETI, 1991) aborda que embora Gilbert (1877) tenha sido o primeiro a reconhecer os processos geomorfológicos na evolução e formação de uma vertente, os precursores no diagnóstico da evolução das vertentes foram W. M. Davis e W. Penck. Davis (1899) com a demonstração da evolução através do wearing down e Penck (1924) aborda o recuo paralelo das vertentes (wearing back) como resultado de denudação.

A vertente corresponde ao início dos processos morfodinâmicos atuantes, que Tricart (1957) define como “umbral de funcionamento”. Este também delimita como o término da ação dinâmica sobre a vertente de “processos areolares”, podendo ser substituídos por “umbral de parada”, quando os processos são anulados pela energia cinética do comportamento topográfico ou pelos processos fluviais e lineares.

De acordo com Mies e Moura (1984), as variações do nível de base de uma encosta e/ou variações paleo-hidrológicas são fatores responsáveis pela descontinuidade dos processos de encosta, espelhada nos sucessivos retrabalhamentos coluvionais. Com isto,

ressalta-se que a dinâmica evolutiva da vertente necessita de um nível de base para comandar os processos evolutivos, o qual anula os areolares como referência de seu desenvolvimento.

O conceito de vertente é dinâmico, uma vez que é definido pelas ações processuais geomórficas. CRUZ (1982) aborda o estudo da vertente na geomorfologia da seguinte forma:

“o estudo geomorfológico da evolução atual das vertentes é extremamente importante quanto ao entendimento espaço-temporal dos mecanismos morfodinâmicos atuais e passados. Os estudos morfodinâmicos atuais levam ao cerne do estudo geomorfológico por excelência, ajudando o entendimento das paisagens geográficas” (CRUZ, 1982, p. 3).

Dessa forma, a análise morfológica das vertentes permite conhecer a sucessão de eventos operantes no desenvolvimento da paisagem. Pelo estudo das suas formas topográficas diversificadas e os seus depósitos colúvio-aluvionares trás a possibilidade de deduzir quais as condições ambientais prevaletentes durante o processo de elaboração, e concluir quais foram os processos que atuaram no seu desenvolvimento (BIGARELLA, MOUSINHO & SILVA, 1965).

Os diferentes processos que agem nas vertentes dependem de uma série de fatores como: o clima regional, cobertura vegetal, litologia, estrutura geológica e tipo erosivo. Conseqüentemente, existe uma grande diversidade de formas, sendo difícil estabelecer um modelo generalizado de desenvolvimento e evolução.

As vertentes foram submetidas a numerosas variações climáticas e, conseqüentemente à mudança de processos atuantes em sua esculturação evidenciada por formas e depósitos característicos. Com isso, Bigarella (2007) aponta que o desenvolvimento do perfil da vertente talvez tenha sido um dos temas a apresentar maiores dificuldades em sua interpretação na evolução dos conhecimentos geomorfológicos.

A forma da vertente proposta por King (1953), com um modelo universal de uma vertente típica que apresenta uma convexidade de erosão na parte subsequente, e finaliza com um pedimento no topo, uma escarpa ou “face livre” retilínea, com uma continuidade de detritos originados suavemente côncavo, comum em rochas estratificadas nas escarpas erosivas.

O modelo proposto por King op. cit., é definido em regiões em que se encontram rochas estratificadas em escarpamentos relacionados à atividade erosiva. Sendo que as vertentes modeladas pelas bacias de drenagem desenvolvidas em rochas não estratificadas ou em rochas cristalinas, como no Brasil oriental, estão longe de possuírem essa característica (CHRISTOFOLETTI, 1980).

De outro modo, Ruhe (1979) aborda uma vertente não representada por um perfil bidimensional, mas uma feição tridimensional, com a representação de nove aspectos geométricos com perfil e a forma associada aos fluxos hídricos, nesses modelos a vertente de análise se encontra como um perfil convexo-convexo (**Figura 2**).

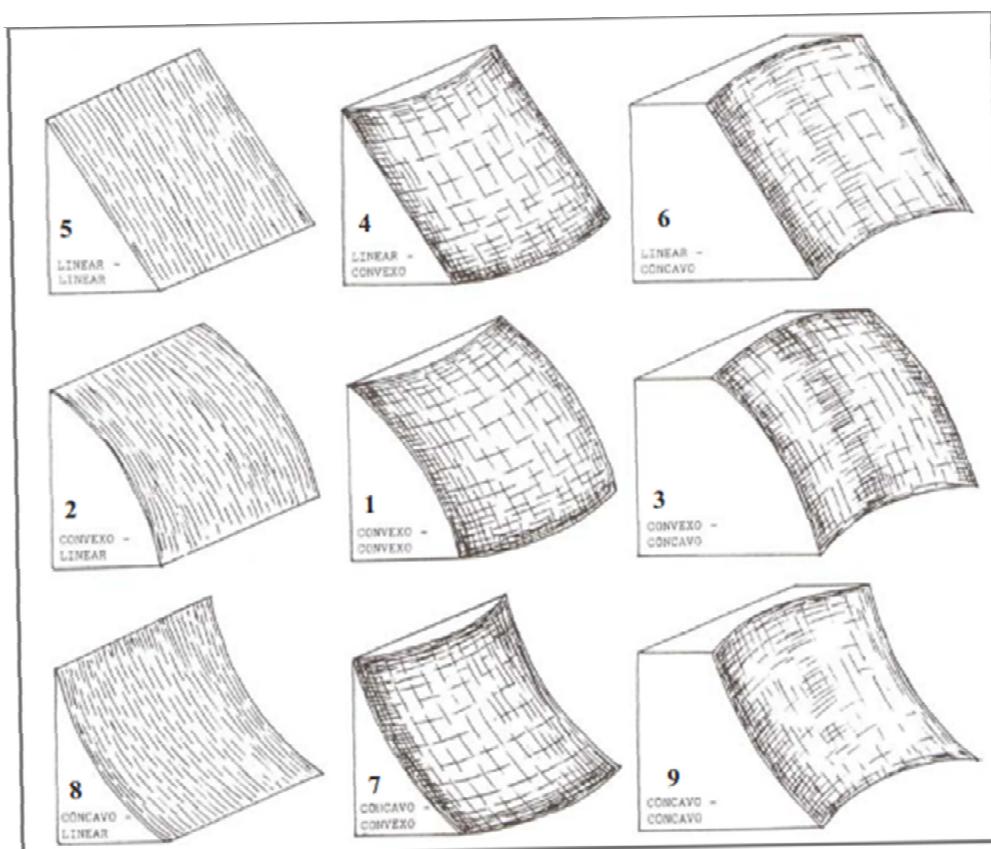


Figura 2 – Diversos tipos de feições tridimensionais presentes numa vertente (RUHE, 1979). Legenda: **1** – forma convexo-convexo (poli convexa); **2** – formas convexo-linear; **3** – forma convexo-côncavo; **4** – linear-convexo; **5** – forma linear-linear; **6** – forma linear-côncavo; **7** – forma côncavo-convexo; **8** – forma côncava linear; **9** – forma côncavo-côncavo (poli côncava).

O modelo colocado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968) contribuiu para o desenvolvimento dos estudos distinguindo as nove unidades hipotéticas no segmento do perfil das vertentes (**Figura 3 e Tabela 1**), de acordo com as formas e processos dominantes, considerando a vertente como um sistema tridimensional complexo, baseadas em características de áreas temperadas úmidas, como o caso brasileiro. Das

nove partes hipotéticas que segue abaixo, somente as unidades quatro, cinco, seis e oito apresentam possibilidades de ruptura, onde a vertente de análise se encontra nas partes três e quatro dessa simulação.

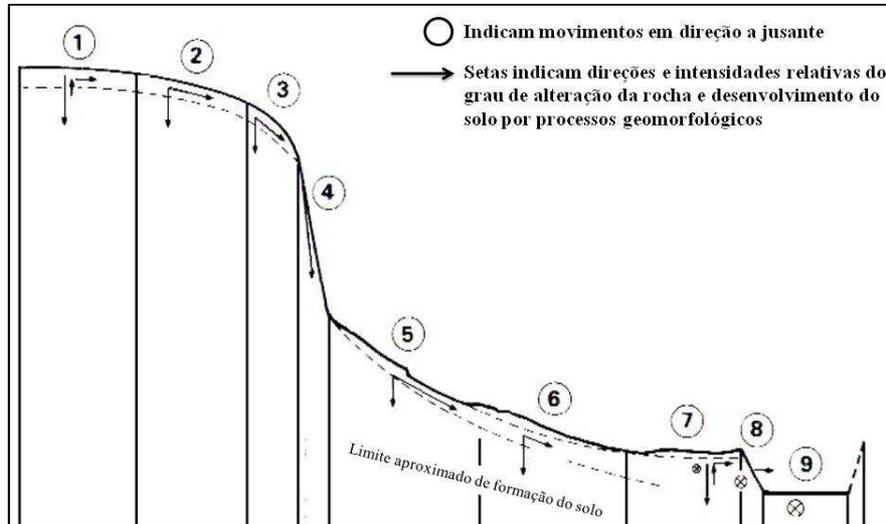


Figura 3 - As nove partes hipotéticas no modelo de vertente apresentado por Dalrymple, Blong e Conacher (1968).

Tabela 1 - Características de cada unidade (DALRYMPLE, BLONG E CONACHER, 1968).

Nº	Unidade da vertente	Processo geomórfico dominante
1	Interflúvio (0°-1°)	Processos pedogenéticos associados com movimento vertical da água superficial.
2	Declive com infiltração (2° - 4°)	Eluviação mecânica e química pelo movimento lateral da água subsuperficial.
3	Declive convexo com reptação	Reptação e formação de terracetes
4	Escarpa (ângulo mínimo de 45°)	Desmoronamentos, deslizamentos, intemperismo químico e mecânico.
5	Declive intermediário de transporte	Transporte de material pelos movimentos coletivos do solo; formação de terracetes; ação da água superficial e subsuperficial.
6	Sopé coluvial (ângulos entre 26° e 35°)	Reposição de material pelos movimentos coletivos e escoamento superficial, formação de cones de dejeção; transporte de material; reptação; ação subsuperficial da água.
7	Declive aluvial (0° - 4°)	Deposição aluvial; processos oriundos do movimento subsuperficial da água.
8	Margem do curso de água	Corrasão, deslizamento, desmoronamento
9	Leito do curso de água	Transporte de material para jusante pela ação da água superficial; gradação periódica e corrasão.

Dalrymple, Blong e Conacher (1968) consideravam a vertente como um sistema tridimensional que se estende do interflúvio ao meio do leito fluvial e da superfície do solo ao limite superior da rocha não intemperizada. A vertente apresenta nove unidades definidas por formas e funções morfodinâmicas distintas. É improvável que todas as representações ocorram na mesma vertente distribuídas na mesma ordem, o importante é caracterizar a existência de algumas das unidades nas vertentes. Este modelo é uma representação ideal da vertente, sem levar em consideração as suas especificidades e para qual tipo de padrão elas podem se desenvolver.

Bloom (1972) colaborou na delimitação dos perfis da vertente com um segmento superior convexo e um inferior côncavo, no entanto, alguns perfis possuem um segmento reto entre as curvas superior e inferior. Além destes, pode ocorrer um segmento adicional, marcado pelo acúmulo de detritos intemperizados.

Neste caso, Bloom op. cit. se baseou em Troeh (1965) para combinar a curvatura de um perfil e curvatura de linhas de nível em uma única classificação da vertente, dividindo o diagrama de vertente em “coletores de água” com contornos côncavos e “distribuidoras de água” com contornos convexos. O eixo vertical da vertente quando apresenta perfil convexo, possui dinâmica de rastejamento e a de perfil côncavo é comandada por erosão pluvial.

Além dos modelos citados acima, foi elaborado um perfil teórico da vertente relacionado à ação dos processos dominantes por meio de modelos matemáticos com bases físicas proposto por Selby (1985), apresentando vertentes nuas, bem como vertentes com camada de regolito. As últimas são constituídas por segmentos côncavos, convexos ou retilíneos, levando em consideração o seu processo dominante.

Os segmentos convexos ocorrem na parte superior da vertente como um resultado de rastejamento do solo e impacto das gotas da chuva. Se a taxa de transporte for proporcional ao ângulo da vertente, este deve aumentar com a distância da crista da encosta e, a convexidade se torna um perfil equilibrado. Os segmentos côncavos representam o equilíbrio da vertente entre o transporte e deposição, pois não ocorrem quando há o solapamento basal da vertente. Geralmente, a concavidade é resultado de um processo hidráulico vertente abaixo. Os segmentos retilíneos desenvolvem-se onde os movimentos de massa são os processos dominantes, pois os escorregamentos tendem a desenvolver longos segmentos retilíneos (SELBY, 1985).

Conforme a descrição antecedente, existem diversos modelos contribuintes para delimitar as formas e perfis da vertente. Logo, é fundamental se amparar nas múltiplas bases literárias desencadeadas desde a metade do século XX, mesmo ainda com bases não conclusivas, para uma aproximação na perspectiva de abordagem das vertentes.

Apesar dos geomorfólogos não se basearem em uma metodologia geométrica definida, sendo mantido o método empírico para explicar o desenvolvimento e os processos atuantes de uma vertente. O estudo desta é imprescindível para se desencadear os processos morfodinâmicos operantes, em que possibilita elaborar uma síntese do comportamento hidrodinâmico da feição do relevo.

Diversos são os mecanismos que levam à instabilidade das vertentes, sendo controlada por uma cadeia de eventos, desde a sua formação litológica seguida pelo seu histórico geológico e geomorfológico. Uma série de condições atua individualmente ou em conjunto, refletindo no aumento ou redução da tensão cisalhante. A **Tabela 2** apresenta os fatores que influenciam na estabilidade deste objetivo investigativo aqui proposto (SELBY, 1993).

Existem vários mecanismos envolvidos na estabilidade de uma encosta (**Tabela 2**), o que já foi relatado por autores como: Wolle e Carvalho (1989), Selby (1993), Fernandes et al. (2001), Lacerda et al. (1997) e outros. Dessa forma, em subseqüente, serão abordados os mecanismos de maior importância no que tange a estabilidade limite de uma vertente.

Augusto Filho e Virgili (1998) consideram o papel desempenhado pela litologia como um dos elementos importantes na estabilidade de vertente, sendo consideradas as principais propriedades internas da rocha (ex. textura e mineralogia) e estruturais, tais como, falhas, juntas, planos de acamamento, laminação e planos de foliação. Essas discontinuidades aceleram o intemperismo químico, levando ao aumento da instabilidade.

Vieira (2007) também observa em outros casos sobre a influência da litologia, a presença de intenso fraturamento, da esfoliação do material rochoso e de juntas paralelas ao relevo, pode propiciar o aumento do nível de água no interior do maciço e, conseqüentemente, o aumento das pressões positivas.

Tabela 2 – Fatores que contribuem para o aumento e redução da tensão cisalhante de uma vertente (SELBY, 1993).

1. Aumento da tensão cisalhante	
Elementos	Principais mecanismos
Remoção do suporte lateral	Erosão pluvial, fluvial ou glacial Intemperismo, umidade, secamento e ação do gelo Inclinação aumentada pelo movimento de massa Corte no sopé da encosta
Sobrecarga por:	Peso da água, do gelo ou do talús Estruturas
Tensão transitória	Movimentação ou inclinação do terreno Vibrações por atividade humana
Remoção do suporte subterrâneo	Corte pela ação da água Intemperismo subaéreo, umidade, secamento e ação do gelo Erosão subterrânea Criação de lagos e reservatórios
Pressão lateral	Água de interstício Congelamento da água Expansão por argilas hidratadas Mobilização de tensão residual
Aumento do ângulo da encosta	Tectônica regional Processos de vulcanismo
2. Redução da tensão cisalhante	
Elementos	Principais mecanismos
Composição de textura	Material franco como tufas vulcânicas e argilas sedimentares Materiais pouco empacotados Forma suave dos grãos Grãos de tamanhos uniformes
Reações físico-químicas	Mudanças catiônicas Hidratação de argilas Secamento de argilas Solução de cimentos
Efeitos da pressão da água	Efeitos de bordas Redução da tensão capilar Arranque de grãos de solo pela água (piping)
Mudança na estrutura	Liquefação espontânea Rastejo progressivo com reorientação das argilas Reativação de planos de ruptura
Vegetação	Remoção das árvores: redução da tensão normal; remoção da coesão aparente pelas raízes das árvores; aumento do lençol freático; aumento de fendas no solo.
Estruturas relíquias	Juntas e planos de fraqueza Camadas de solos plásticos e impermeáveis

Conforme mencionado por Vieira (2007) sobre o aumento da pressão por fluxo de água em consequência da estrutura litológica, Bigarella (2007) considera o equilíbrio limite de uma vertente da seguinte forma:

“A estabilidade de uma vertente diminui quando a resistência ao cisalhamento decresce. O aumento da pressão hidrostática nas vertentes é um mecanismo natural que reduz consideravelmente a resistência ao cisalhamento.” (p. 1010).

Além dos parâmetros geológicos, também é necessário considerar a caracterização da forma, orientação e inclinação como um conjunto de fatores atuantes para definir a resistência máxima ao cisalhamento da vertente.

Outro fator considerável é a sua orientação espacial, ou seja, a sua exposição em relação aos condicionantes climáticos. O exemplo de seu conteúdo de umidade recebido em um determinado local. O nível de umidade no local influenciará a formação e tipologia da cobertura vegetal, a espessura e porosidade do solo, a condição de umidade antecedente e sua facilidade de enxarcamento, entre outras características.

Fredlund (1987) relaciona a perda de sucção e da coesão do material como consequência do aumento de umidade do solo decorrente do avanço da frente de infiltração, no qual a ruptura pode ocorrer sem o alcance da condição de saturação. Segundo Guimarães et al. (1998), a vertente cujo material de alteração sofre maior ciclo de umedecimento e secamento pode se tornar mais susceptível à ruptura, devido ao aumento de porosidade, esta também é resultado do acréscimo de água e elevação das pressões internas do material.

Outro fator correspondente é a propriedade química, mineralógica e granular do solo, uma vez que as propriedades dos argilominerais predominantes influenciam o seu grau de estabilidade. Sidle et al. (1985) exemplifica alguns fatores, como a caulinita que se apresenta como um argilomineral bastante estável devido às fortes ligações de pontes de hidrogênio, conseqüentemente, solos ricos em caulinita são menos plásticos e com baixa capacidade de troca catiônica. Inversamente, os argilominerais como haloisita, vermiculita e montmorilonita, podem atuar como fatores negativos na estabilidade quando predominantes no solo, pois apresentam grande capacidade de incorporar água entre suas lâminas (VIEIRA, 2007).

Segundo Vieira (2007), a variação das pressões de água dentro do solo e da rocha é controlada por precipitações de grande intensidade e duração, pelas taxas de infiltração

e de transmissividade e pela evapotranspiração. Da mesma forma, Sidle et al. (1985) coloca que a variação das pressões de água, determinam o nível transiente hidrológico na vertente e, conseqüentemente, a sua estabilidade. Tendo, uma influência da movimentação e retenção de água, em que essas variáveis podem ser identificadas pelo tamanho das partículas e como elas estão distribuídas no solo.

Wolle e Carvalho (1994) e Vieira e Fernandes (2004), relacionaram a condutividade hidráulica (K) como uma das principais propriedades hidrológicas, cuja variação vertical pode gerar planos de ruptura com a poro pressão positiva. A variação da K representa a taxa de velocidade da água dentro de um meio poroso refletindo a movimentação dos fluxos dentro do solo, com redução de coesão e aumento da frente de umidecimento (VIEIRA, 2007).

Selby (1993) relata o que ocorre na possibilidade da geração da poro pressão positiva, originando um aumento da pressão interna do solo e a conseqüente transferência de carga do solo para a água, causando um efeito de fluabilidade. Com isso, atribui-se a esse comportamento a redução do efeito do atrito entre os grãos do solo e quando acontece o aumento nas poro pressões, a redução da tensão normal do material é efetivada. Dessa forma, há uma redução no fator de segurança na estabilidade da vertente, devido ao aumento da poro pressão e pode-se afirmar que o efeito deflagrador de uma possível instabilidade é com base no comportamento hidrológico da vertente (HARP et al., 1990).

A precipitação pluviométrica em ambiente tropical também é um dos fatores condicionantes no seu processo de equilíbrio limite. A água da chuva penetra nos solos, e a quantidade que infiltra e percola depende da intensidade e duração dos eventos pluviométricos (bem como de outros fatores, a exemplo da condição de umidade antecedente). Na medida em que a água se acumula no solo, ocorre o aumento da pressão hidrostática, e conseqüentemente a diminuição da resistência ao cisalhamento.

Além dos diversos fatores citados acima, a cobertura vegetal assume um papel essencial na dinâmica hidrológica da encosta e, por conseqüência, em sua estabilidade. Assim, Casseti (1991) destaca alguns fatores importantes em relação à vegetação e o equilíbrio limite da vertente, como: os aspectos mecânicos quanto à estruturação do solo através do sistema radicular, retenção e dissipação do material deslocado, sobrecarga nas vertentes, ação de ventos e de cunha nas raízes. O balanço hídrico é relacionado segundo os efeitos de interceptação da água da chuva na vegetação, influenciando a

infiltração, escoamento hipodérmico, ação de transpiração e evapotranspiração (efeito das variações de umidade e temperatura).

Em relação a curva característica da água no solo, à medida de que um solo inicialmente saturado com água vai secando, ele e o seu total de armazenamento sofrem mudanças graduais no comportamento físico e na sua relação com as plantas. Este fato ocorre quando a água remanescente no solo em processo de secagem encontra-se em poros menores, como películas, onde o potencial da água é reduzido principalmente pela ação das forças matriciais (BRADY, 2013). Tais níveis de disponibilidade de água no solo influenciam diretamente o controle de estabilidade da encosta, no que se refere a coesão do solo e poro-pressão positiva.

Quando todos os poros estiverem preenchidos por água em um potencial matricial próximo de zero, o solo permanecerá em sua capacidade máxima de retenção apenas enquanto o líquido continuar a infiltrar-se, e a água, por ação gravitacional, irá percolar para os maiores poros em maiores profundidades.

A capacidade de campo, segundo Reichardt (1988), é a relação da drenagem interna de um solo considerado homogêneo (latossolo). Em resumo é o comportamento dinâmico da água no solo e não uma característica da sua matriz. O principal fator de redução do fluxo de drenagem é a condutividade hidráulica e o gradiente do potencial total da água. A capacidade de campo é relevante na estabilidade de uma encosta, determinando a sua taxa máxima de umidecimento.

A escolha do instante da capacidade de campo é subjetiva, já que o fluxo de drenagem decresce rapidamente com o passar do tempo, mas nunca cessa. Cada tempo escolhido leva a um valor diferente dessa capacidade, cujos métodos de laboratório não possuem suporte teórico. A fim de defender o conceito foram levantados diversos ensaios em laboratório para a sua determinação. O importante do conceito em relação a sua aplicabilidade é o entendimento do caráter dinâmico que os solos apresentam e não tomá-lo como uma característica universal dos solos (REICHARDT, 1988).

Quando a água é adicionada ao solo, ela se distribui de acordo com o estado de energia definido como potencial total da água. O seu movimento se dá de acordo com as distribuições da condutividade hidráulica e dos gradientes de potencial total da água, nos diferentes pontos do sistema. A equação de Darcy e/ou Buckingham rege o movimento da água em solos não saturados e adequados para a análise da distribuição

da água após uma chuva ou irrigação, sendo o caso da capacidade de campo (REICHARDT, 1988).

Apesar do caráter dinâmico dos solos em relação ao conceito de capacidade de campo, Ruiz (2004) mostra que os seus resultados podem ser úteis para efeito prático, tendo o critério clássico de potencial matricial para latossolos de -33 kPa, o qual deve ser levado para potenciais maiores, da ordem de -10 a -6 kPa. O potencial de -33 kPa, que aparece com frequência na literatura, refere-se a solos típicos de regiões de climas temperados, onde há presença de argilas de maior atividade. Em solos característicos das regiões tropicais e úmidas, com predominância de caulinitas e óxidos de ferro e alumínio, a capacidade de campo aproxima-se mais de potenciais no intervalo de -10 a -6 kPa (Reichardt, 1988). Essa observação é confirmada pelo intercepto, diferente de zero e positivo, constatando a capacidade de campo para estes solos, a potenciais maiores que -33 kPa, visto que existe uma relação direta entre o potencial matricial e o conteúdo de água do solo (RUIZ et al., 2003).

Outro estado para avaliar a disponibilidade de água no solo é chamado de ponto de murcha permanente, equivale a quantidade de água retida no solo quando o potencial matricial é inferior ou igual a -1.500 kPa (BRADY, 2013). Estando em um estágio inverso ao da capacidade de campo, quando o solo não possui água disponível no solo e nem para as plantas. O solo se apresenta em estado seco e poeirento, apesar de um pouco de água ainda permanecer nos microporos menores na forma de películas.

Embora as raízes das plantas não costumem secar além do ponto de murcha permanente, se o solo for exposto ao ar, a água continuará sendo perdida por evaporação. Esse estado se dá quando uma amostra de solo está bastante saturada com vapor d'água, entre 98% de umidade relativa e potencial matricial inferior ou igual a 3.100 kPa (BRADY, 2013). A água se encontra na forma de película de apenas 4 ou 5 moléculas de espessura, quando o teor de umidade do solo é denominado como coeficiente hidroscópico (BRADY, 2013).

Com relação aos fatores condicionantes citados, são considerados como variáveis naturais, ou seja, estão ligados à própria natureza da área e do material envolvido. No entanto, a instabilidade da vertente pode ser deflagrada devido à ação direta ou indireta do homem, por meio, por exemplo, da construção de estradas e casas e do desmatamento. Neste caso, quando ocorre a ação do desmatamento, é comum a retirada parcial do sistema radicular que, ao longo de um determinado período, começa a sofrer

deterioração, levando à redução do reforço das raízes e a sua ruptura da massa de solo. No caso da construção de estradas e rodovias, ao levar em consideração as condições locais e as técnicas de construção, essas poderão influenciar na deflagração de rupturas limite por meio do aumento do peso da encosta; da alteração da inclinação da encosta tanto no corte quanto no preenchimento do talude; da remoção do suporte da base da encosta e da reorganização da rede de drenagem (SIDLE et al., 1985).

Conforme os diversos parâmetros que influenciam na deflagração da ruptura das vertentes, sugere a questão de como estes dados devem ser processados para se chegar a uma estimativa de estabilidade limite da vertente. Além dos diversos mecanismos de observação e recolhimento de material em levantamento de campo, devem ser processados em laboratório apresentando um resultado quantitativo que sirva de base para uma melhor compreensão do comportamento e da sensibilidade dos fatores controladores da estabilidade visto anteriormente.

A análise de estabilidade de vertentes não deve atribuir somente o fator de segurança estabelecido por cálculos. Este tipo de avaliação é utilizado como uma ferramenta poderosa para estimar as variações na magnitude do fator de segurança que ocorrem devido às forças externas atuantes. Existem inúmeras possibilidades envolvidas na estabilidade da vertente, como a sua variação com o tempo, os efeitos de percolação de água, vegetação e outros fatores eventuais para se estimar as superfícies potenciais de ruptura, levando em consideração o máximo de informações possíveis e maior acurácia na avaliação das mesmas.

Por fim, para se avaliar de forma detalhada uma vertente e a sua estabilidade, deve-se verificar a distribuição de todas as propriedades descritas acima, com a finalidade de se obter acurácia na análise dos condicionantes de instabilidade por descontinuidades hidráulicas, como é proposto neste estudo.

2.2 Condutividade hidráulica dos solos (K)

Segundo Fernandes et al. (2001), a condutividade hidráulica do solo, em termos relacionados à estabilidade da vertente, assume importância tanto na recarga da água superficial (velocidade da infiltração) quanto na geração de descontinuidades hidráulicas no interior do perfil de alteração, as quais poderão atuar localmente como camadas de impedimento ao fluxo vertical, favorecendo, conseqüentemente, a geração de elevadas poro-pressões positivas.

Sendo assim, a técnica utilizada nessa pesquisa, associada à investigação dos condicionantes atuais da fisiologia da paisagem, é a condutividade hidráulica dos solos. Esta é conceituada por Freeze e Cherry (1979), Brady (1989; 2013), Libardi (2005; 2010) e outros como uma propriedade que representa a habilidade com que o fluido é transportado em meio poroso, dependendo das propriedades do meio e do fluido. A variável está ligada as dimensões associadas, geometria e configuração dos poros do solo.

De acordo com Libardi (2005), no ano de 1856 o engenheiro hidráulico Henry Darcy realizou uma experiência sobre movimento vertical em solução, utilizando água comum em filtros de areia homogênea em condição de saturação. Com esse arranjo experimental, após atingida a condição de equilíbrio dinâmico, quando o valor da vazão (Q) não variava mais com o tempo, Darcy obteve as seguintes conclusões:

- a) A vazão Q, isto é, o volume de solução que atravessa a coluna por unidade de tempo, é proporcional à área A de sua seção transversal, em símbolos: $Q \propto A$.
- b) A vazão Q é proporcional à diferença entre as cargas piezométricas ($h_1 - h_2$) que atuam na extremidade da coluna: $Q \propto (h_1 - h_2)$.
- c) A vazão Q é inversamente proporcional ao comprimento L do filtro de areia: $Q \propto 1/L$

Com isso, foi desenvolvida uma combinação das três conclusões acima para gerar a **equação 1** ou lei de Darcy:

Equação 1 – Equação para determinar a Condutividade Hidráulica Saturada (K_{sat})

$$Q = \frac{K.A. h_1 - h_2}{L}$$

Com base na equação, K_{sat} é uma propriedade do meio poroso, que traduz a rapidez com que determinado líquido atravessa esse meio. Por exemplo, se reproduzirmos duas colunas de filtros idênticas, mas uma com areia grossa e outra com areia fina, o valor de K da primeira será maior do que o da segunda. Isto é, sob condição de saturação, a areia grossa deve conduzir mais facilmente o líquido do que a fina. No experimento de Darcy, o líquido utilizado foi a água e a constante foi nomeada de condutividade hidráulica (LIBARDI, 2005).

Deve-se esclarecer que, quando se diz condutividade hidráulica de um solo, está implícito que se está considerando como meio poroso uma amostra de solo e como fluido que nela se move uma solução aquosa, por isso o adjetivo hidráulica.

Ao relacionar as diferenças texturais e estruturais, a variação da taxa de K está associada às mudanças na granulometria ao longo do perfil de solo (**Figura 4**). Em que ela se encontra extremamente permeável (10^2 a 10^{-1} cm/s) com a presença de cascalhos; e com a permeabilidade baixa (10^{-2} a 10^{-5} cm/s), representada pelos materiais argilo-arenosos e argilas homogêneas (FREEZE e CHERRY, 1979). Com isso, a relação entre fração granulométrica e condutividade hidráulica é direta. Solos com textura mais grosseira (exemplo: cascalho e areia) possuem taxa de K alta e solos de textura pequena (exemplo: argila e silte), obtêm taxa de K relativamente mais baixa.

Observa-se que os diferentes valores na variabilidade de K são expressos em ordem de grandeza, sendo nessa escala que a variação da condutividade hidráulica influencia na estabilidade da vertente (FREEZE e CHERRY, 1979). A K_{sat} é uma propriedade que ajuda a determinar o grau de adequação dos materiais do solo para o desencadeamento dos possíveis movimentos de massa (BRADY, 2013).

Seguindo o parâmetro de K_{sat} delimitada por Brady (2013), a K pode ser saturada (K_{sat}) ou não saturada ($K_{\bar{n}sat-0}$). A K_{sat} ocorre quando todos os poros do solo estão preenchidos com água, correspondendo a um valor constante delimitado como o máximo para K naquele solo. Já a $K_{\bar{n}sat-0}$ corresponde ao fluxo quando os poros estão parcialmente preenchidos com água, pois existe o percentual de umidade volumétrica no solo, correspondendo que este não fica sem água totalmente, possuindo um condição de umidade antecedente.

A oscilação de K no solo é uma característica inerente aos mesmos, surge desde o começo, onde começa a ser formada até o alcance de uma condição de equilíbrio dinâmico. Tendo com esta alta variabilidade, a dificuldade de se apresentar uma estrutura de dependência espacial definida (MENEZES et al., 2006a).

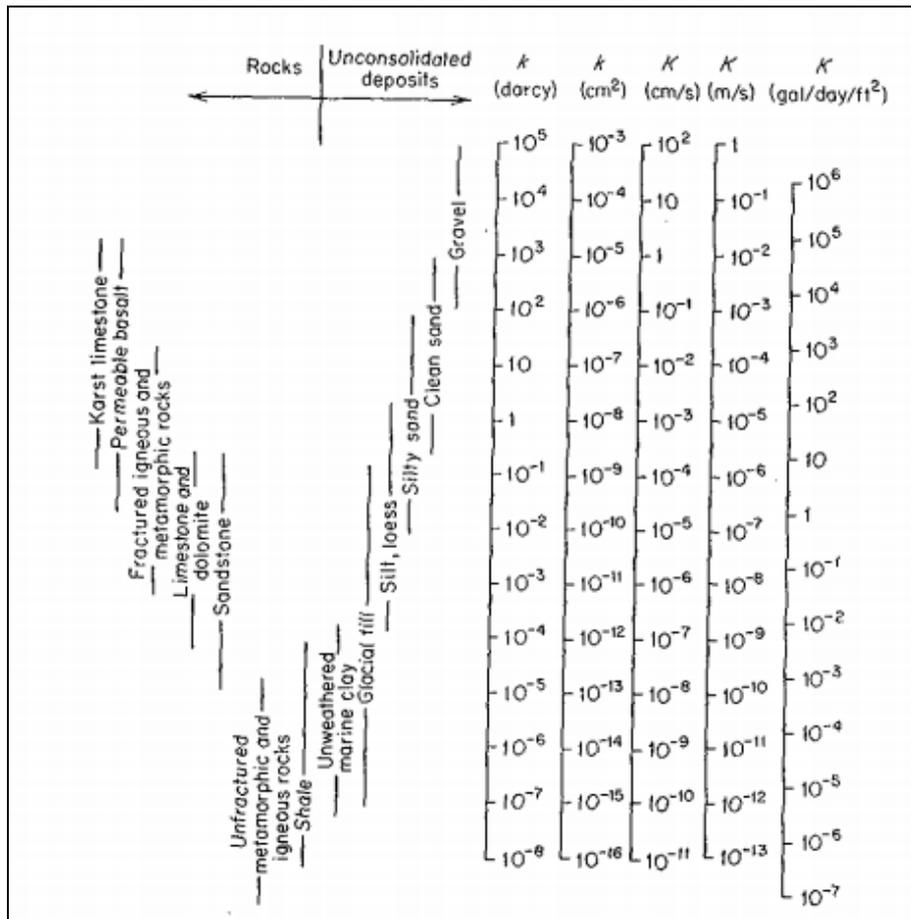


Figura 4 – Estimativa de permeabilidade e condutividade hidráulica de acordo com diferentes materiais (FREEZE e CHERRY, 1979).

A distribuição dos poros e o comportamento de K são informações importantes e sem restrições para se chegar ao resultado da análise de estabilidade de vertentes (VIEIRA e FERNANDES, 2004; MENEZES et al., 2006a). Segundo Brady (1989), os microporos são responsáveis pela retenção de água no solo e os macroporos possibilitam o movimento livre do ar e da água de percolação. Os macroporos podem resultar da decomposição das raízes, bioturbação animal ou de mecanismos de erosão em subsuperfície (DUNNE et al., 1991).

Dessa forma, com todas as afirmações descritas acima com relação ao estudo de K na deflagração dos processos destrutivos na vertente, Gomes (2012) aborda que é notável a participação de algumas propriedades físicas do solo no desenvolvimento de condições críticas de estabilidade. Isso ocorre por conta da influência direta dessas propriedades (textura, estrutura, porosidade, massa específica, entre outras) na dinâmica da água no solo.

Pode-se inferir que a instabilidade de uma vertente pode ser condicionada pelo comportamento hidrológico dos materiais, havendo então a necessidade do conhecimento das propriedades físicas dos solos que influenciam essa dinâmica, sendo uma delas a condutividade hidráulica. Essa propriedade hidrológica dos solos está sujeita a diversas variações espaciais e temporais, exercendo presença significativa na dinâmica hidrológica das vertentes e, como consequência, em sua estabilidade.

2.3 Propriedades físicas e hidrológicas dos solos e a estabilidade da vertente

A instabilidade de uma vertente e sua consequência associada aos movimentos de massa é, em muitos casos, controlada pelo comportamento da água no solo. A condutividade hidráulica dos solos (K) fornece informações fundamentais sobre este comportamento.

Ahrendte e Zuquette (2003) caracterizaram materiais inconsolidados em laboratório e a K_{sat} em campo pela técnica do duplo cilindro. Estas investigações permitiram os autores afirmarem que a superfície de ruptura ocorreu frequentemente entre as camadas silto-arenosas e argilo-arenosas, com uma média da permeabilidade de 1 a 2 ordens de grandeza de diferença (10^{-4} a 10^{-6} m/s), embora estes ensaios não tenham sido realizados avaliando a profundidade nos perfis. Para avaliar um fator deflagratório dos escorregamentos rasos em Campos do Jordão (SP) foram identificados e analisados os mecanismos e fatores naturais que controlam os movimentos destrutivos associados.

Com o objetivo de avaliar os fatores condicionantes dos deslizamentos, destacando os parâmetros morfológicos do terreno e a dinâmica hidrológica dos solos nas bacias dos Rios Quitite e Papagaio (R), Fernandes et al. (2001) desempenharam diversos parâmetros topográficos para analisar os deslizamentos ocorridos em 1996. Utilizou-se o modelo digital de terreno das bacias, combinado com vários mapeamentos ali realizados, foi definido o potencial de deslizamento para as diversas classes de cada atributo topográfico. Paralelamente, foram realizadas simulações com o modelo matemático *SHALSTAB*, voltado para a previsão de áreas instáveis, bem como os dados da condutividade hidráulica dos solos.

Para a simulação de K_{sat} , foram definidos ensaios *in situ* com o permeâmetro de Gelfh com medições em mais de 90 pontos na bacia do rio Papagaio, englobando o perfil de alteração da superfície em até 5,0 m de profundidade, mostrando significativas variações de K_{sat} ao longo do perfil. A **figura 5** mostra a tendência de K_{sat} na bacia, onde o seu valor é elevado perto da superfície, dentro do horizonte A do solo,

diminuindo significativamente em profundidades ao redor de 1,0 m, dentro do horizonte B do solo (em geral bem mais argiloso na bacia). A partir daí, a K_{sat} volta a aumentar, alcançando valores relativamente elevados no interior do horizonte C, com maiores teores de silte e areia, desenvolvidos sobre gnaiss rico em biotita. Na base do perfil de alteração, encontra-se a cerca de 5,0 m de profundidade, onde a K_{sat} volta a diminuir de maneira bastante acentuada.

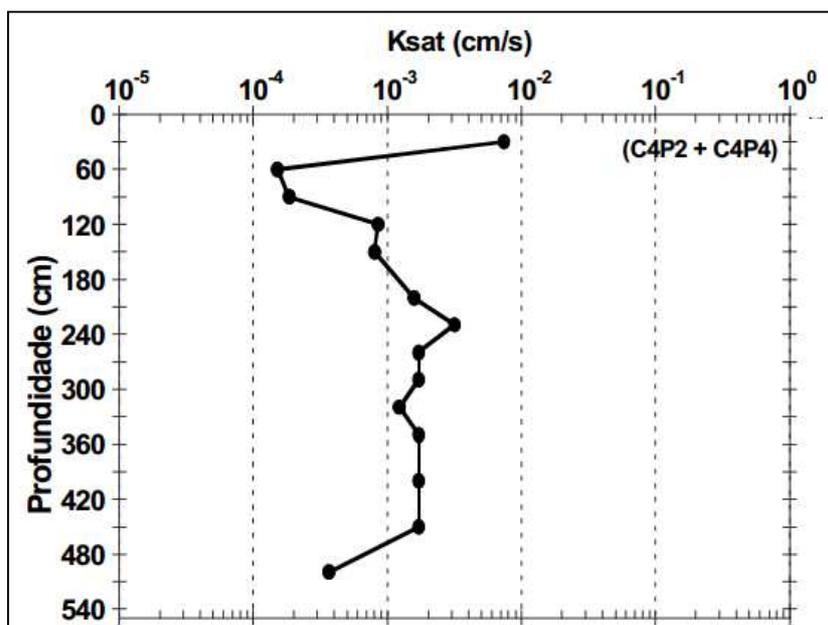


Figura 5 – Variação vertical da condutividade hidráulica saturada, medida *in situ* com o permeômetro de Gelp, em um perfil de alteração próximo à borda da cicatriz de um deslizamento na bacia do rio Papagaio. Fonte: Fernandes et al. (2001).

Seguindo essa mesma linha, Vieira e Fernandes (2004) identificaram o papel desempenhado pelas descontinuidades hidráulicas na deflagração dos escorregamentos ocorridos em 1996, também na bacia do rio Papagaio – RJ. Os autores caracterizaram a variabilidade espacial de K_{sat} dos solos em quatro cicatrizes com diferentes domínios geomorfológicos, nas profundidades de 0,3, 0,6, 0,9, 1,2, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 m, utilizando a técnica do permeômetro de Gelp. Para complementar a avaliação de K_{sat} , foi coletada amostras para a análise das propriedades físicas do solo nas mesmas profundidades. Cerca de 94% dos valores obtidos nos ensaios variaram entre duas ordens de grandeza ($1,0 \times 10^{-5}$ e $1,0 \times 10^{-6}$ m/s).

Segundo Vieira e Fernandes (2004), alguns pontos não apresentaram alterações no valor de K_{sat} ao longo do perfil, enquanto outros apresentaram variações abruptas dos valores de K_{sat} e nas propriedades físicas dos solos. Foi observado em um dos pontos, nas profundidades entre 60 e 90 cm, o aumento nos valores de K_{sat} entre $3,27 \times 10^{-7}$ e $1,90 \times$

10^{-5} m/s. Tal comportamento foi acompanhado pelo aumento da macroporosidade nessas profundidades de variações, no entanto, entre os 90 e 120 cm, não houve correlação positiva entre a K_{sat} e a macroporosidade (**Figura 6**). Os resultados mostraram que existiram variações nos valores de K_{sat} no interior da bacia, e para isso, também deve ser considerada a aplicação dos modelos matemáticos de previsão de deslizamento de terra.

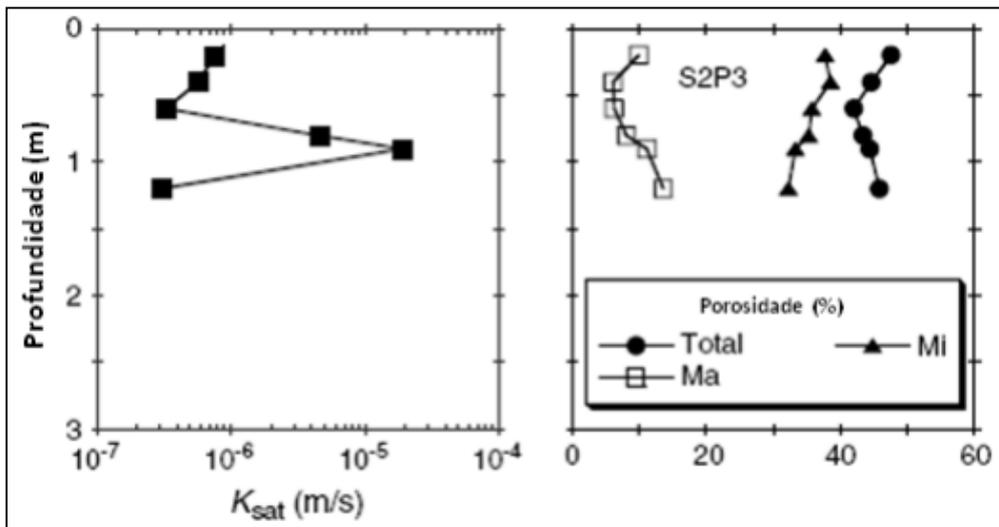


Figura 6 – Variação da K_{sat} em profundidade. A macroporosidade apresenta a mesma tendência da K_{sat} entre as profundidades de 60 e 90 cm. No entanto, entre os 90 e 120 cm, não há uma correlação positiva entre a K_{sat} e a macroporosidade. Fonte: Vieira e Fernandes (2004).

O trabalho de Gomes (2012) objetivou analisar a distribuição lateral e vertical da K_{sat} e a sua influência nos escorregamentos rasos da Serra do Mar – SP. Para tanto, foi desenvolvido em uma bacia representativa da Serra do Mar em três cicatrizes bem preservadas para a realização dos ensaios de K_{sat} *in situ*, utilizando o permeâmetro de Gelpi nas profundidades de 0,25, 0,50, 1,0, 1,50, 2,0 e 2,50 cm. Somado a avaliação de K_{sat} , foram analisadas as propriedades físicas dos materiais (distribuição granulométrica, micro e macroporosidade, porosidade total). Foram obtidos valores de K_{sat} , os quais 85% apresentaram ordens de grandeza entre 10^{-5} e 10^{-6} cm, mostrando uma pequena variabilidade em profundidade de acordo com os perfis de alteração investigados. De forma geral, o autor identificou um aumento de K_{sat} com o aumento da profundidade, assim como a existência de algumas descontinuidades hidráulicas significativas, tanto de redução (cicatriz 2) quanto no aumento brusco da K_{sat} (cicatriz 1 e 3) em uma pequena profundidade (**Figura 7**).

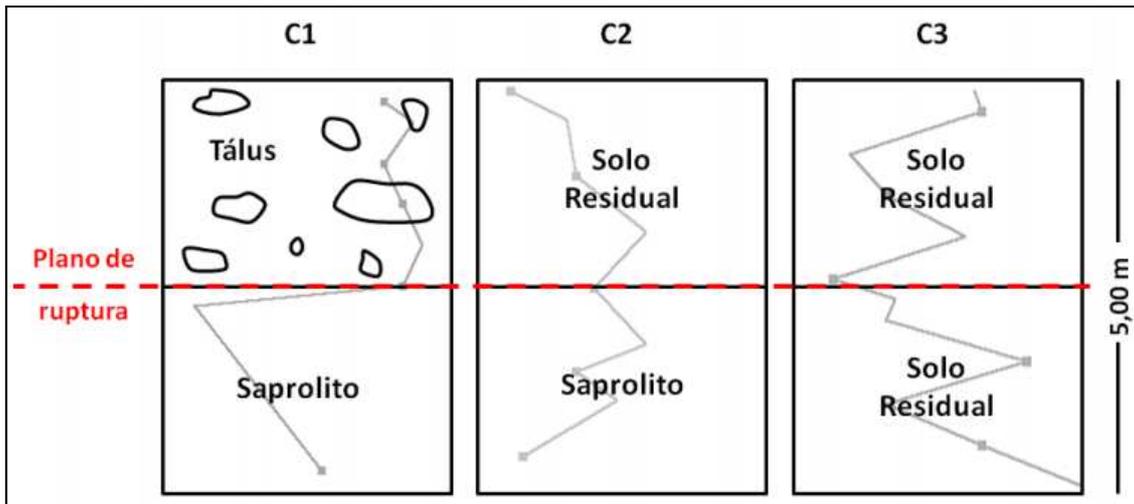


Figura 7 – Diagrama dos perfis formados a partir da sobreposição dos perfis do topo e do centro das cicatrizes, mostrando a variação do material, da K_{sat} em cinza e o possível plano de ruptura em vermelho, os símbolos C1, C2 e C3 indicam as cicatrizes. Fonte: Gomes (2012).

A pesquisa de Shoaei e Sidle (2009) teve como objetivo a compreensão dos condicionantes pedológicos e hidrológicos na deflagração dos deslizamentos e corridas de detritos, ocorridos em uma região de topografia suave e baixo índice pluviométrico na cidade de Ogaya – Japão. A região apresenta um histórico de ocupação por uma comunidade mesolítica de 14.000 A.C, a qual praticava queimadas nas florestas e os produtos ali deixados, acumularam-se nos *hollows* da região.

Os resultados mostraram a existência de camadas ricas em matéria orgânica, onde os valores encontrados de K_{sat} são os mais baixos que em outras camadas dos perfis. Além disso, foi observada uma primeira camada de matéria orgânica decomposta sobrejacente a uma camada com a maior concentração de argila dos perfis (1,2 m de profundidade). Esta configuração pedológica e hidrológica foi provocada por um acúmulo de chuva não representativo da região, ocorrendo a elevação do nível freático juntamente com as poro-pressões positivas e, conseqüentemente, as rupturas abruptas (SHOAEI e SIDLE, 2009).

A pesquisa de Silva et al. (2014) problematiza o processo de ocupação em meio urbano, relacionando a água como o principal agente deflagrador de deslizamentos em regiões tropicais. Com base no estudo da hidrologia de encostas, os autores avaliam os condicionantes de deslizamento raso atrelado aos eventos de fortes chuvas em 2011. Desta forma, para o entendimento da hidrologia subterrânea, a área foi sondada e instrumentada, visando à caracterização física da encosta. Foi utilizado o levantamento geofísico com o georadar para a obtenção dos dados referente à espessura e

profundidade das camadas de solo, diferenças entre horizontes e localização de blocos em subsuperfície. Os resultados de GPR mostraram o contato da camada saprolítica com a laterítica em diferentes respostas dielétricas. Outras feições identificadas no perfil são referentes aos blocos rochosos que influenciam no aumento da permeabilidade e consequentemente infiltração, percolação e exfiltração (SILVA et al. 2014).

Também foi efetuada uma análise dos parâmetros físicos do solo, onde a condutividade hidráulica *in situ* dos solos identificou duas camadas de solos. Uma hipótese em relação a essa diferença de camadas é referente à elevação da poro-pressão positiva, que em eventos extremos de chuva satura o solo e reduz a resistência ao cisalhamento, através da diminuição de sucção e consequentemente da tensão normal efetiva. Como um todo, os resultados mostraram que a influência de blocos rochosos aliada as diferenças de condutividade hidráulica influenciam na ocorrência de fluxos de instabilidade das encostas (SILVA et al., 2014).

Outro trabalho que busca a relação da ocupação desordenada em sítios urbanos e possíveis desastres sócio-naturais é a pesquisa de Parizzi et al. (2010), que avalia os condicionantes dos movimentos de massa ocorridos em Belo Horizonte, dividindo em três grupos distintos: o primeiro concerne na litologia de filitos e xistos, os quais são dependentes da disposição do material, situação de confinamento, descontinuidades e alto grau de alteração do maciço rochoso. Além do alívio de tensão das rochas e a dinâmica das águas são fatores que contribuem para a ruptura do talude; o segundo grupo são os solos reliquiais de gnaisses, as rupturas acontecem no interior das feições erosivas provenientes da rocha mãe; e por último, o terceiro grupo é por depósito de talús, o agravamento ocorre quando há corte no talude, ocasionando movimentos gravitacionais com fluxo de detritos, escorregamentos planares rasos, escorregamentos circulares sucessivos e rastejamentos. Os autores colocam que a maioria dos movimentos de massa é ocasionada pela geometria do talude e o grau de intemperismo que a rocha apresenta.

O georadar detectou o perfil de um talude de xisto com ruptura planar por diáclase e alto grau de fraturamento e presença de foliações e veios de quartzo (PARIZZI et al., 2010). Os resultados granulométricos do regolito de gnaisse, apresentou horizontes A, B e C de saprólitos sobrepostos e o horizonte D de saprólito rocha mãe. Possuem textura de argila arenosa e coesão mais alta que os horizontes sotopostos, da ordem de 20 kPa. Já o horizonte C apresenta coesão nula ou baixa com o valor de 10 kPa. Em relação aos

ensaios de condutividade hidráulica por permeâmetro de Gelf, os resultados para o grupo 2 são da ordem de 10^{-4} considerando um valor médio de K. A análise desse resultado de K é descrito da seguinte forma pelos autores:

“No horizonte B, o plasma pode ser responsável pela obstrução das conexões entre os poros presentes, entretanto, as fissuras desenvolvidas próximas ao contato com o horizonte C indicam a existência de infiltração e percolação preferencial da água ao longo dos contatos entre os horizontes B e C (Santos 2004). No horizonte C, a água encontra maiores dificuldades de percolação devido às conexões reduzidas entre os poros, o que justifica a permeabilidade média dos materiais analisados (PARIZZI et al., 2010, p. 77)”

A condutividade hidráulica para o terceiro grupo de Parizzi et al (2010) resultado de eventos de ruptura préteritos e depósitos de cascalho e frações granulométricas sem selecionamento e mais grosseiras. São materiais de granulometria silte-arenosa com condutividade hidráulica de ordem de grandeza de 10^{-4} , considerada permeabilidade boa a média para solos dessa natureza. A justificativa para valores de K medianos está relacionada à sua textura e estrutura dos solos. No entanto, no contexto desse grupo, embora os solos sejam porosos, (não existe uma eficiência de transferência de água entre os poros por conta da presença de um plasma e fração coloidal obstruindo os canalículos de ligação interporos, o que dificulta a drenagem).

Contudo, Parizzi et al. (2010) aborda que os movimentos de massa ocorrem por conta de suas particularidades de granulometria, do tipo de contato entre o maciço e o talús, da inclinação do talude e da ação da água, que são os fatores determinantes para a redução/aumento da tensão cisalhante. Em depósitos mais espessos, a saturação do solo pode não ser atingida, dependendo das condições de porosidade e estrutura do talús. Já as porosidades com poucas conexões estimulam e facilitam a percolação da água e o aumento da poro-pressão que as superfícies de rupturas mais rasas. De acordo com Cruden & Varnes (1996 apud Parizzi et al., 2010), a quantidade de água infiltrada e percolada no solo determina a velocidade do movimento entre rastejo e escorregamento.

Os trabalhos aqui citados demonstram que as variações nas propriedades dos solos apresentam importantes aplicações na estabilidade das vertentes, sobretudo no âmbito hidrológico. Estes trabalhos mostraram a relação da variação da K_{sat} com a ocorrência ou com os planos potenciais de ruptura à estabilidade da vertente.

Como alicerce dessa pesquisa, buscaram-se trabalhos de cunho acadêmico que utilizaram a vertente e os seus processos de estabilidade como objeto investigativo e a K_{sat} como um dos atributos edáficos que controla esse processo. Estes trabalhos apresentaram objetivos e técnicas semelhantes da pesquisa proposta. No entanto, não há relação com o instrumento metodológico e técnicas de execução. As bases citadas utilizam o permeâmetro de Gelfo e modelos de laboratório para identificar a condutividade hidráulica. Apesar de este trabalho também utilizar técnicas de laboratório, os trabalhos anteriormente citados não adotaram o instrumento e a metodologia aqui propostas, da EMBRAPA (1997) com alterações por bibliografia citada em metodologia. O qual irá permitir a realização dos ensaios *in situ* para o recolhimento do material com o cilindro e em laboratório com o permeâmetro de carga constante, conforme executado por Silva et al. (2005), Silva et al. (2006) e outros.

A pesquisa de Parizzi et al. (2010) e Silva et al. (2014) utilizaram a mesma técnica investigativa para levantamento geofísico (GPR) apesar deste instrumento não se encaixar como protagonista nesta pesquisa e nas supracitadas, porém este se torna complementar à análise de estabilidade de vertente levando em consideração sua estrutura em subsuperfície.

As pesquisas supracitadas apresentaram algumas das possíveis aplicações da mensuração da K_{sat} , executados em laboratório ou em campo, cujos procedimentos adotados demonstraram sua viabilidade em relação ao tema proposto. Tais trabalhos não delimitam o método do estudo tripartite (Ab'Sáber, 1969) aqui proposto, no entanto possuem o mesmo objeto e/ou técnica investigativa os quais serviram de referência para o processo de execução do presente estudo.

Contudo, a revisão bibliográfica se vincula ao estudo da vertente e seus condicionantes de estabilidade, somando-se a conceitos e amparos bibliográficos, em vista à implementação de um produto que irá corresponder a uma natureza morfodinâmica associada aos componentes hidrológicos e pedológicos da vertente analisada. Urge, pois, um instrumento de gestão e planejamento para os municípios brasileiros, em apoio à elaboração de cartas geotécnicas para a identificação e mitigação de áreas susceptíveis a movimento de massa.

3 ÁREA DE ESTUDO: SEDE DO MUNICÍPIO DE SANTA TERESA (ES) E A VERTENTE DO BAIRRO DE VILA NOVA

Para o desenvolvimento desse estudo foi selecionada uma vertente situada no bairro de Vila Nova, localizada na sede do município de Santa Teresa – ES (**Figura 8**). O município de Santa Teresa, localizado na região serrana do Estado do Espírito Santo, região sudeste do Brasil, possui uma área de 683,157km² e uma população de 21.823 habitantes (IBGE, 2010). A escolha dessa vertente foi atribuída à alteração morfológica sofrida na realização do corte para a implantação de moradia, situada no limite do terço inferior com o médio da vertente de característica dispersora neste ponto.

Nesse capítulo são descritos, na escala da sede do município de Santa Teresa e da vertente analisada, aspectos de cunho geológico-geomorfológico, geotécnico, climatológico e de uso e cobertura da terra que possam contribuir para o melhor entendimento dos fatores controladores e dos mecanismos de ruptura que levam à instabilização da vertente. O objetivo principal dessa caracterização é subsidiar a entrada dos parâmetros utilizados pelas técnicas de previsão e, a partir dos resultados obtidos, analisar os fatores deflagradores de ruptura da área estudada.



Figura 8 – Vertente de análise. Bairro Vila Nova, Santa Teresa (ES), coordenada UTM - Datum Sirgas 2000 - 326883,29 E/ 7794121,36 N.

3.1 Geologia

Segundo o CPRM (2013), a geologia do município de Santa Teresa, especificamente de sua sede é compreendida por rochas de idade Neoproterozoica de período Ediacariano datadas de 635 – 541 (Ma) e coluna litoestratigráfica situada na Província Mantiqueira.

Ocorrem dois complexos distintos na sede. O primeiro, de estágio pré-orogênico, chamado de complexo Nova Venécia, ocorre em grande totalidade da sede do município, inclusive na área de análise. Este é caracterizado por sillimanita-granada-cordierita-biotita gnaisse bandado com intercalações de calcissilicáticas (NP3nv), diatexitos (d); migmatitos (m); gnaisses quartzosos (gnq); quartzitos (qt). Este complexo possui domínio geológico de complexos granito-gnaisse-migmatitos e granulitos de crosta inferior. Sua unidade geológica são os migmatitos paraderivados com

deformação tectônica intensamente dobrada, com presença de zonas de cisalhamento e intemperismo físico e químico baixo a alto na horizontal e vertical (CPRM, 2013).

O segundo complexo geológico presente na sede do município, sem expressiva representatividade como o primeiro, de estágio pré a- sin-orogênico de granitóides foliados a gnáissicos predominantemente metaluminosos, calcialcalinos de tipo 1: com os ortogneisses Santa Teresa (st). O complexo apresenta domínio geológico de complexos granitóides muito deformados, com granitóides pré a sin tectônicos, crosta inferior a intermediária e muito deformado. A Unidade geológica é o Charnoquitóide com deformação tectônica intensamente dobrada, presença de zonas de cisalhamento e intemperismo físico e químico moderado a alto (CPRM, 2013). O bairro de Vila Nova apresenta intensa rede de lineamentos derivados das discontinuidades litológicas com fraturamentos e direções de atitudes geológicas comprovando o domínio geológico de deformação.

De acordo com o CPRM (1990), folha Colatina SE-24-Y-C-VI, a área do bairro de Vila Nova possui uma foliação com mergulho de orientação em 40° e juntas com plano de falha de orientação vertical. A orientação dos planos de acamamento e foliação seguem eixos perpendiculares ao abatimento e deslizamentos ocorridos na área. O gnaisse da área de estudo apresenta planos preferenciais de fraqueza com discontinuidades e possíveis eixos preferenciais de percolação de água, levando ao abatimento do material.

3.2 Geomorfologia e Solos

As feições geomorfológicas da sede de Santa Teresa, segundo o IJSN (2012), apresentam morfoestruturas de domínio Faixa de Dobramentos Remobilizados, caracterizado por evidências de movimentos crustais, com marcas de falhas, deslocamento de blocos e falhamentos transversos, impondo nítido controle estrutural sobre a morfologia atual. Sua região pertence aos Planaltos da Mantiqueira Setentrional, esse tipo de formação planáltica possui aspecto montanhoso fortemente dissecado, comandado pelos agentes fluviais, a dissecação age conforme as fraquezas litológicas e estruturais, gerando diferentes níveis altimétricos.

Apesar de a sede apresentar o mesmo domínio e região morfoestrutural, esta se configura em dois tipos de unidades. A primeira são os Patamares Escalonados do Sul Capixaba, abrangendo grande parte do município, bem como de sua sede. A unidade apresenta níveis de dissecação escalonados formando patamares, delimitados por frente

de escarpadas adaptadas a falhas voltadas para noroeste e com caimento topográfico para sudeste, sugerindo blocos basculados em decorrência de impulsos epigenéticos relacionados com a atuação dos ciclos geotectônicos (IJSN, 2012). A segunda unidade morfoestrutural corresponde ao Maciço do Caparaó, no qual possui um modelado intensamente dissecado com altitudes superiores a 600m em toda sua extensão, podendo atingir cotas superiores a 2.000m de altitude na área core. A conjugação de influências dos eventos tectônicos sobre essas rochas e climas úmidos é percebida nas formas de dissecação intensamente orientadas por falhas intercruzadas, escarpas adaptadas e falhas e elevações residuais (IJSN, 2012).

A classificação dos solos na sede do município, segundo os levantamentos pedológicos da Embrapa (2006), apresenta duas classes distintas: a primeira é o Latossolo Vermelho-Amarelo, presente em expressividade na sede do município, que é a classe característica da área de estudo. A segunda classe de solo que ocorre na sede do município é o Neossolo Litólico, verificado somente em uma pequena porção a leste da sede de Santa Teresa.

Os Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura (EMBRAPA, 2013). O Latossolo Vermelho-Amarelo encontrado na região possui saturação distrófica, textura argilosa, horizonte A moderado e são encontrados nos relevos montanhosos e fortemente ondulados (EMBRAPA, 2013).

A EMBRAPA (2013) ao tratar do Neossolo Litólito, faz referência a solos constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição químico-mineralógica, ou por influência dos demais fatores de formação. São solos com horizonte A ou hístico, assentes diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material constituído por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm (cascalhos, calhaus e matacões). Pode-se admitir um horizonte B em início de formação, porém sua espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Os Neossolos Litólicos típicos da região de estudo são caracterizados por possuir

saturação eutrófica e distrófica, textura média e argilosa, horizonte A moderado e se encontra em relevos escarpados, montanhosos e de forte ondulação (EMBRAPA, 2013).

3.3 Uso e cobertura da terra

Segundo o INCAPER (2011), o uso e cobertura da terra no município de Santa Teresa apresenta uma distribuição de 50% para a agricultura (sendo 38% de agropecuária e 12% de florestas econômicas), 40% de matas nativas e capoeiras em estágio de regeneração, 8% de uso inaproveitável com as pedras e afloramentos de rocha e 4% de usos como áreas urbanas, estradas, rios e construções.

O município como um todo apresenta 40% de cobertura florestal nativa, onde predominam cerca de 24.000 ha de Mata Atlântica de Montanha e Capoeiras em Estágio Secundário de Regeneração. Apesar de o município apresentar parte de sua cobertura vegetal preservada, as demais áreas sofrem com impactos ambientais em função da exploração de diversas atividades econômicas em áreas marginais para o cultivo e criação e com o uso inadequado das práticas conservacionistas (INCAPER, 2011).

As práticas de impacto acarretam em diversos problemas relacionados ao uso indevido dos componentes naturais da paisagem, como as pastagens degradadas, assoreamento de córregos e rios, sedimentação em estradas por erosão, diminuição da taxa de infiltração de água no solo e desaparecimento e/ou diminuição da vazão das nascentes locais.

Neste contexto, apresenta-se na **Figura 9** a delimitação de uso e cobertura da sede de Santa Teresa, bem como da área de estudo, na escala de 1:5000 confeccionado por PMRR (2014). No que se refere ao processo de ocupação da área de estudo, foram identificadas cinco tipologias de uso conceituadas pelo IBGE (2013) descritas com base nos levantamentos de campo executados na região:

- Área Urbana: correspondem as cidades (sedes municipais), vilas (sedes distritais) e áreas urbanas isoladas. São áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não agrícolas. No entanto, a área correspondente ao bairro de Vila Nova, se insere numa urbanização recente, onde ainda não há o predomínio de adensamento populacional como nas outras áreas da sede do município.
- Eucalipto: corresponde a categoria de culturas permanentes, com ciclo vegetativo de longa duração. O eucalipto é considerado como formação ou intervenção antrópica por maciços com espécies florestais nativas ou exóticas,

representada por plantio homogêneo. A área de estudo apresenta uma parcela de eucalipto, no qual este tipo de cultura é uma realidade nos municípios da região serrana do Espírito Santo. Apesar de haver o plantio homogêneo de eucalipto, estas regiões aplicam culturas diversificadas que abastecem os comércios locais, estaduais e interestaduais.

- Cultura perene: é o cultivo de plantas que apresentam alternância e curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano. Na região há a presença de rotatividade de plantio, onde se destacam culturas como grãos e cereais, raízes, café, tubérculos e hortaliças. Incluem ainda as plantas hortícolas, floríferas, aromáticas e condimentares de pequeno porte.
- Pastagem: apesar de a classificação destinar como uma área de pastoreio do gado, formada mediante plantio de forragens perenes ou aproveitamento e melhoria de pastagens naturais. No caso da área de estudo, a pastagem acontece para a instituição de culturas agrícolas temporárias ou a implantação de moradia, associada a cortes nos taludes de alta inclinação. Nesta área, o solo está coberto por vegetação de gramíneas, cuja altura pode variar de alguns decímetros a alguns centímetros, apresentando também solo desnudo.
- Floresta: consideram-se como florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 m, incluindo-se diversos tipos de fisionomias de florestas. Como dito anteriormente, o município de Santa Teresa apresenta grande parte de sua estrutura vegetal nativa de Mata Atlântica preservada, no entanto os impactos ambientais são gerados, e para minimizar esses impactos estão sendo realizadas ações de conservação dos solos e dos recursos hídricos, como o reflorestamento em áreas de forte inclinação, proteção de nascentes, recuperação das matas ciliares e orientação preservacionista dos produtores da região.

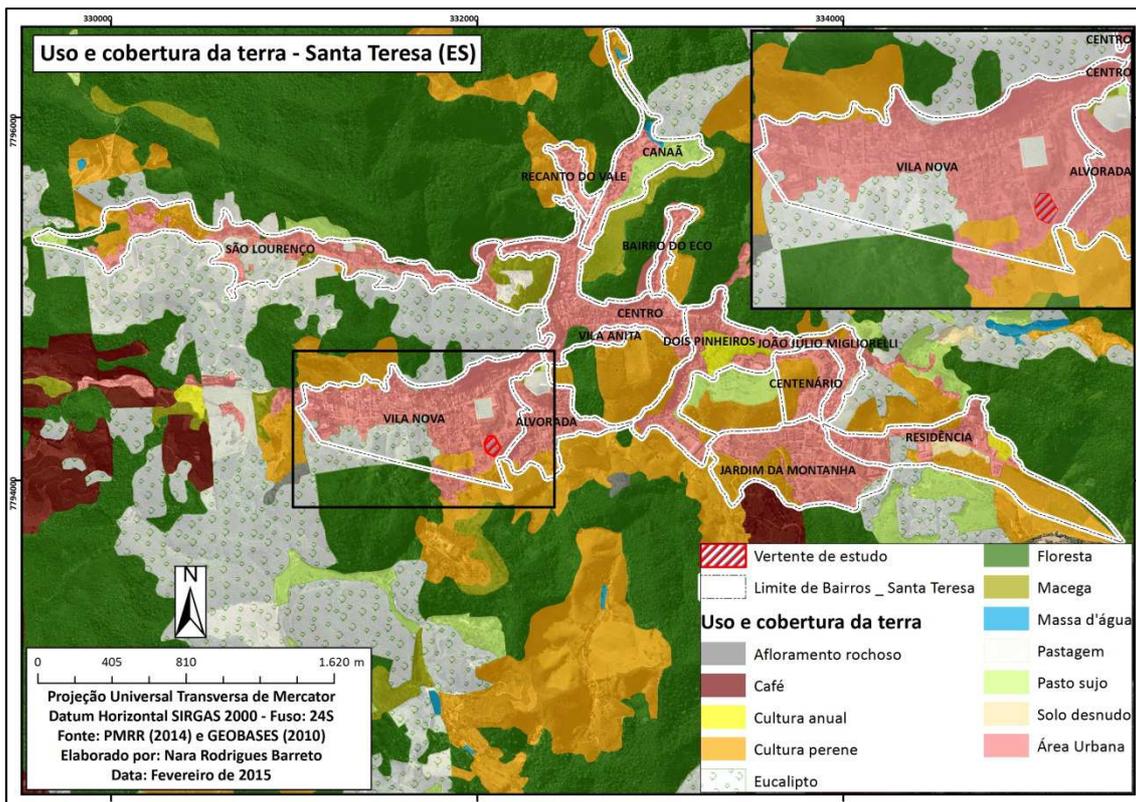


Figura 9 - Uso e Cobertura da Terra.

3.4 Regime pluviométrico e principais processos

Na classificação de Köppen, o clima de Santa Teresa é do tipo Cwa (subtropical de inverno seco), com temperatura média em torno dos 18°C. No inverno os valores podem chegar entre 15 a 18°C, com média mínima diária de 6 a 10°C (FERREIRA, et al. 2013).

Santa Teresa está inserida na região serrana do Espírito Santo que apresenta alto índice de umidade. Ao analisar a **Figura 10**, é possível identificar quatro meses secos (junho a setembro) e em torno de dois meses parcialmente secos. No entanto, pelo menos seis meses do ano são úmidos a parcialmente úmidos (outubro a abril). A sede do município e a área de estudo, se encontram na zona 2, onde ocorrem terras de temperaturas amenas acidentadas e chuvosas (INCAPER, 1999).

ZONAS	Temperatura		Relevo Declividade	Meses secos ¹	Água											
	Média mín. mês mais frio (°C)	Média máx. mês mais quente (°C)			Meses secos, chuvosos/secos e secos ¹											
					J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Zona 1 → Terras frias, acidentadas e chuvosas	7,3 – 9,4	25,3 – 27,8	> 8%	3,0	U	U	U	U	P	P	P	S	P	U	U	U
Zona 2 → Terras de temperaturas amenas acidentadas e chuvosas	9,4 – 11,8	27,8 – 30,7	> 8%	2,5	U	P	U	U	U	P	P	P	P	U	U	U
3,0				U	U	U	U	P	P	P	S	P	U	U	U	
Zona 3 → Terras de temperaturas amenas, acidentadas e chuvosa/seca	9,4 – 11,8	27,8 – 30,7	> 8%	4,5	U	U	U	U	P	S	S	S	S	U	U	U
Zona 4 → Terras quentes, acidentadas e chuvosas	11,8 – 18,0	30,7 – 34,0	> 8%	2,5	U	P	U	U	U	P	P	P	P	U	U	U
Zona 6 → Terras quentes, acidentadas e secas.	11,8 – 18,0	30,7 – 34,0	> 8%	7	U	P	P	P	S	S	S	S	S	P	U	U

Figura 10 – Características das zonas naturais do município de Santa Teresa. Fonte: <http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/?pagina=carac>, acesso em 17 fevereiro 2015.

U	Chuvoso
S	Seco
P	Parcialmente seco

A sede do município apresenta, segundo os dados da estação meteorológica de observação de superfície – Santa Teresa – A613, código OMM: 86804 (IMET, 2015), precipitação média anual de 1.000 – 1.300 mm/a, deficiência hídrica inexpressiva ao comparar com o Estado, com a média de 0,0074 – 50 mm/a e excedente hídrico elevado de 150 - 250 mm/a.

São frequentes os eventos associados à instabilidade das vertentes na região com os movimentos de massa, alguns eventos, associados aos índices pluviométricos de magnitudes significativas, marcaram o início dos estudos sistemáticos sobre esses processos. Foram desenvolvidos trabalhos de cunho geotécnico, como o PMRR (2014) e CPRM (2012), com o intuito de elaborar cartas de risco que buscam a identificação e mitigação ou erradicação das situações de risco, e a elas devem ser associadas soluções de engenharia, intervenções estruturais ou não estruturais, subsidiando instrumentos de planejamento e gestão de risco.

A caracterização da área é apresentada pela descrição resumida de Ab´Sáber (2003) com o domínio dos “mares de morros”, onde Santa Teresa se enquadra com a seguinte combinação de fatos fisiográficos: decomposição funda e profunda da rocha cristalina, presença de solos do tipo latossolo, superposição de solos devido às flutuações climáticas finais do Quaternário, mamelonização universal das vertentes, lençol de água subterrâneo que alimenta permanentemente a correnteza dos leitos dos cursos d’água,

cobertura florestal contínua na paisagem primária, desde o fundo dos vales até os interflúvios, forte cota de umidade do ar e o equilíbrio sutil entre os processos morfoclimáticos, pedológicos, hidrológicos e ecossistêmicos.

4 METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os objetivos propostos nessa pesquisa fossem alcançados, sobretudo a análise da condutividade hidráulica saturada nos solos (K_{sat}) na estabilidade de uma vertente, alguns procedimentos e materiais foram adotados. A metodologia da pesquisa utilizada foi com base no estudo tripartite geomorfológico de Ab'Sáber (1969), descrito no item **4.1**.

Com base na seleção da vertente escolhida para o estudo, foram levantados os mapeamentos de risco até então desenvolvidos na região, os parâmetros topográficos avaliados e as considerações vistas em levantamento de campo na sede do município. Posto isso, a descrição das técnicas se inicia no item **4.2**, com uma modelagem em SIG (Sistemas de Informações Geográficas) para avaliar a susceptibilidade a movimento de massa do sítio urbano de Santa Teresa, em escala regional (**4.2.1**). No item **4.2.2** é especializado em escala de detalhe a localização das áreas em que foram realizadas as coletas das amostras deformadas e indeformadas, bem como a localização dos perfis de imageamento do georadar, conforme as etapas seguintes. Foi elaborada a descrição da utilização do GPR (*Ground Penetration Radar*) para uma caracterização prévia do comportamento hidrológico da vertente, remetendo a sua estrutura e feições geológicas em subsuperfície (**4.2.3**). Posteriormente, foi analisada a morfologia do solo, levando em consideração os parâmetros de levantamento de campo (**4.2.4**). Por fim, no item **4.2.5**, foram avaliados os valores de K_{sat} de forma conjunta às propriedades físicas, para a verificação dos materiais constituintes na vertente, sua textura e estrutura.

A execução das técnicas descritas acima foi necessária para se chegar aos três níveis de abordagem de uma pesquisa geomorfológica integral, apresentado por Ab'Sáber (1969) com a sua compartimentação topográfica, a estrutura superficial e a fisiologia da paisagem vistos a seguir.

4.1 Níveis de abordagem em geomorfologia

Florenzano (2008) aborda por meio do desenvolvimento da ciência geomorfológica, desde o início no século XVIII, os estudos brasileiros de maior contribuição à esse

histórico teórico geomorfológico foram os de Ab'Sáber (1969), com a influência da escola germânica, estabelecendo três níveis de abordagem. ABREU (1982) revela diante da proposta de Ab'Sáber (1969) uma maior flexibilidade que permite um ajuste à essência dos fatos estudados, levando em consideração o ponto de vista espacial, bem como o temporal. Para tanto, apresenta-se o estudo integral do relevo em três níveis:

- Compartimentação topográfica:

Segundo Ab'Saber (1969), no primeiro nível de considerações em um campo geomorfológico científico, deve-se obter o entendimento da compartimentação da topografia, assim como da caracterização e descrição, tão exatas quanto possíveis, das formas de relevo de cada um dos compartimentos estudados.

A avaliação da compartimentação topográfica concerne na individualização de um conjunto de formas com características semelhantes, conduzindo a afirmação de que estas foram elaboradas em certas condições morfogênicas ou morfoclimáticas similares, revelando, assim, relações lito-estratigráficas ou que tenham sido submetidas a eventos tectodinâmicos (CASSETI, 2005).

A interpretação das forças ao longo do tempo nos leva a caracterizar as suas formas hipsométricas, clinométricas, comprimento médio da vertente, densidade de drenagem e da existência de traços genéticos comuns como a compartimentação de um conjunto, os quais são resultantes de forças contrárias como: as forças comandadas pelos agentes internos, considerando o comportamento litoestratigráfico e implicações de natureza tectônica, e de agentes externos, relacionados aos mecanismos morfogênicos, associado aos componentes do clima.

Casseti (2005) evidencia a compartimentação topográfica como o resultado das relações processuais e respectivas implicações na tectônica estrutural registrada ao longo do tempo, considerando as forças de elaboração do modelado do relevo como as alternâncias climáticas e as variações estruturais que geram formas diferenciadas. Torres (2012) inclui observações relativas aos diferentes níveis topográficos e características do relevo, os quais apresentam uma importância direta no processo de ocupação. Neste sentido, a geomorfologia ampara o processo de uso e ocupação, pois ela assume a importância de definir os diferentes graus de susceptibilidade que a área possui.

Dessa maneira, os eventos às condições climáticas ao longo do tempo e os eventos tectônicos em determinadas condições estruturais, são importantes para a compreensão do modelado do relevo atual, cuja caracterização das formas nos permite a uma avaliação da susceptibilidade a eventos morfodinâmicos que a área de estudo apresenta.

- Estrutura Superficial:

Segundo Caseti (2005), a estrutura superficial é a abordagem do segundo nível sistematizado por Ab'Saber (1969). São depósitos de cobertura elaborados por agentes morfogenéticos sob uma determinada condição climática, presente em diferentes compartimentos topográficos. O termo estrutura superficial remete ao arranjo dos depósitos correlativos em superfície e difere do conceito geológico de litificação das estruturas. Esta expressão é derivada de Penck (1924 *apud* Caseti, 2005), que utilizou no sentido de conjunto dos depósitos por entulhamento resultantes do trabalho da erosão e energia para a construção do relevo para comandar o seu processo de evolução.

O estudo da estrutura superficial nos oferece a compreensão evolutiva do relevo. As relações processuais e depósitos correlativos evidenciados nas diferentes zonas climáticas do globo servem para o entendimento dos paleodepósitos ou paleopavimentos detríticos, encontrados como estrutura superficial. As características dos diferentes depósitos podem inferir as condições ambientais para o uso de uma cronologia relativa (CASSETI, 2005).

A importância da constatação, registro e análise dos aspectos morfográficos e morfológicos inerentes aos compartimentos delimitados são de associar ao escopo do presente estudo a análise dos aspectos relacionados à estrutura superficial e morfologia da paisagem. O segundo nível do estudo deve se pautar na verificação e classificação de elementos como litologias/afloramentos de rocha e materiais pedogenéticos (solos), em associação às conformações geométricas inerentes às vertentes.

Moura et al. (1991) e Modenesi (1984) colocam que a integração dos estudos estratigráficos e de cunho geomorfológico sobre a dinâmica Quaternária permitiu que o conhecimento sobre a evolução das encostas em paisagem úmidas fosse mais aprimorado. As discontinuidades verificadas na superfície e subsuperfície dos complexos de rampa podem indicar fases diferenciadas na evolução dos anfiteatros estudados, estes sendo importantes unidades funcionais para a análise geomorfológica e possível aplicabilidade nas questões referentes ao planejamento de uso do solo.

A compreensão dos processos morfogenéticos pretéritos dão subsídio ao entendimento das propriedades físico-químicas dos depósitos de cobertura. Como exemplo, a avaliação dos processos de deslizamento e ruptura de vertentes, obtendo um prognóstico dos impactos com a análise existente entre a rocha e o material subjacente e características do quadro evolutivo do relevo analisado.

- Fisiologia da paisagem:

O terceiro nível de abordagem da pesquisa geomorfológica “(...) se refere ao estudo das condicionantes e dos fatores morfogenéticos e pedogenéticos atuais, por meio da observação da dinâmica climática vigente, medidos e controlados por instrumentos de precisão” (AB’ SÁBER, 1969, p. 02). A fisiologia da paisagem diz respeito ao momento atual e sub-atual do quadro evolutivo do relevo, considerando os processos morfodinâmicos, a exemplo das ocorrências pluviométricas nas áreas intertropicais ou processos específicos nos diferentes níveis do globo, bem como as transformações produzidas pela intervenção antrópica (CASSETI, 2005).

A fisiologia da paisagem faz referência aos processos morfoclimáticos e pedogênicos atuais. Portanto, é o estudo da situação atual do relevo, fruto das relações morfodinâmicas resultantes da consonância entre os fatores inerentes ao próprio relevo, e dando ênfase ao uso e ocupação do modelado enquanto interface das forças antagônicas.

Dessa forma, Torres (2012) observa o terceiro nível de abordagem, para além dos processos morfodinâmicos atuais, este atrela o homem como um dos grandes sujeitos presentes no que tange a modificação do relevo. A presença humana tem respondido pela aceleração dos processos morfogenéticos e morfodinâmicos, esse processo é denominado como formação tecnogênica. Mesmo a ação indireta do homem, ao utilizar e intervir no uso e ocupação altera de forma substancial as paisagens, gerando desequilíbrios morfológicos ou impactos geoambientais, como os movimentos de massa, voçorocamento, assoreamento, dentre outros.

Embora a fisiologia da paisagem concentre atenção no momento histórico atual, não deixa de levar em consideração os resultados dos mecanismos associados ao tempo geológico, responsáveis pela evolução do relevo, expresso na compartimentação topográfica e nos depósitos correlativos à estrutura superficial. Assim, a análise do terceiro nível de abordagem do relevo pressupõe conhecimento dos dois níveis

anteriores, ou seja, aspectos morfométricos e morfográficos da área de estudo para se chegar à uma morfodinâmica atual (CAUS, 2010).

Para Casseti (2005), os níveis de abordagem nos estudos geomorfológicos, vistos de forma integrada, permitem a compreensão do relevo na sua total dimensão. Dessa forma, para o envolvimento do pesquisador com as atividades desenvolvidas nos diferentes níveis de análise geomorfológica.

Os levantamentos em relação à compartimentação topográfica são elaborados em atividades de gabinete, utilizando cartas de base, fotografias aéreas ou imagens, ficando as atividades de campo restritas a observações e comprovações. No estudo da estrutura superficial, os levantamentos de campo são imprescindíveis, considerando a análise dos perfis e abertura de trincheiras, além da coleta do material para avaliações feitas em laboratório. Por último, no estudo da fisiologia da paisagem, o controle de campo é intensificado, pois é necessário o acompanhamento sistemático aos processos, os quais normalmente exigem o emprego de equipamentos específicos ou recursos tecnológicos sofisticados. Em decorrência as etapas vistas acima, para evidenciar a importância da análise integrada dos referidos níveis de estudo geomorfológicos, recorre-se aos parâmetros imprescindíveis, como a elaboração de uma carta geomorfológica concluinte, considerando o critério adotado por Tricart (1967 *apud* Casseti, 2005).

Em relação à metodologia adotada, Modenesi (2010) aborda as etapas de pesquisa de Ab'Sáber (1969) como um verdadeiro guia metodológico para a pesquisa geomorfológica. A obra permanece apesar de mais de 45 anos passados desde a sua publicação. Esta se apresenta por Ab'Sáber (1969) como uma simbiose conceitual reunindo os principais objetivos e enfoques que caracterizam a geomorfologia contemporânea em fatos geomorfológicos distribuídas nos três níveis de abordagem. É uma abordagem completa que inclui a análise de ações morfológicas, pedológicas e hidrodinâmicas de ação integrada.

No estudo dos três níveis geomorfológicos, os processos evoluem de uma escala de tempo geológica para uma escala de tempo histórica ou humana. Isso faz com que ocorra a incorporação de novas variáveis analíticas, exigindo maior controle de campo, o que implica o emprego de técnicas, podendo chegar a níveis elevados de sofisticação para análises específicas, conforme a proposta que este trabalho possui. Com isso, a seguir, serão especificadas as técnicas utilizadas neste trabalho para se chegar ao

objetivo final, respeitando o método dos níveis de abordagem de uma pesquisa geomorfológica de Ab´Saber (1969).

4.2 Arranjo Metodológico e Obtenção de dados

As sistematizações das etapas de trabalho requereram um arranjo de metodologias que se interpõe para uma análise qualitativa do meio e quantitativo na busca da verificação de padrões de modificação hidráulica na elaboração de um modelo de instabilidade da vertente para esses Latossolos. Segue a **Tabela 3** com a delimitação de todas as etapas da pesquisa descritas acima, bem como a descrição das etapas de levantamento de dados para atendimento aos três níveis de abordagem geomorfológica proposta por Ab´Saber (1969).

Tabela 3 – Etapas de execução da pesquisa.



4.2.1 Susceptibilidade a movimento de massa

Com base nos recorrentes episódios de instabilidade associados a movimentos de massa nos eventos de altos índices pluviométricos recorrentes no sítio urbano de Santa Teresa, foi definida uma previsão a instabilidade das encostas por meio de modelos com bases físicas e naturais, os quais requerem dados confiáveis, de modo que o produto final represente com maior acurácia a realidade. O propósito disso é de identificar os possíveis fatores que desencadeiam os movimentos de massa na sede do município, no âmbito regional para definir o desenvolvimento posterior da pesquisa em escala de detalhe, no presente caso, uma vertente.

Esta etapa de avaliação da susceptibilidade a movimento de massa, seguiu a base metodológica do primeiro nível do estudo tripartite de Ab'Saber (1969), atendendo-se ao entendimento, caracterização e descrição da compartimentação da topografia para a melhor aproximação das formas do relevo e de sua relação quanto a atuação dos processos destrutivos naturais. Para isso, utilizou-se a álgebra de mapas, atribuindo pesos com a calculadora ráster em ambiente de SIG e validação de campo. Os dados utilizados foram: curva de nível, cursos d'água, limite municipal e limite de bairros do Geobases (2010) e ortofotomosaico do IEMA (2012-2015).

A sistematização dos resultados com base numa problemática que apresenta diversas variáveis possui a capacidade de avaliar fatores qualitativos e quantitativos, sejam eles tangíveis ou intangíveis. O uso da álgebra de mapas é indicado para problemas que envolvem a priorização de soluções potenciais através da avaliação de um conjunto de critério, resultando na avaliação segundo o objetivo de análise.

Dessa forma, foram geradas as cartas de amplitude topográfica, inclinação e densidade de drenagem de caracterização topográfica com a finalidade de estabelecer uma análise de multicritério. Apesar da base de cursos d'água do Geobases IEMA (2010) não ser significativa, pois permite avaliar somente seus cursos principais, não abrangendo a totalidade para gerar o dado de densidade de drenagem, foi possível avaliar os possíveis eventos que podem ocorrer na área de abordagem natural de sua paisagem. Esta técnica foi desenvolvida no software ArcGis 10.4 utilizando a calculadora raster e obtendo a seguinte **equação 2**:

**Equação 2 - Fórmula da Calculadora Raster com base na álgebra de mapas.
Fórmula Calculadora Raster - Análise Hierárquica de Processos**

$$\frac{\text{Amplitude Topográfica} \times 1 + \text{Densidade de Drenagem} \times 3 + \text{Inclinação} \times 5}{3}$$

Este foi quantificado com a ferramenta do *Spatial Analyst* na opção *Raster Calculator*, utilizando os valores e pesos descritos na fórmula acima, para posteriormente reclassificá-las, gerando cinco tipos de susceptibilidade delineados em seus resultados.

4.2.2 Localização da vertente de estudo, dos perfis de GPR e coleta de amostras

Após a análise, em escala regional, da susceptibilidade a movimento de massa no sítio urbano de Santa Teresa, a pesquisa seguiu com diversos levantamentos de campo. Dois foram efetuados no ano de 2014, nos meses de outubro e novembro, para validação das áreas geradas no modelo de susceptibilidade a movimento de massa e escolha da área atuante. Esses levantamentos foram efetuados com o apoio da defesa civil do município de Santa Teresa. No decorrer do mês de junho de 2015, foram realizadas a coleta de amostras de solo e o levantamento geofísico com o GPR. Dessa forma, segue a **Figura 11** com a localização da vertente analisada, os perfis escolhidos para o imageamento do Georadar e o perfil onde foram coletadas as amostras.

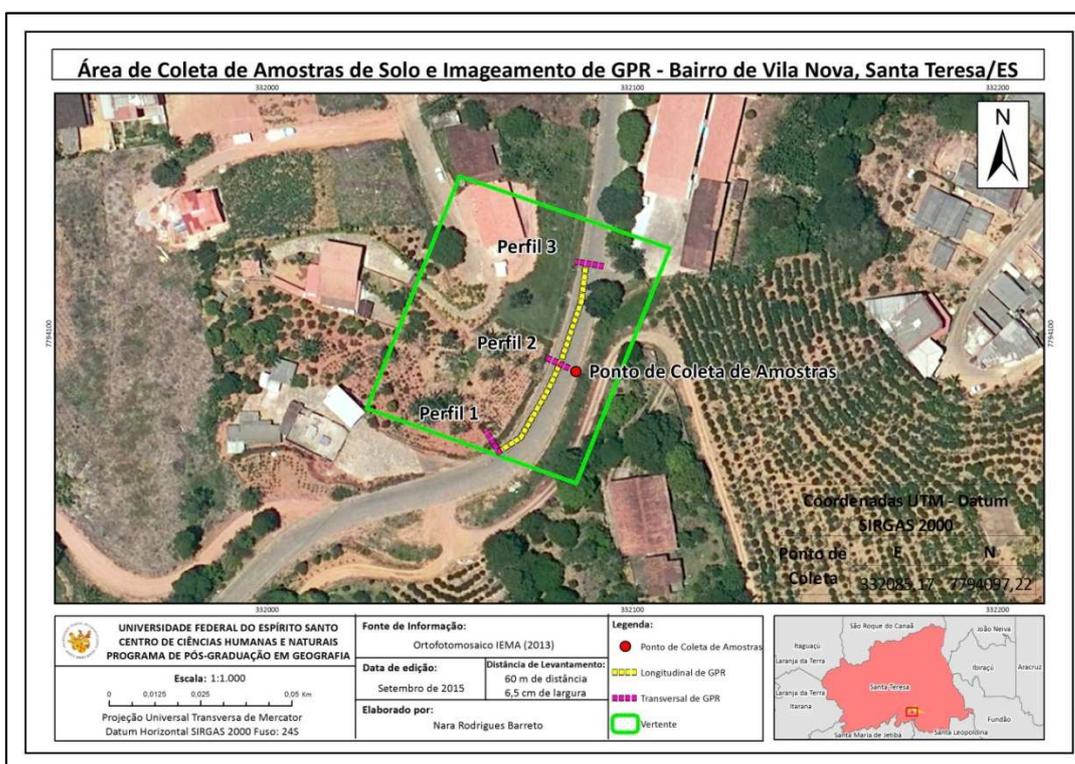


Figura 11 – Localização da área de Coleta das Amostras de Solo e Imageamento de GPR

4.2.3 Método de Ground Penetrating Radar (GPR) – Georadar.

De acordo com Souza (2005), as ferramentas utilizadas para as investigações geoambientais constituem em sondagens, amostragens e ensaios de campo, os quais permitem a identificação de diversas camadas do substrato, bem como o conhecimento das características do solo. Sendo assim, a utilização do GPR (Ground Penetrating Radar), técnica geofísica que produz informações sobre as propriedades físicas de subsuperfície, tanto em profundidade como em extensão lateral e vertical, as técnicas mais comumente empregadas, fornecendo informações de alta resolução de subsuperfície entre os pontos investigados.

O princípio físico do georadar consiste na emissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência no terreno por uma antena transmissora. A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas eletromagnéticas dependem da frequência da antena emissora e das propriedades dielétricas dos materiais, a exemplo da condutividade elétrica² (SOUZA, 2005). A condutividade elétrica dos materiais geológicos de superfície é afetada pelo teor de umidade, porosidade, proporção da fração argila, salinidade e presença de minerais condutivos (KELLER, 1987).

Além de a condutividade elétrica alterar a resposta do sinal eletromagnético do resultado obtido pelo georadar, a permissividade dielétrica³ e a permeabilidade magnética⁴ também entram para o grupo de fatores que controlam a condução do sinal eletromagnético, pois as propriedades eletromagnéticas dos materiais dependem de sua composição e umidade, os quais podem influenciar na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas e sua atenuação.

O GPR foi utilizado para a obtenção dos dados referentes à espessura e profundidade das camadas de solo, diferenças entre horizontes, localização de blocos em subsuperfície, descontinuidades do material e possíveis eixos preferenciais de concentração de água.

O levantamento geofísico consistiu no levantamento de quatro perfis de GPR no qual foi utilizado o equipamento GSSI, modelo SIR 3000. A aquisição dos dados foi realizada com antenas de 270 MHz. Os perfis foram levantados com as antenas em

²Habilidade do material em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987).

³Relação direta entre o campo elétrico e a corrente de deslocamento com a constante de proporcionalidade (SOUZA, 2005).

⁴Relaciona diretamente o campo magnético com a indução magnética e a constante de proporcionalidade (SOUZA, 2005).

movimento mantendo-se constante a distância entre elas (common offset), em que o sistema é transportado ao longo de uma direção obtendo-se um perfil das reflexões versus posição.

A Setup do radar consistiu em 15 m com valores de calibração em 309153, 311853 e 310933, com profundidade de 6 m, constante dielétrica de 8ϵ , com padrão de solo tipo 2 (argiloso úmido), frequência de pulso equivalente a 50 pulsos por metro e gain correspondente ao filtro de verberações e frequência do pulso no valor de zero.

O levantamento dos pontos foi previamente aplicada sob medições com trena para distância dos perfis, onde os perfis levantados possuem 60 m de distância e 6,5 m de profundidade sobre o corte na estrada do bairro de Vila Nova (**Figuras 12 e 13**)⁵. Foram geradas uma imagem de perfil longitudinal e três perfis transversais. O ponto zero, onde foi imageado o primeiro perfil transversal, se localiza a jusante do corte de análise, o segundo imageamento se situa no mesmo local de coleta de amostras em 30 m de distância e o último perfil, localiza-se nos 60 m. Todos os perfis possuem em sua proximidade postes de rede elétrica, onde a propagação do sinal pode ser afetada pela alta sensibilidade do radar na propagação das ondas eletromagnéticas, podendo ocorrer falhas na detecção do sinal. Essas situações são posteriormente contornadas no processamento e filtragens do radargrama.



Figura 12 – As linha vermelhas indicam os pontos de deformção do pavimento ao longo do qual foi efetuada a varredura com o GPR. Do lado direito da imagem o corte do talude em estudo.

⁵ Na imagem da figura 12, também representa a localização do perfil de coleta das amostras de solo.

O processamento dos dados objetivou melhorar a qualidade das imagens geradas em campo, visando aumentar precisão e acurácia dos registros e obter maior correspondência com a realidade. A edição compreendeu o tratamento do radargrama com a organização, correção dos dados e posicionamento das linhas.

Manipulações fundamentais pelo software RADAN 7 foram aplicadas aos dados como a “Easy Processing” (Figura 14) com a correção do tempo zero aplicado sobre o afastamento entre a antena receptora e a transmissora; o background removal faz a correção de indução das antenas calculando a média de amplitude das antenas em uma janela de tempo, subtraindo pela média dos traços originais; o teste e aplicação de filtro para tratamento da imagem; a migração que permite uma reposição das reflexões no perfil de GPR para sua real posição espacial; e a conversão de leitura máxima em profundidade do sinal (NETO, 2006).



Figura 13 – Levantamento geofísico na estrada (estrada vicinal para o distrito de Aparecidinha).

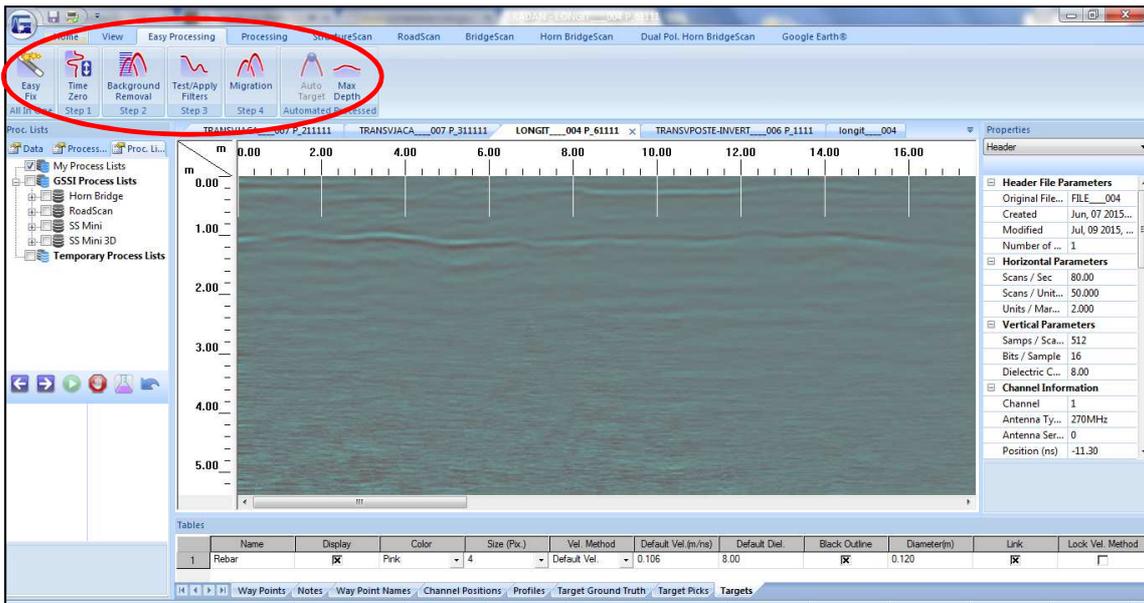


Figura 14 – Processamento básico do “Easy Processing” no software RADAN 7.

O processamento avançado no “Processing” (Figura 15), como o ganho de valor três foi utilizado para corrigir os efeitos da perda de amplitude e o balanceamento espectral que são afetados pelos efeitos de propagação; e o processamento da deconvolução que faz a correção dos níveis de ruídos presentes na imagem, realçando as descontinuidades concordantes do material (NETO, op. cit).

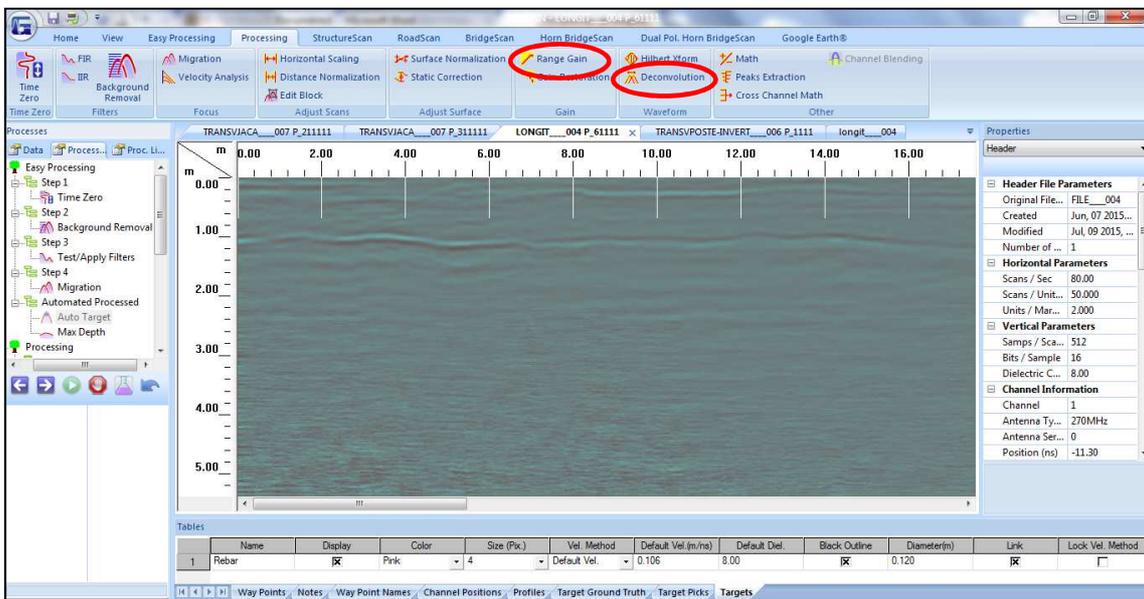


Figura 15 – Processamento avançado do “Processing” no software RADAN 7.

4.2.4 Coleta de Amostras, Morfologia e Análises do Solo

As etapas de execução da descrição da morfologia do solo e coleta de amostras, todas as etapas foram amparadas por Santos et al. (2015).

4.2.4.1 Coleta de Amostras

A escolha do perfil do solo foi arbitrária por verificação de campo, com base na identificação da reconfiguração da morfologia da área causada pelo corte ocorrido, situada em categoria geomorfológica de morro. O local de coleta das amostras de solo (**Figura 16**) se insere no limite do terço inferior com o médio da vertente, a montante do corte de estrada no bairro Vila Nova, na estrada vicinal de Rio Bonito, com referência a 100 m após o cemitério do município e localização de acordo com o sistema de referência UTM SIRGAS 2000 nas coordenadas E: 332085,17 e N: 7794097,22.

As amostras de solo foram coletadas sobre a vertente de corte de estrada, no terço médio da vertente de elevação superior, a 15% de inclinação, sob vegetação nativa, com aproximadamente 700 m de altitude. Amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos nas profundidades de 20, 40, 100 e 280 cm, respectivamente, nos horizontes Ap, Bw1, Bw2 e C para determinação da macro, micro e porosidade total, determinação de parte da curva de retenção da água no solo para as pressões de 6 e 10 kPa e para determinação da densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica saturada. Amostras deformadas (**Figura 17**) foram coletadas nas mesmas profundidades para a determinação de densidade de partículas (Dp), da umidade nas tensões de 30, 300 e 1500 kPa, análise granulométrica, análise química e descrição e classificação do solo. Os procedimentos de física e química foram executados no Laboratório de Física e Fertilidade dos Solos da Universidade Federal de Viçosa e as análises de mineralogia e morfologia do solo foram executadas no Laboratório de Geografia Física da Universidade Federal do Espírito Santo. Todas as amostras de solo foram coletadas em corte de estrada a profundidades de 20, 40, 100 e 280 cm, correspondentes aos horizontes Ap, Bw1 e Bw2 e C, respectivamente.



Figura 16 – Perfil do Latossolo e local de coleta das amostras deformadas e indeformadas.



Figura 17 – Amostras deformadas coletadas em campo.

4.2.4.2 Descrição Morfológica e Classificação do Solo

A descrição morfológica do solo seguiu os procedimentos de Santos et al. (2015). Em campo foram identificados os horizontes e descritos as profundidades, o tamanho e a forma dos agregados pedológicos, consistência seca, úmida e molhada, transição entre horizontes e enraizamento. Nas amostras deformadas (**Figura 17**), foram descritas a cor seca e úmida (Munsell) e a textura. Areia grossa e areia fina foram separadas por peneiramento, utilizadas peneiras de 2 mm, 0,2 mm e 0,053 mm, e descrita a mineralogia com aumento de 20 vezes. A caracterização genérica do perfil foi obtida de literatura específica com informações gerais de fases da vegetação; relevo; localização e coordenadas; situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil; elevação; litologia; formação geológica e período; material originário; pedregosidade; rochosidade; relevo local; relevo regional; erosão; drenagem; vegetação primária; uso atual e clima (SANTOS et al., 2015). A classificação foi feita com base no SiBCS (2013), utilizando-se os dados de morfologia do solo em campo e em laboratório e dados oriundos da análise química do solo, descrita adiante.

4.2.4.3 Química do Solo

As análises químicas foram obtidas da terra fina seca ao ar de uma amostra do horizonte Bw2 e seguiram o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 1997). As análises para a determinação do pH em água e KCl 1 N foram obtidas eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo e líquido (água, KCl). Também foram determinadas as concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e P, Na e K foram extraídos com solução de Mehlich-1, sendo o P dosado por colorimetria e o K e Na por fotometria, e a acidez potencial foi determinada por titulação com NaOH (0,025 mol L^{-1}) da extração de acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1} tamponado a pH 7,0. Os teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 foram determinados pelo ataque sulfúrico.

A atividade da argila do solo, que objetiva a identificação de argila de atividade baixa (Tb) e argila de atividade alta (Ta), foi calculada pela $\text{CTC} \times 1000/\text{argila total (g/kg)}$. O índice de íntemperismo (ki) do solo foi gerado pela relação molecular ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) x 1,7.

4.2.4.4 Análise Mineralógica

Amostras de cada horizonte do solo, nas profundidades de 20, 40, 100 e 280 cm (respectivamente, dos horizontes Ap, Bw₁, Bw₂ e C), tiveram a fração grosseira (cascalhos), a areia grossa e a areia fina separadas por peneiramento, utilizando-se peneiras com malhas referentes a 2, 0,2 e 0,053 mm. Em cada fração, a caracterização mineralógica das espécies minerais, litofragmentos e concreções foram feitas com auxílio de microscópio estereoscópio (lupa de 20 vezes de aproximação). Após agitação e homogeneização, uma porção de cada amostra foi colocada em placa de petri, utilizado imã para afastar para um dos quadrantes concreções e minerais magnéticos (SANTOS et al., 2015).

A estimativa percentual visual semiquantitativa foi efetuada por meio de fracionamento da amostra, com auxílio de uma espátula, e a seleção por análise de fração com quadrantes de referência para a determinação percentual aproximada dos constituintes mineralógicos (SANTOS et al., 2015).

4.2.5 Análises Físicas do Solo

Segue abaixo as etapas de execução das técnicas de física dos solos, todas amparadas por EMBRAPA (1997) e Ruiz (2004):

4.2.5.1 Análise Granulométrica

Das amostras de cada horizonte do solo, Ap a 20 cm, Bw₁ a 40 cm, Bw₂ a 100 cm e C a 280 cm, 10 g da terra fina seca ao ar (TFSA), com aproximação 0,01 g, foram pesadas e utilizado o método da pipeta para a análise granulométrica (EMBRAPA, 1997) . As amostras foram submetidas à dispersão química, com NaOH 0,1 mol/L e 150 ml de água deionizada, e dispersão mecânica, com agitação lenta por 16 h a 50 rpm (RUIZ, 2005) em Agitador de Wagner sob dispersão total orbital. Os teores das frações granulométricas foram calculados conforme a **Equação 3**. Utilizou-se o critério de classificação do SiBCS (2013) para a definição das texturas de areia, silte e argila.

Equação 3 – Equações para determinar as frações granulométricas das amostras de solo.

$$\text{teor de argila} = [\text{argila (g)} + \text{dispersante (g)}] - \text{dispersante (g)} \times 500$$

$$\text{teor de areia fina} = \text{areia fina (g)} \times 10$$

$$\text{teor de areia grossa} = [\text{areia fina (g)} + \text{areia grossa (g)}] - \text{areia fina} \times 10$$

$$\text{teor de silte} = 500 - [\text{argila (g)} + \text{areia fina (g)} + \text{areia grossa (g)}]$$

4.2.5.2 Argila Dispersa em Água (ADA)

Das amostras de cada horizonte do solo, Ap a 20 cm, Bw₁ a 40 cm, Bw₂ a 100 cm e C a 280 cm, foi determinada a ADA, utilizando apenas água como dispersante, determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997), foram pesados 10 g de TFSA, com aproximação de 0,01 g submetida à dispersão mecânica lenta por 16 h a 50 rpm (RUIZ, 2005) em Agitador de Wagner para a execução da análise granulométrica sob dispersão total (orbital). A pesagem da argila foi obtida após secagem em estufa e pesada com aproximação 0,0001 g.

4.2.5.3 Relação Silte e Argila

Para indicar o grau de intemperismo do solo e permitir avaliar se há movimentação de argila no perfil (EMBRAPA, 1997), foi determinada a relação silte/argila. O cálculo (**Equação 4**) foi definido com base na divisão valores totais de silte e argila obtidos na análise granulométrica de cada horizonte de amostrado.

Equação 4 – Equação para determinar a Relação de Silte e Argila nos horizontes estudados.

Teor de silte

Teor de argila

4.2.5.4 Densidade do Solo (Ds) e Densidade de Partículas (Dp)

A Ds correspondente à massa indeformada de solo seco por unidade de volume, incluindo, portanto, o espaço poroso, foi determinado pelo método do anel volumétrico EMBRAPA (1997) em amostras indeformadas coletadas em anel cilíndrico nas profundidades estudadas, conforme a **Equação 5**:

Equação 5 – Equação para determinar a Densidade do Solo.

$$D_s = \frac{MSolo}{VT} = \frac{4[M(R + Solo) - M(R)]}{\pi d^2 L}$$

Sendo,

MSolo = Massa do solo seco

VT = Volume total do cilindro

M (R + Solo) = Massa do solo igual ao peso do recipiente mais o peso do solo seco.

M (R) = Massa do recipiente

d = Diâmetro do cilindro

L = Altura do cilindro

A D_p expressa a massa por unidade de volume de partículas de solo seco, considerando somente o espaço ocupado pela matéria sólida do solo, independente da estrutura e compactação, foi determinada pelo método do balão volumétrico (Embrapa, 1997; Ruiz, 2004) em amostras indeformadas coletadas em anel cilíndrico em profundidades estudadas (**Equação 6**):

Equação 6 – Equação para determinar a Densidade de partículas.

$$D_p = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_b - V_g}$$

Sendo,

M_s = Massa do solo

V_s = volume das partículas de solo (cm³)

V_b = volume do balão

V_g = volume total de álcool gasto

4.2.5.5 Macroporosidade, Microporosidade e Porosidade Total

Microporosidade (< 0,005 mm), macroporosidade (> 0,05 mm) e porosidade total foram determinadas pelo método da Mesa de Tensão (Embrapa, 1997; Ruiz, 2004) em amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos nos horizontes estudados (**Figura 18**).



Figura 18 – Coleta de amostra indeformada em anel volumétrico.

Em relação à microporosidade, refere-se aos pequenos poros com fração inferior a 0,005 mm, que permanecem preenchidos com água em uma amostra de solo, após saturação e posterior submissão a tensão equivalente a 60 cm de coluna de água. Para a análise da microporosidade, as amostras indeformadas em anéis volumétricos foram saturadas, colocadas em mesa de tensão, tendo as amostras sido submetidas a tensões equivalentes a 60 cm de coluna d'água. Após 48 h, as amostras foram retiradas e transferida a totalidade da amostra úmida para recipiente com tampa, previamente tarado. O conjunto foi pesado com aproximação de 0,01 g e levado à estufa a 100-105 ° C por 48 h. Por fim, retirou-se o conjunto, colocado em dessecador e após alcance da temperatura ambiente, foram pesados com aproximação de 0,01 g. Segue o cálculo (**Equação 7**) utilizado para definir os microporos na amostra de solo:

Equação 7 – Equação para determinar a microporosidade do solo.

$$P_{micro} = \frac{V_{\text{água (60 cm)}}}{1V_t} = \frac{M(R + \text{solo} + \text{água}) - M(R + \text{solo})}{D_{\text{água}} \cdot 4/\pi d^2 L}$$

Sendo,

P_{micro} = Microporosidade

$V_{\text{água}}$ = Volume de água

V_t = Volume total

$M(R + \text{solo} + \text{água})$ = Massa do cilindro mais solo mais água

$M(R + \text{solo})$ = Massa do cilindro mais solo seco em estufa

$D_{\text{água}}$ = Densidade da água

d = Diâmetro do cilindro

L = Altura do cilindro

Utilizou-se os dados de D_s e D_p para determinar a porosidade total, definida pela **Equação 8**:

Equação 8 - Equação para determinar a Porosidade Total.

$$P_{total} = \frac{V_{poros}}{VT} = \frac{1 - D_s}{D_p}$$

Sendo,

P_{total} = porosidade total

Vporos = Volume de poros

VT = Volume total

Ds = Densidade do solo

Dp = Densidade de partículas

A Pmacro foi determinada conforme a **Equação 9**:

Equação 9 - Equação para determinar a Macroporosidade

$$P \text{ macro} = P \text{ total} - P \text{ micro}$$

4.2.5.6 Retenção da água do solo

As curvas características da água do solo em diferentes potenciais matriciais foram construídas para as profundidades avaliadas em mesa de tensão, com amostras indeformadas em anel volumétrico, utilizando pressões de 6 kPa, e em extrator de Richards, utilizando tensões de 10, 30, 300 e 1500 kPa em amostras deformadas.

A aplicação da curva de retenção da água (EMBRAPA, 1997) pretendeu verificar o comportamento da água no solo sobre diferentes potenciais matriciais, buscando a presença de zonas de descontinuidade hidráulica. No caso dos Latossolos teve a capacidade de campo (CC), estimada na faixa de - 6 kPa (RUIZ et al., 2003). Seguem os cálculos para o estabelecimento dos valores (**Equação 10**):

Equação 10 – Determinação da retenção de água no solo.

$$U = \frac{M(R+Solo+Água) - M}{M(R+Solo) - MR} = \frac{M_{Água}}{M_{Solo}}$$

$$\theta = U \frac{Ds}{D_{Água}}$$

$$H \text{ (cm } \acute{A}\text{gua} \sim 10 \text{ (kPa)}$$

$$pF = \log [H] = \log \tau$$

U = umidade

M = massa

R = recipiente (anel volumétrico)

MR = massa do recipiente (anel volumétrico)

θ = umidade residual

D_s = densidade do solo

$D'_{\text{água}}$ = densidade da água

H = altura da coluna em cm

pF = força da pressão

Os ensaios resultaram em pontos de pressão versus umidade (plotados em planilha Excel), ajustados pelo modelo de equação de van Genuchten (1980), **Equação 11**.

Equação 11 – Equação de van Genuchten (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_r - \theta_s)}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

θ = Quantidade de água retida

θ_r = umidade residual

θ_s = umidade do solo

ah = altura

Foi utilizado o programa SRWC, versão 3.0, Piracicaba, SP, 18 de maio de 2001 (Desenvolvido por Durval Dourado-Neto da ESALQ USP, Donald R. Nielsen, da University of California, Jan W. Hopmans da University of California, Klaus Reichards Rda ESALQ USP). Aos pontos foram acrescidos o conteúdo de água no estado de referência de cada potencial. Sendo, para o potencial zero (**Equação 12**):

Equação 12 – Equação para representação gráfica dos diferentes pontos experimentais.

$$\theta_{\Psi = 0} = P_{\text{total}} = 1 - \frac{D_s}{D_p}$$

θ = Quantidade de água retida

(ψ_m) = Potencial matricial zero

P_{total} = porosidade total

D_s = Densidade do solo

D_p = Densidade de partículas

4.2.5.7 Condutividade Hidráulica

A análise foi realizada com permeâmetro de carga constante (**Figura 19**), em amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos em cada horizonte amostrado nas seguintes etapas (Embrapa, 1997; Ruiz, 2004):

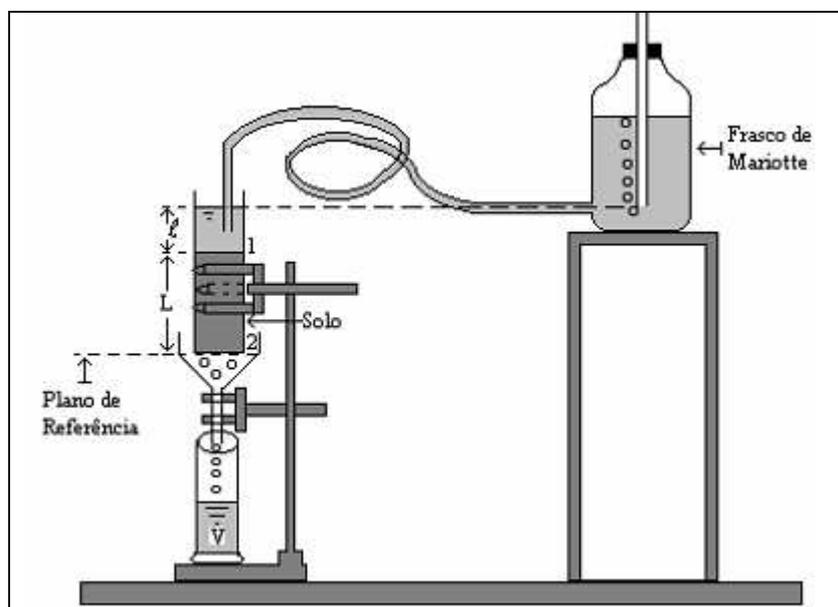


Figura 19 - Permeâmetro de coluna vertical e carga constante. (Fonte: Ferreira, 2002). Sendo, V o volume de água coletado na proveta, 1 o anel volumétrico vazio, 2 o anel volumétrico com a amostra de solo e L altura do anel volumétrico 2 e l a coluna d'água de 3 cm sobre a amostra de solo indeformada correspondente ao anel volumétrico 2.

- Cobriu-se uma das extremidades da amostra indeformada de solo do anel cilíndrico com uma peça circular de pano, este voltado para baixo e saturou-se a amostra de baixo para cima com água por um período de 48 horas.
- Conectou-se o cilindro vazio adicional na outra extremidade por meio de uma fita adesiva à prova d'água.
- Colocou-se o cilindro 2 com a amostra indeformada de solo previamente saturada, sobre um funil sobre uma proveta. Uma fina camada de algodão foi acrescentada sobre a amostra indeformada de solo do cilindro 2, e vagarosamente colocou-se uma lâmina d'água de 3 cm (l) água no cilindro superior.

A condutividade hidráulica saturada foi calculada pela **Equação 13**:

Equação 13 – Equação da condutividade hidráulica.

$$K_{sat} = - \frac{q}{i}$$

em que q é o fluxo (cm/s) e i, o gradiente hidráulico (cm/cm).

Fluxo e gradiente hidráulicos foram calculados utilizando-se as expressões (**Equação 14**):

Equação 14 – Equação de fluxo e gradiente hidráulicos.

$$q = \frac{V}{At} = \frac{4V}{\pi d^2 t}$$

em que na **Equação 15**, A é a área transversal da coluna de solo (cm²) de diâmetro d (cm), l é a lâmina de 3 cm de água e L.

Equação 15 – Equação da área e diâmetro da coluna do solo.

$$i = \left(\frac{l+L}{L}\right) = -\left(\frac{l}{L} + 1\right)$$

A K_{sat} foi calculada (**Equação 16**) nas condições de temperatura ambiente e a 20°C/20°C (K₀) pela expressão:

Equação 16 – Equação da K_{sat} sobre ação da temperatura em 20°C.

$$K_0 = K_{sat} \frac{\eta_c}{\eta_{20}}$$

η_c e η_{20} são a viscosidade dinâmica da água na temperatura ambiente e a 20°C, respectivamente.

4.2.5.7.1 Técnica do permeâmetro de carga constante

Segundo Libardi (2005), as técnicas de determinação direta da condutividade hidráulica dos solos podem ser classificadas como técnicas de campo ou laboratório. Nas técnicas de laboratório, podem ser utilizadas amostras com estrutura deformada ou indeformada. Nas técnicas efetuadas em campo, a perturbação do solo deve ser a mínima possível. Além disso, existem outras técnicas que alguns pesquisadores apresentam dificuldades de mensuração de K. Por isso, estes têm procurado calculá-la teoricamente, a partir de outras propriedades do meio poroso de mais fácil medida.

As técnicas de laboratório são divididas em condição de saturação e não saturação. Neste caso, as medidas são executadas por meio de aparelhos simples, denominados permeâmetros.

Para Libardi (2005), a utilização do permeâmetro de carga constante em solo saturado é mais adequada para amostras de solos com estrutura indeformada, cujos valores de K_0 sejam maiores que $2 \times 10^{-3} \text{ mm s}^{-1}$.

Para a determinação de K, Marques et al. (2008) aborda que existem uma grande variedade de técnicas, com diferentes níveis de precisão; alguns aplicáveis apenas em determinadas condições ou com certos objetivos. As taxas de K apresentam uma grande variabilidade, conforme Vieira et al. (1981); Bouma et al. (1989) e Teixeira (2001). Esses trabalhos, em síntese, levam a concluir que a propriedade hídrica do solo medida sob condição de saturação como a condutividade hidráulica e a sua alta mobilidade de resultados deve prescindir de um estudo de técnica.

Com o amparo da leitura realizada, os estudos apresentam entre as técnicas de carga constante (laboratório) e permeâmetro de guelph (campo) como os mais recorrentes, e assim foram realizados estudos comparativos para testar a veracidade e variabilidade dos dados (MOHANTY et al., 1994).

Ao comparar ambas as técnicas de campo e laboratório descritos acima, Vieira (2001) mostra as vantagens e desvantagens das duas técnicas. A vantagem de execução do permeâmetro de carga constante é pela execução simples e rápida; outras medições podem ser feitas na mesma amostra (ex: porosidade); facilita a aplicação de análises computacionais devido a simplicidade das condições de limite. No entanto, suas desvantagens se baseiam nas perturbações nas amostras, que podem alterar o valor de K; a dificuldade de se verificar estruturas no solo de grandes dimensões (ex: raízes e feições reliquiaais); os valores de K podem ser superestimados ou subestimados dependendo da escala de mensuração (ex: efeito dos macroporos); muito lento e cuidados específicos devem ser tomados as amostras (ex: água esterilizada para evitar bactérias).

Vieira (2001) também mostra às vantagens da técnica do permeâmetro de Gelph, que são a simultaneidade de medição de outros parâmetros hidráulicos (ex:sorptividade); permite medidas em grandes profundidades; baixo custo, portátil e utiliza pouca água; pode ser operado por uma única pessoa; requer pouco tempo para medição; causa perturbações mínimas no solo; permite várias opções de análise e mede permeabilidades entre 10^{-2} e 10^{-8} cm/s. Porém, suas desvantagens se baseiam em condição de um meio poroso muito heterogêneo pode-se encontrar valores irreais; medidas pontuais e pode subestimar os valores de K de acordo com a textura do solo (propriedades físicas) e a umidade antecedente devido à impermeabilização do furo durante a tradagem.

Ao se comparar os resultados expostos acima por Vieira (2001), a escolha do permeâmetro de carga constante foi amparada para além da sua facilidade de execução,

foi devido a alteração das taxas de K estarem associadas às propriedades físicas do solo e posição do relevo do que nas alterações das coberturas vegetais. Tendo, o permeâmetro de carga constante a técnica mais apropriada para a classe dos Latossolos estudados e com maior confiabilidade nas propriedades físicas dos solos (ex: textura e estrutura), apresentando os menores coeficientes de variação e desvio padrão (MARQUES et al., 2008).

Além de Vieira (2001) expor a não leitura da macroporosidade e umidade do solo com o permeâmetro de Gelp. Reynolds e Elrick (1986), Philip (1985), Amoozegar (1989), entre outros, também abordam que um dos resultados negativos do Gelp por conta da heterogeneidade ou macroporosidade no meio poroso, resultando em características de fluxo diferentes, entre um e outro estágio de medição.

Ainda assim, a técnica escolhida apresenta como maior empecilho às perturbações que podem ser feitas ao se retirar a amostra, no entanto feito os estudos de Lee et al. (1985); Bagarello e Provenzano (1996); Soto (1999); mostraram que o permeâmetro Gelp reproduz valores estatisticamente iguais ao permeâmetro de entrada de ar (in situ) e de carga constante (laboratório).

Contudo, executados em laboratório ou em campo, os procedimentos apresentam vantagens e desvantagens, que devem ser conhecidas quando da escolha da técnica a ser utilizada, levando em consideração o objetivo da análise proposta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, inicialmente será apresentado e analisado o modelo de susceptibilidade a movimento de massa no sítio urbano de Santa Teresa (5.1). No item 5.2 serão avaliados os resultados do levantamento geofísico na vertente de estudo, em um perfil longitudinal e três perfis transversais. Posteriormente, será caracterizada a morfologia do solo diante dos dados de levantamento de campo (5.3) e, por fim, a análise dos dados de K_{sat} , os quais serão correlacionados com os parâmetros de física dos solos (5.4), para discutir a variabilidade de K_{sat} em relação à estabilidade máxima da vertente, buscando compreender os fatores controladores da estabilidade máxima da encosta avaliada.

5.1 Susceptibilidade a Movimento de Massa

O município de Santa Teresa apresenta condições climáticas com intensas chuvas de verão e geomorfologia de grandes maciços montanhosos, tornando-se muito susceptível à ruptura de estabilidade. Fatores que evidenciam a importância da compreensão dos processos controladores dos movimentos de massa e de planejamento do uso da terra, necessário para avaliar a estabilidade natural das encostas.

A susceptibilidade foi estabelecida na sede do município de Santa Teresa a partir das características morfométricas, associadas à rede de drenagem e curvas de nível de 10 m para elaboração de cartas de amplitude topográfica, inclinação e densidade de drenagem (**Figuras 20, 21, 22 e 23**), para posteriormente modelar estes dados gerados em uma análise de multicritério.

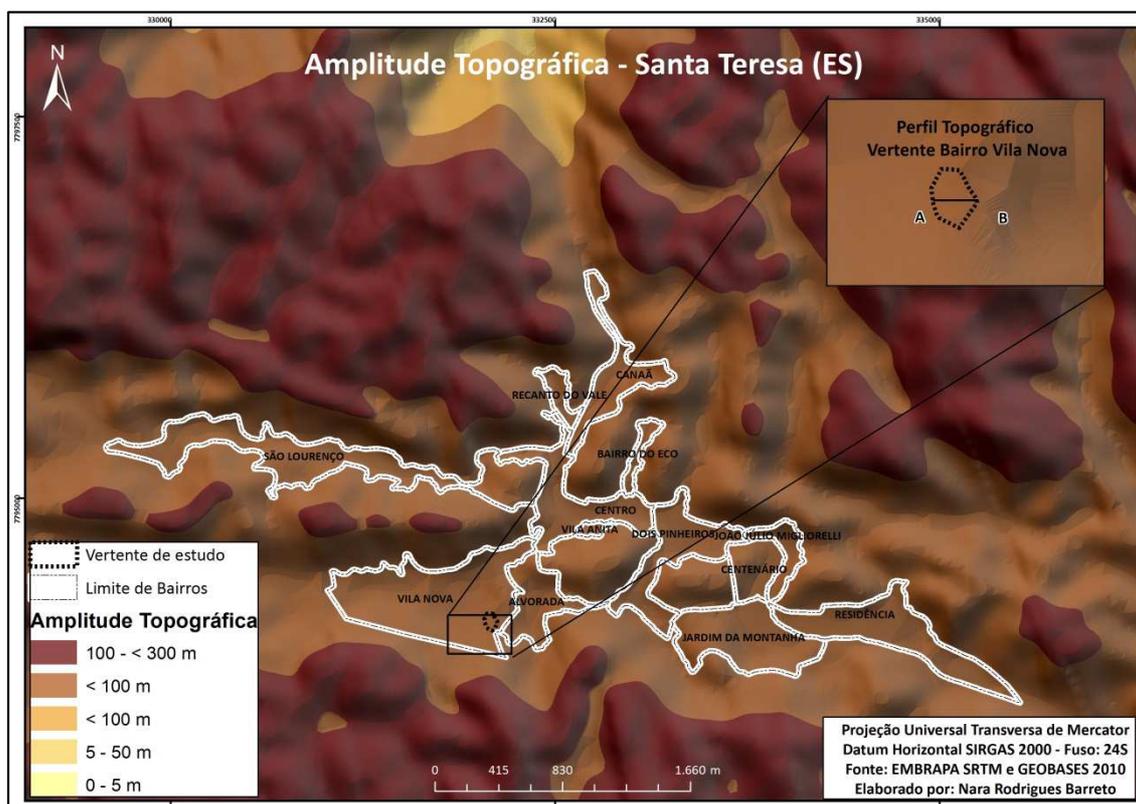


Figura 20 – Amplitude topográfica da sede de Santa Teresa e foco para o perfil da vertente do Bairro Vila Nova.

Figura 21 – Amplitude topográfica do terço inferior da vertente de estudo.

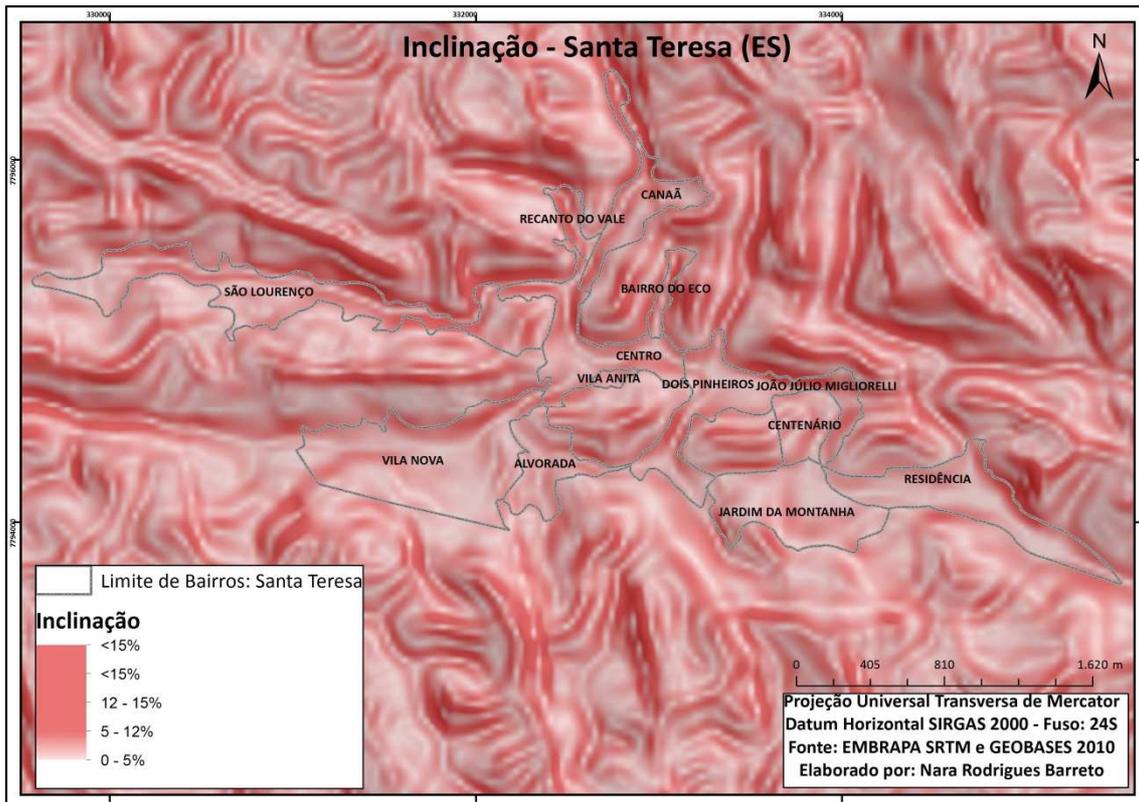
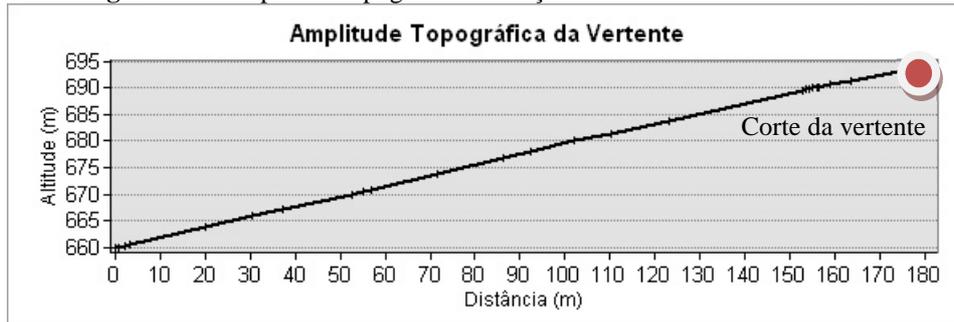


Figura 22 – Inclinação da sede de Santa Teresa.

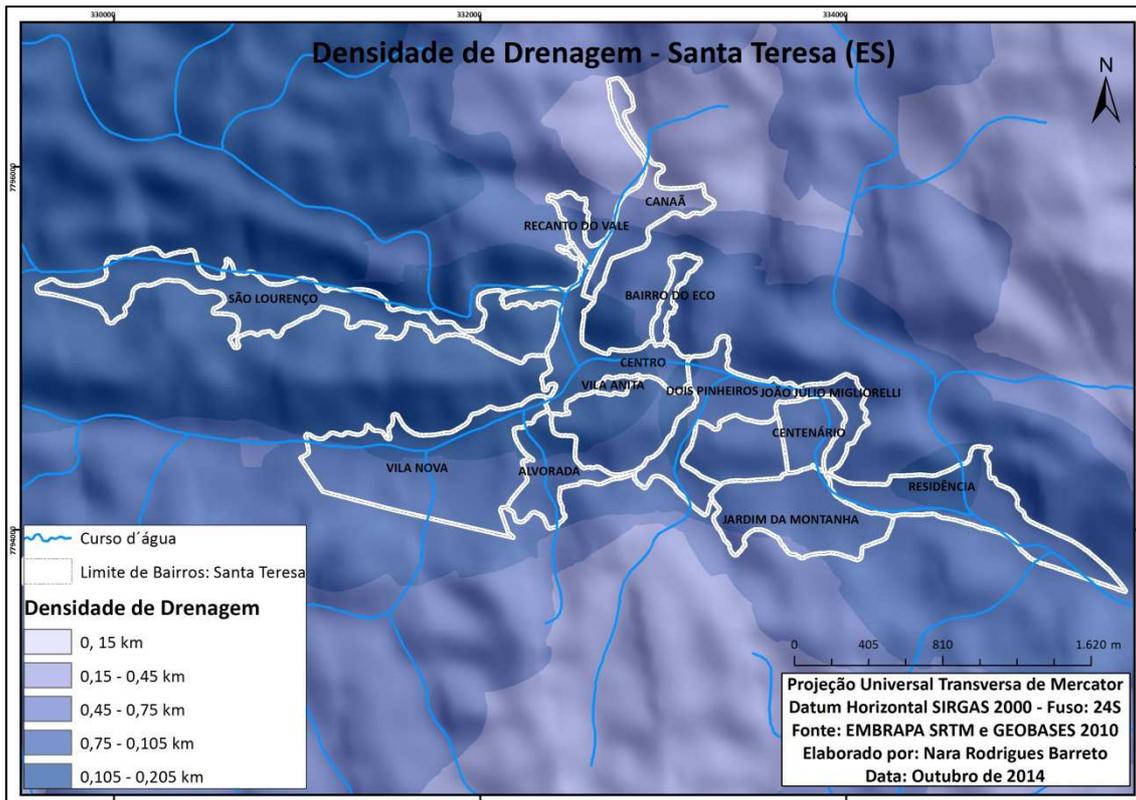


Figura 23 – Densidade de Drenagem da sede de Santa Teresa.

Ao avaliar os mapas base gerados para modelagem e detalhadamente para a vertente do bairro de Vila Nova, é identificada como um perfil topográfico côncavo-convexo, com amplitude topográfica acima de 100 m de altitude (**Figura 20**), inclinação atingindo valores superiores a 15% (**Figura 22**) e densidade de drenagem de 0,75 a 0,205 km (**Figura 23**). Mesmo que a vertente de análise não se insira nas inclinações e altitudes mais elevadas em relação à sede do município, esta já apresentou episódios de instabilidade associados a movimentos de massa nos cortes abruptos da vertente para a implantação de moradias. Ocorrem alguns indícios de instabilidade, como recalque na pista, trincas tampadas e creep.

A susceptibilidade foi estabelecida na sede do município de Santa Teresa a partir das características morfométricas (**Figura 24**), com a variação da amplitude topográfica e a inclinação na definição das unidades de feições morfológicas básicas (Ponçano et al, 1981), e a densidade de drenagem estabelecida na área em uma análise de multicritério, de acordo com a **Tabela 4**.

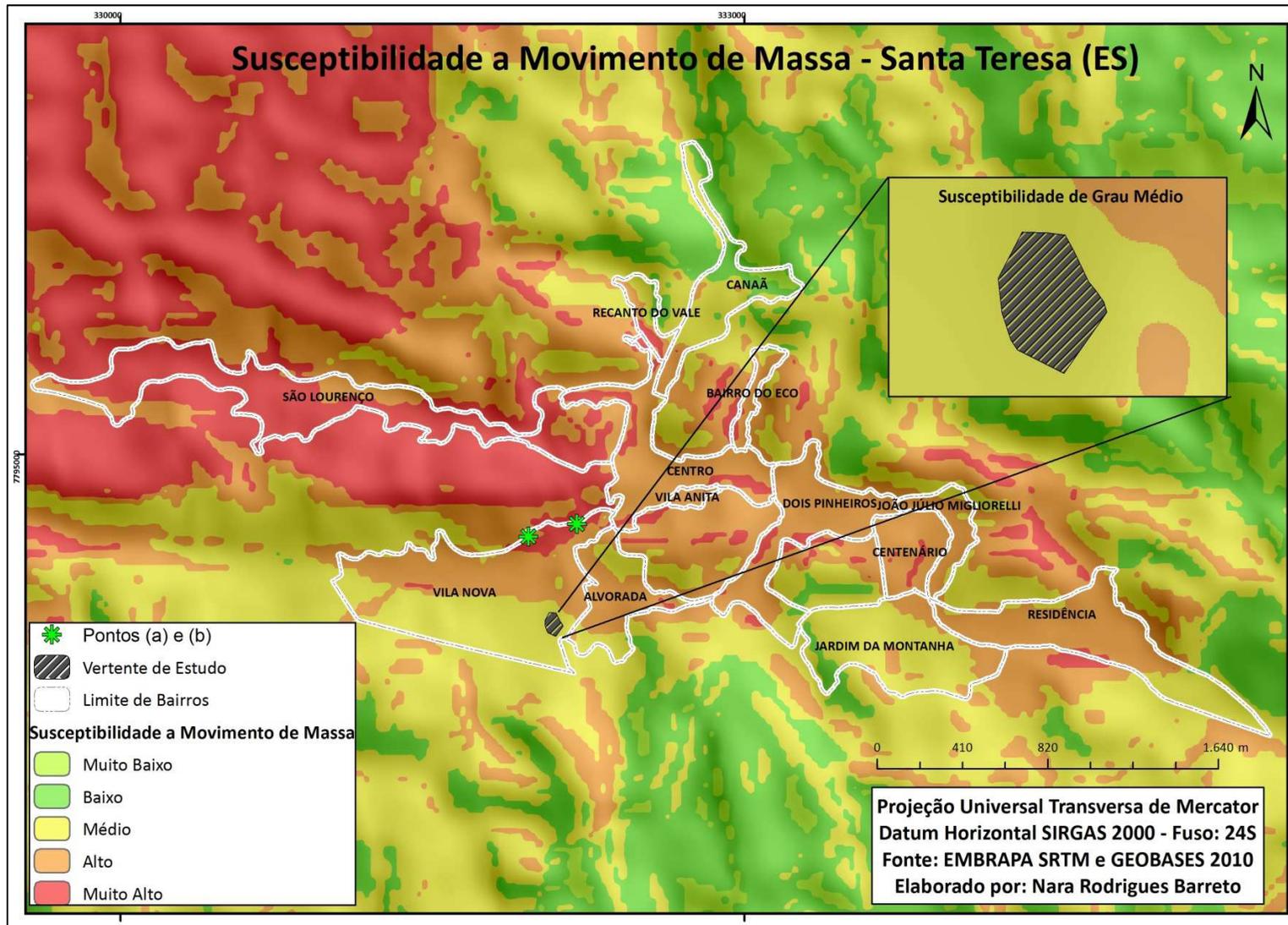


Figura 24 - Susceptibilidade a Movimento de Massa, os pontos (a) e (b) correspondem as figuras 25 (a) e (b).

Tabela 4 - Feições morfológicas, amplitude topográfica, inclinação e seu percentual registrado na área de estudo.

Susceptibilidade a Movimento de Massa	Feição Morfológica da sede de Santa Teresa	Amplitude Topográfica (m)	Densidade de Drenagem (km)	Inclinação (%)	Percentual registrado na sede (%)
Muito Baixa	Planície	0-5 m	0,15	0-5	13,8
Baixa	Rampa	5-50 m	0,15 - 0,45	05-12	23,3
Média	Colinas	<100 m	0,45 - 0,75	12-15	39,4
Alta	Morrote		0,75 - 0,105	> 15	13,4
Muito Alta	Morro	100-300 m	0,105 - 0,205		

Esta delimitação gerou cinco graus de susceptibilidade (**Tabela 4**), as pequenas porções de áreas de muito baixa susceptibilidade a movimentos de massa se encontram nas baixadas do modelado do relevo e elevações de até 5 m, sendo essas as mais apropriadas para ocupação urbana, levando-se em consideração os cursos d'água e seus efeitos no processo de inundações e alagamentos. Com feição morfológica caracterizada por planícies de amplitude topográfica entre 0 - 5 m, sua inclinação inferior a 5% e densidade de drenagem muito baixa com o valor de 0,15 km/km². As regiões de baixa susceptibilidade apresentam feições morfológicas caracterizadas por rampas com amplitude topográfica entre 5-50 m, inclinação de 5 a 12% e densidade de drenagem de 0,15 a 0,45 km.

A susceptibilidade de grau médio apresenta alguns locais próprios para ocupação com reservas, avaliando que grande parte da sede do município se encontra nessa condição, onde já há indícios de escorregamentos. Sua inclinação está entre 12 a 15%, sua feição morfológica é caracterizada por colinas baixas e densidade de drenagem correspondente a 0,45 a 0,75 km. A vertente de análise se encontra nesse grau de susceptibilidade, no entanto quando os parâmetros topográficos são avaliados juntamente a com o uso e ocupação da área, a vertente apresenta indícios de instabilidade decorrente às transformações urbanas que vem sofrendo, podendo possuir uma classificação mais elevada à susceptibilidade a movimento de massa.

A susceptibilidade de grau alto apresenta áreas em que o parcelamento do solo é vedado pelos altos condicionantes de instabilidade do terreno, no entanto se constata não ser essa a realidade da sede e adjacências do município. A ocupação nestas áreas é

verificada pela utilização de técnicas de cortes subverticais nas vertentes, potencializando áreas susceptíveis a movimentos de massa por tração. Apresenta amplitudes topográficas inferiores a 100 m, inclinação maior que 15% e densidade de drenagem entre 0,75 a 0,105 km.

Já a susceptibilidade de grau muito alto, verificada por feições de morros com densidade de drenagem entre 0,105 a 0,205 km, indicando maior condição de instabilidade, onde as ocupações estão sujeitas a eventos destrutivos de alto impacto. Apesar de a área apresentar a classe pedológica de Latossolo Vermelho-Amarelo, considerados estáveis em relação aos movimentos de massa, indicadores de escorregamento como trincas e degraus de abatimentos evidenciam a morfodinâmica atuante no local em associação ao relevo dissecado e intervenções antrópicas que afetam o fator de segurança das vertentes da área.

A partir do mapa gerado de susceptibilidade a movimentos de massa, é de extrema importância validar este produto em levantamento de campo para se obter a veracidade das informações até então geradas e apresentar suas discussões pertinentes. Sendo assim, o levantamento de campo na sede do município foi de extrema importância e coincidiu o modelo gerado, conforme as **Figuras 25 (a) e (b)** abaixo:



Figura 25 - Áreas susceptíveis a movimentos de massa – Bairro Vila Nova.

As **Figuras 25 (a) e (b)** mostraram registros de cicatrizes erosivas em áreas classificadas como susceptibilidade de grau muito alto, situada em encosta do bairro Vila Nova (localização verificada na **Figura 23**). A imagem (a) apresenta cicatrizes de escorregamento, em taludes de corte onde o material se acumulou sobre leito viário. A imagem (b) associa ocupações em área instáveis marcada por cicatrizes de escorregamentos, atestando a exposição dos imóveis a eventos potencialmente danosos e qualificando a área como de risco de desastre.

Segue abaixo o recorte espacial específico da vertente e seus principais processos (**Figura 26**). O esboço trás o terço superior, médio e inferior com sua geometria correspondente e suas características de material residual, vegetação e ocupação da área para o entendimento da susceptibilidade que a área apresenta.

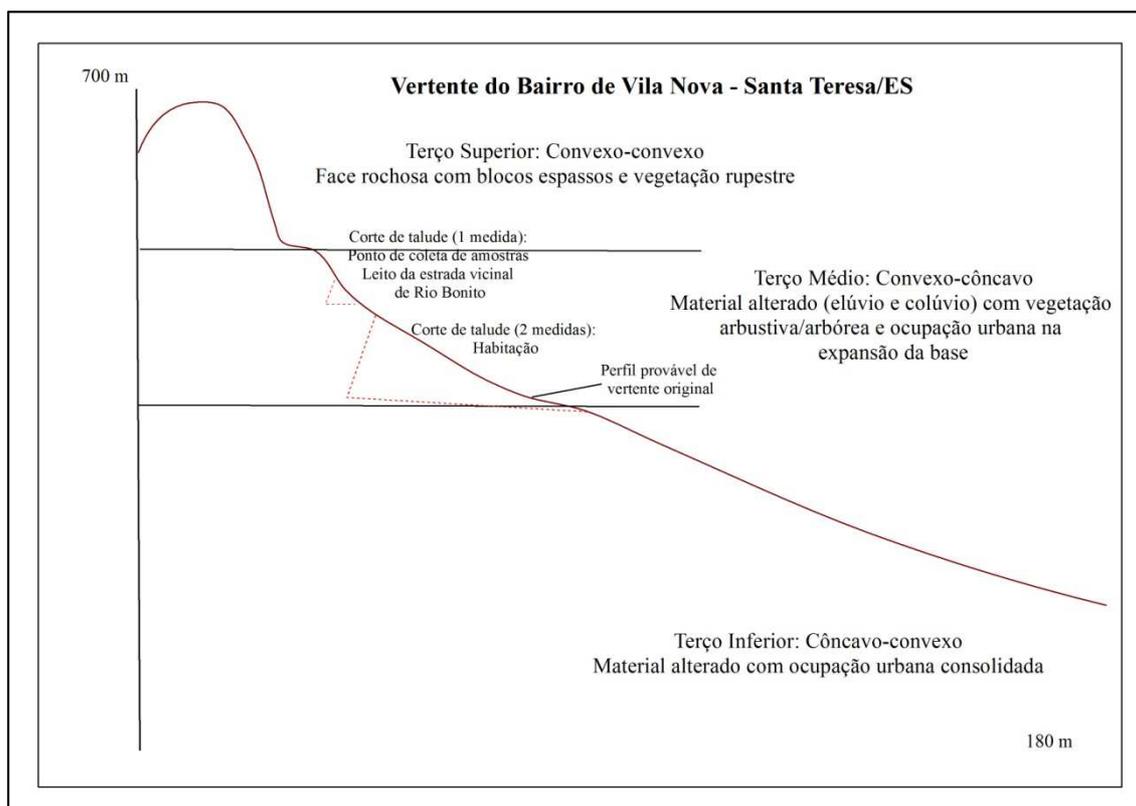


Figura 26 – Recorte espacial da vertente de Vila Nova.

Para avaliar com maior acurácia estes critérios da compartimentação topográfica por álgebra de mapas, é necessário analisar a estrutura superficial (Ab'Sáber, 1969), uma vez que os movimentos de massa estão associados ao material do terreno e a sua morfodinâmica, juntamente com a avaliação morfométrica analisada. Este capítulo

utilizou parâmetros eficazes para a predição de susceptibilidade do terreno, já que a inclinação e amplitude topográfica formam o contexto morfométrico relacionado às possíveis dinâmicas gravitacionais que a área apresenta, além de se relacionarem com a densidade de drenagem, parâmetro o qual segundo Horton (1945) destaca que além deste determinar o regime de chuvas e o relevo, também destaca a capacidade de infiltração do solo na exposição da área aos fluxos superficiais concentrados.

A susceptibilidade corresponde à possibilidade de ocorrer um evento de natureza destrutiva, na sede de Santa Teresa (ES), em que foram observadas inúmeras áreas propensas a movimentos de massa pelo seu contexto morfométrico. Apresenta áreas com cortes nas vertentes destituídas de técnica necessária, realizados para a construção de moradias com distância mínima e inexistente da vertente e com inclinações vedadas à ocupação. São obras que provocam alterações na forma original do terreno e estes se tornam sujeitos a movimentos de massa.

Diante do modelo apresentado, é indispensável analisar as outras etapas do estudo tripartite de Ab'Sáber (1989), pois os movimentos de massa estão interligados ao material do terreno e a sua fisiologia atuante, juntamente com a avaliação morfométrica analisada. Então, tais abordagens serão analisadas nas etapas seguintes.

5.2 Comportamento hidrológico de subsuperfície por GPR

Os resultados do levantamento geofísico por GPR mostraram no perfil longitudinal de 4,5 m de largura em corte de estrada situada na vertente de estudo (**Figura 27**). Pode-se verificar a presença de descontinuidades em vermelho, até aproximadamente 1,8 m, onde se encontram as zonas de fraqueza natural do material. Este dado converge com os dados geológicos apresentados na caracterização da área pelo CPRM (1990), mostrando a orientação dos planos de acamamento e foliação em eixos perpendiculares de abatimento e deslizamentos ocorridos na área. Podendo constatar que o gnaiss da área apresenta atitude litológica de planos preferenciais de fraqueza com juntas verticais que geram descontinuidades perpendiculares e incidem os possíveis abatimentos do material em sentido longitudinal. O georadar imageou somente o horizonte C do solo, pois os horizontes anteriores foram removidos para a construção da estrada que se encontra a vertente de análise.

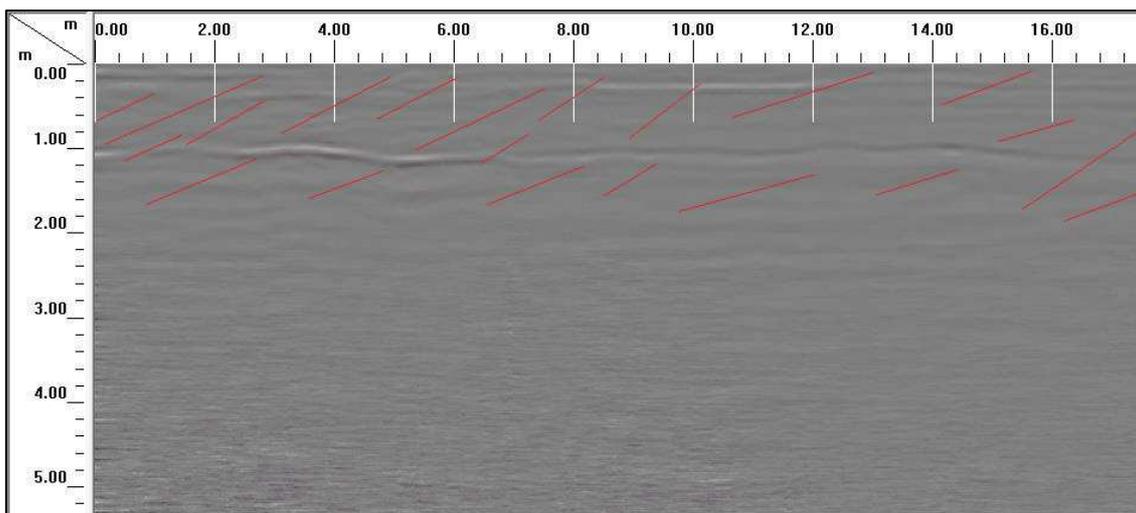


Figura 27 – Perfil longitudinal de georadar da vertente de estudo.

Estas discontinuidades são os eixos preferenciais de percolação de água, sendo evidenciada pela atenuação do sinal por acúmulo de água nas zonas de fraqueza. Conforme a condutividade elétrica exposta em metodologia, materiais e métodos, Souza (2005) aborda que em regiões que poderiam apresentar acúmulo de água nos eixos preferenciais de escoamento de água apresentam forte atenuação do sinal. Levando em consideração a água como um grande condutor eletromagnético, foi perceptível o aumento do sinal nas áreas de discontinuidades, onde possivelmente obtém maior taxa de água acumulada decorrente da noite de intenso evento pluviométrico anterior ao imageamento do georadar.

Aranha e Augustin (2012), também abordam que o uso do GPR apresenta sensibilidade à variação de composição (ph, viscosidade, temperatura, etc.) dos fluidos das rochas e às mudanças estruturais destas, podendo estar preenchidas ou não por água. Essas alterações nas propriedades dielétricas causam distorções no sinal, dificultando a leitura do produto do georadar. Maciel Junior (2011) aponta que o GPR pode atingir profundidades de até 30 m em materiais de baixa condutividade elétrica, como areia seca e granito. Já materiais com alta condutividade elétrica, como xistos, argilas, água entre outros atenuam o sinal do radar, diminuindo a sua profundidade de leitura. Por isso, os eixos de discontinuidades do material são indicativos de discontinuidades hidráulicas, onde se tornam os locais preferenciais de saturação do perfil.

A leitura do sinal longitudinal atingiu com clareza até os 2,5 m de profundidade e abatimentos de materiais mais evidentes até 1,10 m foram mais evidentes, apresentando maior representatividade no elemento condutividade hidráulica, por conta das possíveis

poro-pressões positivas em descontinuidades hidráulicas geradas. Na altura de 8 m de extensão, onde foi feita a retirada das amostras de solo (etapa de análise seguinte), evidenciou-se o abatimento fortemente presente, também considerado como uma descontinuidade presente no perfil de estudo.

Outras feições identificadas no perfil longitudinal são referentes aos blocos rochosos que influenciam no aumento da permeabilidade e conseqüentemente infiltração, percolação e exfiltração, aliadas às diferenças de condutividade hidráulica influenciam na ocorrência de fluxos de instabilidade de encostas (SILVA et al. 2014). De acordo com Silveira e Ramos (2007), as hipérboles com concavidades voltadas para baixo nas imagens de georadar, são caracterizadas pela presença de blocos.

No geral, todos os perfis imageados (longitudinal, transversal A, transversal B e transversal C) apresentaram características com descontinuidades de acordo com a orientação geológica da área; abatimentos do material que estão ocorrendo por conta de descalçamento de base para construções habitacionais; sobrecarga de transporte de estrada; revestimento de alta permeabilidade; e blocos rochosos no interior do material que contribuem para a percolação de água e poro-pressões, conforme descrito acima. No entanto, os perfis transversais (**Figura 28**) mostraram informações específicas descritas abaixo:

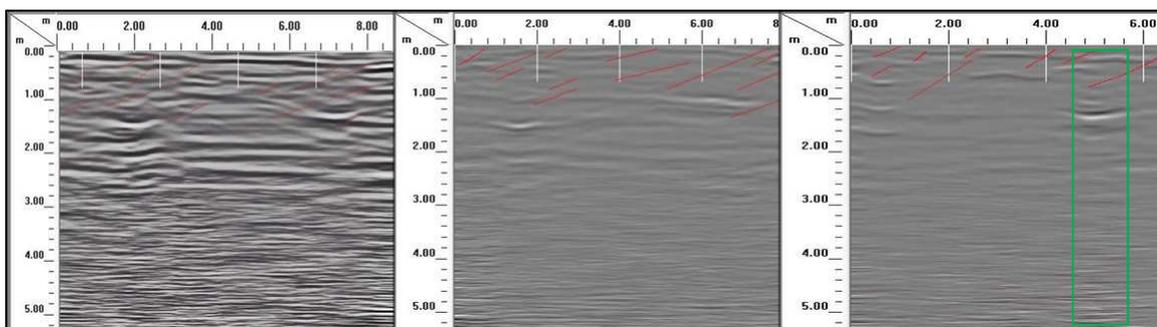


Figura 28 - Imageamento de GPR dos perfis transversais. a) Transversal 'A' b) Transversal 'B' c) Transversal 'C' com infiltração e percolação hídrica em vermelho e evidência da raiz da jaqueira em verde.

- Transversal A:

O imageamento do perfil transversal, situado nas proximidades de um poste de rede elétrica, obteve comprometimento de leitura, por conta da atenuação do sinal eletromagnético do radar pela presença do poste. Os ruídos podem ser observados ao longo de todo o imageamento. No entanto, a perda do sinal fica mais evidente após os 2 m de profundidade. Cordeiro et al. (2007) aborda que as dificuldades de aplicação da

técnica geofísica surgem quando há presença de materiais eletro condutores em locais com ruídos eletromagnéticos, como no caso deste perfil transversal. Apesar da dificuldade de leitura, ainda é perceptível até os 2 m de profundidade, a presença de descontinuidades nas linhas em vermelho, blocos rochosos nas concavidades negativas e abatimento de material em alteração longitudinal na imagem.

- Transversal B:

O imageamento do perfil transversal na altura do ponto de coleta de material para avaliação em laboratório obteve resultados perceptíveis em relação aos abatimentos registrados com desnível do solo, além de pequenos blocos rochosos (também verificados na coleta do material no horizonte C), e a presença das descontinuidades em vermelho. Os abatimentos no ponto de coleta também foram evidenciados no perfil longitudinal entre os 6 e 8 m de extensão, conforme exposto acima. A justificativa é dada pelo intenso tráfego de carros e caminhões em estrada de calçamento por material granítico.

Em geral, o revestimento granítico apresenta 40 cm de profundidade no sopé da estrada e o restante da base é constituído por substrato regolítico ou coluvionar, tornando-se indicado para estradas com pequeno a médio tráfego de automóveis. Pois, este material acentua a infiltração das águas pluviais, por ser um revestimento de alta permeabilidade, ao contrário do asfalto que intensifica o escoamento superficial. No entanto, neste caso, a alta permeabilidade do revestimento e este tipo de substrato não sustentam o impacto da estrada, gerando os abatimentos evidenciados nas imagens do georadar, também presentes a olho nu na superfície da estrada como um indicador de instabilidade do material, podendo evoluir para poro-pressões positivas e o comprometimento de estabilidade da vertente.

- Transversal C:

O imageamento do perfil transversal próximo a uma jaqueira apresentou as maiores evidências de instabilidade no local. Apesar das descontinuidades, presença de blocos rochosos e abatimento do material estarem presentes nos perfis anteriores, este apresenta os abatimentos de forma mais expressiva. Este fato é atribuído a menor espessura da vertente, em função do corte na base para a implantação de moradias com um descalçamento por corte de aproximadamente 6 m de orientação vertical em relação a base da estrada. Outro elemento visualizado neste perfil é a presença da raiz da

jaqueira em até 1 m de largura e reverberada até 2,0 m de profundidade, representada em verde no perfil.

A **Figura 29** mostra um croqui esquemático com os fatos observados em campo e validados nos resultados do levantamento geofísico. A ruptura da massa de solo, entre 0,5 a 1,5 m de profundidade, foi influenciada pelo corte da vertente, gerando o abatimento longitudinal do material. Somado à orientação do plano de foliação, direção e ângulo de 40° da rocha concordante aos planos de fraqueza do solo, associadas aos fatores evidenciados nos outros perfis como a carga de automóveis na estrada, alta permeabilidade do revestimento e características topográficas, condicionam o aparecimento das poro-pressões positivas, sendo reverberadas em profundidade com o abatimento do material e o comprometimento de estabilidade da vertente.

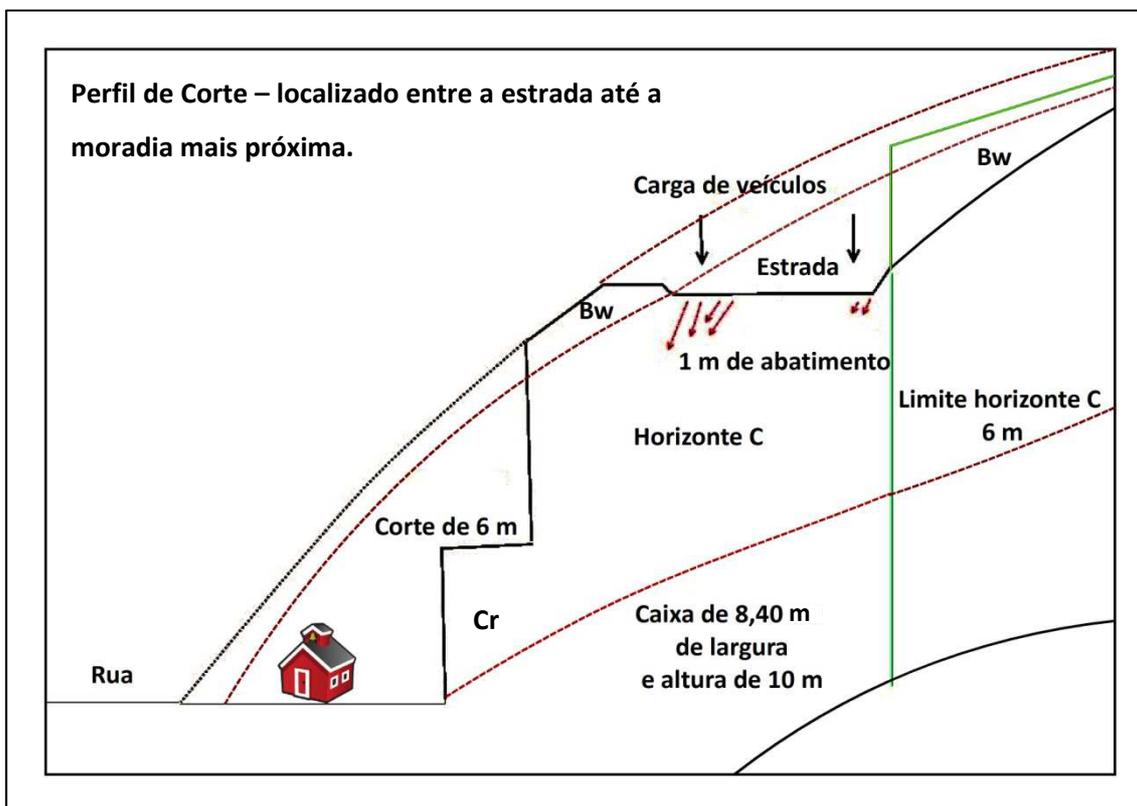


Figura 29 - Perfil esquemático da situação do corte no Transversal C no perfil de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, com linhas tracejadas mostrando a situação pretérita do perfil, o traço em preto contínuo identifica sua condição atual após o corte e em verde o perfil entre estrada e o corte.

Todos os produtos do georadar evidenciaram a presença de possíveis discontinuidades hidráulicas com os abatimentos de massa de solo, discontinuidades geológicas e atenuação do sinal por eixo preferencial de escoamento de água e blocos de rocha em

subsuperfície. Tais elementos apresentam uma forte relação com a principal variável deste estudo, a condutividade hidráulica.

As encostas apresentam forma resultante do esculpimento das águas pluviais e aluviais. Vieira et al. (1999) abordam que além das águas serem condicionantes da morfologia das encostas, elas também assumem um importante papel na distribuição do escoamento e fluxos de água nos solos, alterando as condições de poro-pressões, que alteram a estabilidade das encostas.

Parizzi et al. (2010) relacionam a ação da água nos depósitos de vertente como essencial para a criação da frente de saturação e o desencadeamento dos movimentos de massa, responsável pelo aparecimento da poro-pressão positiva e a diminuição da sucção e tensão cisalhante pré-existente. A taxa de saturação dos solos depende de suas características físicas e estruturais. No caso de um solo seco, será mais difícil a ocorrência de um movimento de massa, pelo fato de suas características estruturais, porosidade e permeabilidade retardarem o avanço de saturação do solo, causando rupturas de menor expressão.

Souza (2005) coloca, em relação à experiência do GPR, quanto maior for o conhecimento em relação as propriedades estruturais do solo, maior o sucesso na interpretação dos resultados. O uso de outras informações geológicas, pedológicas e geomorfológicas também contribui para a confiabilidade na avaliação dos dados e bom uso da metodologia.

Souza (2005) sugere a realização de pesquisas com o GPR aliadas a ensaios de laboratório. Um estudo em escala de laboratório, com o conhecimento das propriedades do solo, somado as condições observadas em campo, é uma forma de comprovar os resultados obtidos caracterizando a resposta do radar em diferentes situações. Além de fazer uma filtragem de hipóteses levantadas, auxiliando na interpretação e maior veracidade de resultados.

Desta maneira, o georadar foi fundamental quanto ao registro em subsuperfície das discontinuidades hidráulicas, com a finalidade de contribuir para as próximas etapas de encaminhamento da pesquisa, com as análises físicas para contribuir em respostas confiáveis no que tange a ruptura da vertente.

5.3 Morfologia do Solo

5.3.1 Descrição Geral e Morfologia do Solo

A presença na região de Santa Teresa de gnaisses kinzigítico com formação geológica do Complexo Paraíba do Sul de cronologia do Proterozóico Superior (RADAMBRASIL, 1987), somada às características morfológicas e mineralógicas da fração areia e dos fragmentos raros de rocha alterada no horizonte C do solo, indicaram ser os gnaisses kinzigíticos mesocráticos o mais provável material de origem do material inconsolidado.

Os Latossolos estudados representaram solos bem desenvolvidos e profundos, com 180 cm de espessura nos horizontes A e Bw. A gênese de formação desse solo e os processos pedogenéticos atuais estão vinculados a uma drenagem acentuada, influenciados por um relevo regional montanhoso, com morrotes em sua designação geomorfológica e um relevo local forte ondulado, com talude rochoso a montante. Possui clima subtropical de inverno seco (Köppen) e litorâneo úmido (Strahler), em presença de erosão hídrica laminar ligeira e vegetação original passada de floresta primária subtropical perúmida, com uso atual constituído por corte de estrada.

O escoamento das águas no perfil desses solos teve relação com algumas características morfológicas. Todo o perfil apresentou textura ligeiramente uniforme, passando de argilosa no horizonte A, a muito argilosa no horizonte Bw1, mas sem grande diferença nos teores, e argilosa no horizonte Bw2, enquanto o horizonte C manteve uma textura argilosa (**tabela 5**), este último tendo sido menos afetado pela pedogênese, e próximo ao horizonte Cr (saprólito).

A drenagem acentuada também foi atribuída aos agregados pedológicos estruturais em blocos fracos e granulares pequenos (microagregados). Foi verificada uma inversão na proporção dos tipos de agregados pedológicos estruturais entre os horizontes Bw latossólicos observados no perfil de solo. Onde no Bw1, houve predomínio de blocos angulares fracos muito grandes (60 mm) em detrimento dos granulares pequenos fortes (microagregados de 0,5 mm). No Bw2, o predomínio foi de granulares pequenos fortes (microagregados de 0,5 a 1 mm) e em segundo lugar a formação de blocos angulares fracos muito grandes (60 mm) (**tabela 5**). Considera-se aqui a presença de minerais do grupo da caulinita e óxidos de ferro, influenciando na forma desses agregados pedológicos. A transição irregular gradual do horizonte Bw2 pode evidenciar um

material geneticamente derivado do horizonte C. Ambos os horizontes latossólicos (Bw 1 e Bw 2) guardam semelhanças em relação à consistência, dura, quando seca, e friável, quando úmida. Este é um fator relevante para instabilidade das vertentes, pois quanto mais friável for o material, maior sua instabilidade. No entanto, nesses casos de solos profundos quando submetidos a cortes, a superfície pode gerar tração em todos os horizontes.

Tabela 5 - Descrição morfológica por horizonte e profundidade do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Horizontes	Profundidade	Descrição Morfológica
Ap	0 -20 cm	Bruno-avermelhado-escuro (5YR3/4, úmida) e bruno-avermelhado (5YR 4/4, seca); argilosa; moderada pequena blocos subangulares; dura, firme, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
Bw1	20 - 60 cm	Vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmida) e vermelho-amarelado (5YR 5/6, seca); muito argilosa; fraca blocos angulares muito grandes e granular pequena; dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
Bw2	60 - 180 cm	Vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmida) e amarelo-vermelhado (5YR 6/8, seca); argilosa; granular pequena e fraca blocos angulares muito grandes; dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição irregular e clara.
C	180-280+ cm	180-280+ cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmida) e vermelho-amarelado (5YR 5/6, seca); argilosa; maciça coerente; dura, friável, plástico e ligeiramente pegajosa.

O horizonte A antrópico (SBCS, 2013), designação Ap, foi formado pelo uso contínuo do horizonte A, remobilizado superficialmente pela ação antrópica. O horizonte C foi menos afetado pela pedogênese, próximo ao horizonte Cr (saprólito). As cores do horizonte Bw2, matiz, valor e croma (**Tabela 5**), pelo sistema Münsell e pelo SiBCS (2013), atendem aos critérios de Latossolo Vermelho-Amarelo na subordem.

5.3.2 Química dos Solos

Para o Latossolo Vermelho-Amarelo estudado, o índice de intemperismo do solo, (Ki) (**Tabelas 6 e 7**), calculado pela fórmula $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \times 1,7$ foi de 1,4, obtido dos resultados de análise do ataque sulfúrico, confirmou solo muito intemperizado e grau elevado de decomposição da argila do solo, atendendo aos critérios definidos para diagnóstico de horizonte B latossólico da classe dos Latossolos. Isso indica presença dominante de caulinita e óxidos de alumínio (gibbsite). Pela análise, nesses solos, a caulinita e os óxidos de alumínio, bem como os óxidos de ferro, são componentes estruturantes do solo nas frações argila, e influenciam nos tipos de agregados

pedológicos presentes, blocos e microagregados, que atuam na geração dos fluxos hídricos internos do solo, possibilitando macro e microporosidade e aumentando a participação de drenagem vertical.

O solo é eletronegativo (ΔpH negativo) e no horizonte Bw2 do perfil em análise, a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) da argila indicou presença de argila de atividade baixa, grupo das caulinitas (1:1), em um valor estimado de 6,16 cmolc/kg de argila, para as cargas negativas da caulinita (PCZ 4,6). O pH é ácido, 4,8.

A relação silte/argila, valor 0,2, obtida da análise granulométrica da TFSA do horizonte Bw2 apontou, novamente, para um alto grau de intemperismo do solo (valor referência $< 0,6$ para os solos argilosos), e coincidente com um dos critérios diagnósticos para B latossólico pelo SiBCS (2013). Esses dados mostram um ambiente pedológico em que ocorre elevada lixiviação e dessilicação do solo, associada a concentração de sesquióxidos de ferro e alumínio e filossilicatos hidratados de alumínio (caulinitas), resistentes ao intemperismo, e que também são favorecidos pelos fluxos hídricos internos preferencialmente verticalizados. Essas partículas de fração argilas (secundárias) podem ser entendidas como estruturantes desse solo para receber águas de drenagem.

Pelos critérios do SiBCS (2013), o caráter ácrico não se aplica a esses solos, por não possuir a condição de pH em KCl igual ou superior a 5,0 ou ΔpH positivo ou nulo, e ainda a soma de bases trocáveis com alumínio extraível por KCl 1 mol/L, que foi inferior a 1,5 cmolc/kg de argila. Os teores de ferro obtido pelo ataque sulfúrico da amostra do horizonte Bw2 definiram o solo em mesoférico com 131,30 g/kg da TFSA. Trata-se de um perfil de solo com saturação por bases baixa, menor que 50 %, distrófico, por apresentar saturação por bases inferior a 50 % na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte Bw. Por meio das análises morfológicas (cor, textura e estrutura de agregados pedológicos) e químicas, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

Tabela 6 - Características químicas do horizonte Bw2 do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico.

Horizonte	pH ^{1/}	Δ pH	Ca ²⁺ _{2/}	Mg ²⁺ _{2/}	Al ³⁺ _{2/}	H+Al ³⁺ _{3/}	SB _{4/}	t _{5/}	T _{6/}	V _{7/}	M _{8/}	
	H ₂ O	KCl	cmol _c /dm ³						%			
Bw2	4,87	4,75	-0,12	0,41	0,25	0,20	2,90	0,75	0,95	3,65	20,50	21,10

^{1/} pH em água e KCl – Relação 1:2,5; ^{2/} Ca, Mg, Al – Extrator KCl 1 mol/L; ^{3/} H + Al – Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0; ^{4/} SB – Soma de Bases Trocáveis; ^{5/} t – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; ^{6/} T – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; ^{7/} V – Índice de Saturação de Bases; ^{8/} m – Índice de Saturação de Alumínio;

Tabela 7 – Continuação das Características químicas do horizonte Bw2 do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, teor de argila e índice Ki.

Horizonte	P _{9/}	K _{9/}	Na _{9/}	P-rem _{10/}	Fe ₂ O ₃ _{11/}	SiO ₂ _{11/}	Al ₂ O ₃ _{11/}	Argila	Ki _{12/}
	mg/dm ³			mg/L	dag/kg		g/kg		
Bw2	0,00	31,00	2,30	4,30	13,13	18,46	21,85	592	1,4

^{9/} P, Na, K – Extrator Mehlich 1; ^{10/} P-rem – Fósforo remanescente; ^{11/} Fe₂O₃, SiO₂/Al₂O₃ ataque sulfúrico; ^{12/} Ki – Índice de Intemperismo (SiO₂/Al₂O₃ x 1,7).

5.3.3 Análise Mineralógica

Nas frações areia grossa e areia fina analisadas por profundidade, destaca-se predominantemente o mineral quartzo (**Tabela 8**). Em pequena quantidade, menos de 4%, a proporção de feldspatos intensamente intemperizados, ocorre somente nas areias finas do horizonte Bw1. Essa proporção de menos que 4 % de minerais primários facilmente intemperizáveis é requerida para Latossolos no SiBCS (2013). A mineralogia da fração cascalho é predominantemente quartzosa, apresentando poucos cascalhos de rocha alterada com concreção ferruginosa (**Tabela 8**). Um estágio avançado de intemperização pela transformação quase completa dos minerais facilmente alteráveis, com intensa dessilicação, lixiviação de bases e concentração residual de argilominerais e óxidos, associado a um ambiente de oxidação, levou a reações químicas que contribuem para formar pequenas concreções ferruginosas, cujos fragmentos aparecem em todas as amostras analisadas (**Tabela 8**). Apesar da presença dessas concreções em todas as amostras, verificou-se que a quantidade desses fragmentos diminuiu com o aumento da profundidade, o que pode ser justificado pela menor permanência de água nos horizontes superiores, o que promoveria menores alterações desses materiais cimentados ou sua melhor formação decorrente de melhor oxidação. De modo geral, em todas as profundidades amostradas não existiram alterações significativas na composição mineralógica, o que, provavelmente, indica tratar-se de um mesmo material e desenvolvido *in situ*, tratando-se de um elúvio. Entretanto, em relação à gênese, outras investigações devem ser feitas para responder a essa questão.

Tabela 8 - Análise Mineralógica: Porcentagem relacionada ao total de cada fração

Horizontes	Profundidade	Areia Fina	Areia Grossa	Cascalho
Ap	0 -20 cm	80% de quartzo, grãos geralmente bem arredondados e incolores; e 20% de argilo ferruginosos subarredondados amarelo-avermelhados de superfície geralmente fosca, alguns contendo detritos e traços de carvão.	80% de quartzo, geralmente arredondado fosco e outros incolores; e 20% de nódulos ferruginosos vermelho escuro e argilo ferruginosos amarelo avermelhados geralmente arredondados de superfície fosca; alguns com traços de carvão e detritos.	75% de quartzo geralmente subangulosos de superfície fosca; 24% de nódulos ferruginosos geralmente arredondados de cor amarelo-avermelhados ou vermelhos; e 1% de cascalhos constituídos de blocos alterados e concreção ferruginosa pouco alterada com resquício de minerais primários do gnaiss constituente da rocha, mantendo sua foliação primária.
Bw1	20 - 60 cm	90% de quartzo geralmente bem arredondado e incolores e 3 % de feldspato bem arredondado, alguns com incrustações e aderência ferruginosa, geralmente incolores e cerca de 7 % de nódulos ferruginosos amarelo-avermelhado arredondados de superfície geralmente fosca com presença de detritos e carvão.	90% de quartzo, geralmente subangulosos, alguns com incrustações ferruginosas e incolores; 10% de nódulos argilo-ferruginosos vermelho-escuros subangulosos de superfície fosca e com o predomínio de nódulos argilosos.	96 % de quartzo subangulosos com maioria incolores e outros leitosos e amarelo-avermelhados; e 4 % de bloco alterado ferruginoso subangular e concreção ferruginosa pouco alterada do feldspato de decomposição litogenética primária.
Bw2	60 - 180 cm	90% de quartzo, grãos geralmente bem arredondados com coloração incolor e alguns de incruções e aderência ferruginosa opaca; 10% de nódulos argilo-ferruginosos vermelho-escuros arredondados de superfície fosca e com o predomínio de nódulos argilosos.	90% de quartzo, geralmente subangulares, de superfície fosca, alguns com incrustações ferruginosa, incolores; 10% de nódulos argilo ferruginosos (amarelo, amarelo-avermelhados e avermelhados), nódulos ferruginosos e nódulos argilosos avermelhados de superfície de superfície brilhante.	95% de cascalho de quartzo, de maioria subangular com coloração de maioria fosca, passando para incolor e em minoria leitosa, com incruções e aderência ferruginosa opaca; 5% de concreção ferruginosa subangular vermelho escuro e amarelo-avermelhada.
C	180-280+ cm	90% de quartzo, grãos geralmente bem arredondados com coloração incolor e alguns de incruções e aderência ferruginosa opaca; 10% de nódulos argilo-ferruginosos amarelo-avermelhados arredondados de superfície fosca.	90% de quartzo, geralmente subangulares de superfície incolor, e alguns com incrusões ferruginosas e superfície fosca; 10% de nódulos argilo ferruginosos (amarelo-avermelhado e avermelhado escuros) opaco + nódulo ferruginosos vermelho escuro, de superfície opaca, geralmente magnético, traços de mineral opaco de mica biotita e concreções de ferro.	100% de quartzo, maioria subangular com coloração fosca e algumas superfícies incolores.

5.4 Análise Física do Solo

De acordo com Ferreira (2010), a física do solo é o ramo da ciência que objetiva a caracterização dos atributos físicos de um solo, bem como a medição, predição e controle dos processos físicos que ocorrem dentro e através do solo. No contexto deste trabalho, a aplicação da física do solo foi empregada no equacionamento de problemas gerados ou prognóstico pela utilização do solo para propósitos próprios, a exemplo da procura por descontinuidades hidráulicas pelo tamanho e arranjo de suas partículas sólidas minerais, pela D_s , P_{total} , P_{macro} e P_{micro} , pela retenção da água no solo e pela K_{sat} .

5.4.1 Análise Granulométrica

A textura do solo representa a característica física mais estável, bem como sua distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais (menores que 2 mm) quanto ao tamanho (FERREIRA, 2010). Areia, silte e argila são as três frações texturais do solo que apresentam amplitudes de tamanhos variáveis, segundo o Sistema de Classificação Brasileiro adotado (SBCS, 2013).

A classe textural, variando em profundidade no perfil do solo, de argila a muito argilosa e, novamente, passando a argila, representa um Latossolo de grau e tempo de intemperismo avançado. A caulinita (filossilicato hidratado de alumínio), a gibsitita (óxido de alumínio), a goethita (óxido de ferro hidratado bem cristalizado) e hematita (óxido de ferro bem cristalizado), em diferentes proporções, são os principais constituintes da fração argila nessa classe de solo. Isso também se confirmou pela presença dos agregados pedológicos do tipo microagregados (influência dos óxidos, e, possivelmente, da bioturbação passada) e do tipo blocos (influência das caulinitas que facilitam processos de umedecimento e secagem).

Abaixo de 180 cm de profundidade, no horizonte C, o material se apresentou com menor grau de intemperismo, indicado pela relação silte/argila de 0,545, maior se comparado aos volumes adjacentes (**Tabela 9**), enquanto que a manutenção de uma textura argilosa nesse horizonte C refere-se a um acúmulo absoluto de argila (0,486 kg/kg da TFSA, ou 48,6 % de argila), proveniente da alteração química dos minerais do gnaiss original.

Os teores de argila ao longo do perfil de solo se apresentaram relativamente uniforme, com pequena redução no horizonte C, o que significa um ambiente pedológico capaz de

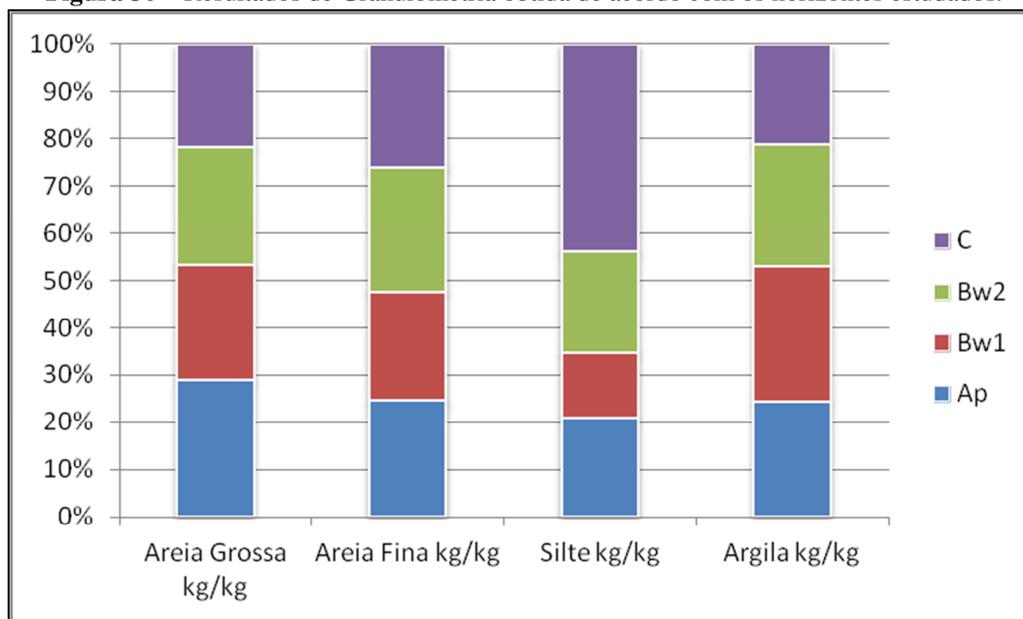
reter de forma diferenciada a água e apresentar valores de umidade diferenciados na CC para profundidades diferentes.

Tabela 9 – Resultados da Análise Granulométrica, Argila Dispersa em Água, Relação Silte/Argila e Classes Texturais.

Horizonte	Profundidade da Amostra	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Argila Dispersa em Água	Relação Silte/Argila	Classe Textural (SBCS)
						Kg/kg		
cm		Kg/kg						
Ap	0 -20	0,254	0,056	0,127	0,562	0,251	0,225	Argila
Bw1	20 - 60	0,212	0,052	0,083	0,653	0,009	0,127	Muito Argilosa
Bw2	60 - 180	0,219	0,06	0,129	0,592	0,012	0,217	Argila
C	180 - 280+	0,19	0,059	0,265	0,486	0,022	0,545	Argila

A relação textural do solo mede a *relação* da porcentagem de argila do horizonte B em comparação com a do horizonte, o resultado foi de 1,11 kg/kg, a qual se insere no parâmetro aceitável para definição da classe de Latossolos (SiBCS, 2013). O incremento da argila do horizonte Ap para o Bw1 possuiu uma diferença de quase 10%, de 0,562 kg/kg de solo para 0,653 kg/kg de solo, voltando a ter uma ligeira diminuição no Bw2, com o valor de 0,592 kg/kg (**Tabela 9**). A relação textural B/A satisfaz aos requisitos para Bw, não atendendo aos critérios para Bt (SiBCS, 2013), em que a relação textural seria bem maior. Em termos de resistência, o solo analisado tende a apresentar melhores condições de estabilidade, exceto em relação aos teores de silte que aumentaram nas profundidades de 180 cm do horizonte C, que tendem a diminuir a condutividade da água, comportamento padrão de granulometria regular, dados verificados na **Figura 30**.

Figura 30 – Resultados de Granulometria obtida de acordo com os horizontes estudados.



Trabalhos clássicos como Kohnke & Franzmeier (1995) abordam que os melhores solos, no ponto de vista físico, são aqueles que apresentam cerca de 10 a 20% de argila, silte e areia e uma boa quantidade de matéria orgânica. No entanto, a realidade brasileira está na classe dos Latossolos em sua maioria, Ferreira (2010) aborda que embora o Brasil apresente diversos domínios pedobioclimáticos com várias classes de solos, são os Latossolos que constituem mais de 50% do território brasileiro. Ainda assim, muitos dos estudos sobre qualidade física do solo se prestam às avaliações da relação solo-planta. Os solos brasileiros são pobres em silte pelo avançado estágio de intemperismo condicionado por fatores climáticos tropicais e temperados. Segundo Kohnke & Franzmeier (1995), quando os solos possuem baixo estágio de intemperismo, com grande quantidade de silte, estão predisponentes à erosão, implicações no estabelecimento de culturas, formação de solo superficial e outros condicionantes que dificultam a utilização. Os Latossolos estudados em Santa Teresa, estando a frente destes questionamentos, a priori apresentam comportamentos menos restritivos à sua utilização comparada os solos com textura siltosa. Entretanto, quanto à instabilidade da vertente, associada ao comportamento hídrico, o acréscimo de silte pode representar um fator que contribui para a efetividade do processo.

O tamanho das partículas e a porosidade têm relação direta com a permeabilidade dos solos. Solos de textura mais fina tendem a apresentar porosidade total maior e microporosidade maior, levando a maior dificuldade de infiltração e percolação de água, menor permeabilidade, coesão elevada e retenção de água elevada (BELTRAME, 1997). Além dos fatores como adensamento de partículas e presença de matéria orgânica, a natureza mineralógica da argila também influencia a retenção da água. No caso dos solos estudados, pela ausência de argilas expansivas, a retenção não seria favorecida por esse fator.

Em relação à granulometria, Beltrame (1997) abordou a análise granulométrica como a definição da textura do solo, representando grande influência no comportamento hídrico do solo. Neste caso, as frações mais finas retêm mais água e reduz a condutividade hidráulica e as frações mais grossas aumentam o fluxo hídrico do solo.

Em relação à granulometria, no entanto, Manfredini et al. (1984), observou a relação na distribuição dos poros e a influência da fração areia em algumas características hídricas de Latossolos de textura média e areia quartzosa, tendo as variações do volume de água retida nestes solos dependente da variação na distribuição dos poros determinada pela granulometria da fração areia. Os autores afirmam que a capacidade hídrica do solo aumenta em função da redução da fração granulométrica dos grãos. Comparando os horizontes estudados nos Latossolos de Santa Teresa, como não houve mudança expressiva na distribuição da areia grossa e da areia fina, esse fator não foi importante para a compreensão do comportamento hídrico do perfil.

Conforme especificado acima, a classe textural do solo em análise apresenta indicação de permeabilidade e fluxo hídrico interno restrito, e armazenamento alto, em função da sua textura argilosa e muito argilosa. GOMES (2012) obteve uma boa relação entre os dados de condutividade hidráulica e a granulometria, em profundidade, houve um incremento de material silto-arenoso, ocorrendo uma diminuição da retenção de água e maior dinâmica de fluxo interna, sendo a análise granulométrica um parâmetro indispensável para se avaliar a dinâmica hídrica do solo.

5.4.1.1 Argila Dispersa em Água

A estabilidade da vertente também apresenta relação com os valores de ADA que condicionam a estabilidade de agregados do solo, Segundo Ruiz (2004), a ADA é a

determinação da análise granulométrica, ao qual se utiliza apenas a água como dispersante. A ADA é utilizada, com frequência, para avaliar a estabilidade dos agregados e a susceptibilidade do solo a erosão hídrica. Os menores valores indicam maior estabilidade de agregados e maior resistência aos processos erosivos do solo e estabilidade de vertentes.

Freitas (2011) avaliou, além dos efeitos de ruptura do solo, a possibilidade de migração do material disperso no perfil de solo, acarretando na obstrução dos poros na alteração da dinâmica da água em subsuperfície, do ar e a mobilidade de solutos, o que interfere diretamente na coesão do solo, podendo obter planos de ruptura.

O horizonte Ap (0 – 20 cm), apresentou o maior valor de ADA, com 0,251 kg/kg, sendo este o horizonte de maior instabilidade em relação à erosão. Já os baixos valores da ADA apontam estabilidade dos agregados nos outros horizontes do perfil do Latossolo estudado, Bw1 (20 –60 cm) com 0,009 kg/kg de solo, seguido do horizonte Bw2 (60 – 180 cm) com 0,012 kg/kg de solo e o horizonte C (180 - 280+ cm) com o valor de 0,22 kg/kg de solo (**Tabela 10**).

Estes valores podem ser justificados (FERREIRA, 2010) pela presença de argilas de baixa atividade nos Latossolos. Essas diferenças de valores referentes à atividade da fração argila e sua estabilidade, pode gerar algumas pequenas descontinuidades no perfil, pois o horizonte Ap apresenta menor estabilidade, seguido por um horizonte Bw1 e Bw2 com maior estabilidade. Neste caso, a ADA pode contribuir para o ligeiro incremento de argila que ocorre entre 20 e 60 cm, podendo favorecer a translocação de argila dos 20 primeiros centímetros do solo (horizonte A) em direção ao horizonte Bw1. Entretanto, outro fator que pode contribuir para esse aumento do teor de argila no Bw1 é a erosão superficial no solo e elutriação (remoção seletiva de finos, argila e silte) no horizonte Ap (**Tabela 10**).

Tabela 10 – Comparação dos resultados de argila dispersa em água segundo sua classificação de resistência dos agregados.

Horizonte	Profundidade da Amostra	Argila Dispersa em Água	Classificação de Resistência
	cm	Kg/kg	
Ap	0 -20	0,251	Muito Baixa
Bw1	20 - 60	0,009	Muito Alta
Bw2	60 - 180	0,012	Alta
C	180 - 280+	0,022	Baixa

5.4.1.2 Relação Silte/ Argila

Segundo Ruiz (2004), a relação de silte e argila é utilizado como indicativo do grau de intemperismo em solos de regiões tropicais e da movimentação eventual de argila no perfil. Quando indica baixo teor de silte, revela um solo de alto grau de intemperismo e alto teor de silte apresenta um solo com baixo grau de intemperização. Este alto grau revela no horizonte B um valor inferior a 0,6 nos solos de textura argilosa ou muito argilosa (SiBCS, 2013).

Em resposta aos dados obtidos, os valores se encontram entre 0,20 – 0,55, estando de acordo com o padrão de até 0,6 nos solos de textura argilosa e muito argilosa, segundo o SiBCS (2013). Os valores da fração silte/ argila nos horizontes Ap (0 – 20 cm) e Bw2 (60 – 180 cm) são similares. No entanto, no horizonte Bw1, o valor de silte diminuiu, notando um aumento da fração argila neste horizonte do solo, sendo o horizonte mais pedogenizado e com a maior movimentação de argila do perfil. Abaixo, no horizonte C (180 - 280+ cm), ocorreu um incremento da fração silte e uma diminuição da quantidade de argila. Esta característica é notória no horizonte C, pois é o perfil menos pedogenizado, mantendo algumas características da rocha matriz, neste caso o gnaiss kinzigítico. Apesar dos valores apresentarem pequenas diferenças, a relação silte/ argila se mantém estável até o horizonte C.

5.4.2 Porosidade e Densidade do Solo

Ao avaliar a Pt e Ds e seus efeitos na hidrodinâmica de encostas, é necessário contextualizar a textura do solo e seu significado, bem como os tipos de agregados pedológicos. Dessa forma, segundo a definição de Ferreira (2010), entende-se por estrutura do solo o arranjo das partículas do solo e do espaço poroso entre elas, incluindo o tamanho, forma e arranjo dos agregados formados quando partículas primárias se agrupam em unidades separáveis. Neste contexto, é necessário possuir o entendimento com clareza, em que não existem solos sem estrutura, mesmo sem a evidência de agregado pedológico (no caso de maciço-coerente e maciço grãos simples), as partículas do solo e os vazios porosos produzem seu próprio arranjo estrutural interno, que irá definir um ambiente físico ao solo. Mesmo que não haja alteração no tamanho das unidades estruturais (agregados pedológicos), uma simples alteração na sua disposição interna com alteração do espaço poroso, determinará um novo

comportamento dos processos que ocorrem dentro do solo, principalmente quando envolvem as relações existentes entre solo e água (FERREIRA, 2010).

Ferreira (2010) ressalta que o tipo de estrutura particular do solo é consequência dos processos gerais de desenvolvimento, tendo os fatores de formação do solo, como clima, origem, tempo, organismos e relevo, influenciando na formação de sua estrutura. Considerando a estrutura do solo um atributo dinâmico, sendo fortemente afetada por atividades biológicas e por práticas de manejo, sua avaliação passa a ter aspecto funcional. Para isso é necessário obter o entendimento do ambiente que o solo está inserido e as relações de produção antrópica para avaliar o arranjo de partículas, conforme seguirá nas análises texturais abaixo.

Neste caso, os seguintes resultados relacionam a Pt, a Pmacro e Pmicro e a Ds para cada profundidade amostrada para amparar as análises de possíveis discontinuidades hidráulicas. A **tabela 11** caracteriza o perfil de solo amostrado quanto a esses dados:

Tabela 11 – Valores de Porosidade Total, Microporosidade, Macroporosidade, Densidade de Partículas e Densidade do Solo.

Horizonte	Profundidade da Amostra	Porosidade Total	Microporosidade	Macroporosidade	Densidade de Partículas	Densidade do Solo
	cm		m ³ /m ³		g/cm ³	
Ap	0 - 20	0,57	0,44	0,13	2,67	1,15
Bw1	20 - 60	0,58	0,43	0,15	2,63	1,11
Bw2	60 - 180	0,56	0,44	0,12	2,60	1,15
C	180 - 280+	0,52	0,52	0,01	2,70	1,28

A Pt representa a fração de solo em volume não ocupada por sólidos (FERREIRA, 2010). O arranjo das partículas ou geometria do solo determina a quantidade de poros existentes. Como as partículas variam em tamanho, forma e tendência de expansão quando há o acréscimo de água, os poros diferem consideravelmente quanto a sua forma, comprimento, largura, tortuosidade e continuidade.

Todas as variáveis que envolvem a estrutura do solo, incluindo a textura, tipos e tamanhos de agregados pedológicos e matéria orgânica, influenciarão nos valores de Pt do solo.

O valor da P_t do perfil de solo analisado variou muito pouco, de 0,52 a 0,58 m^3/m^3 de solo. Se estima que o valor da porosidade total varia entre 0,30 e 0,70 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (**Tabela 11**), valor este atribuído segundo os valores de p e p_s (densidade do solo e densidade de partículas, respectivamente, ou D_s e D_p) dos diferentes tipos de solos (FERREIRA, 2010).

O tamanho dos poros por tamanho como um atributo físico do solo, segundo Ferreira (2010), requer a aceitação de que o espaço poroso do solo pode ser representado pelo modelo de capilaridade. Schumacher (1980 *apud* Ferreira, 2010), foi o responsável pela classificação da porosidade em duas categorias: macroporosidade e microporosidade.

Os microporos são responsáveis pela retenção e armazenamento de água pelo solo, ao passo que os macroporos são responsáveis pela infiltração, rápida redistribuição e aeração do solo (FERREIRA, 2010). Os valores limítrofes para a separação de cada categoria varia nos diferentes estudos, pois reflete especificidades de cultivo, condições climáticas, posição do lençol freático, possibilidade de irrigação e controle ambiental (FERREIRA, 2010).

No solo amostrado, os valores de microporos foram maiores que os de macroporos em todas as profundidades analisadas, já esperado para solos argilosos. Embora a P_t tenha se mantido mais ou menos constante ao longo do perfil, no horizonte C há um aumento da microporosidade, sendo 0,52 m^3/m^3 de P_{micro} e apenas 0,1 m^3/m^3 de macroporos, esta última em razão da estrutura maciça-coerente. Essa P_{micro} do horizonte C está relacionada à textura argilosa, aumento de silte e aumento da densidade do solo, que passa de 1,1, nos horizontes subjacentes, a 1,3 no horizonte C (Tabela 10), evidenciando maior dificuldade de permeabilidade nos horizontes Ap e B, da superfície até 180 cm, indicando aí um eixo de descontinuidade hidráulica.

De acordo com Ferreira (2010), o estudo do sistema poroso é importante nos estudos que envolvem armazenamento e movimento de água no solo. Neste caso, Curmi (1987) aborda a importância de trabalhos que avaliam a estrutura do solo em relação a sua porosidade e descontinuidades hídricas. Pelo meio dos diversos exemplos, Diab (1988) mostrou a importância da porosidade sobre o comportamento físico do solo sobre as propriedades de retenção de água e a importância das descontinuidades estruturais, tanto de origem antrópica quanto pedológica, sobre o efeito de circulação de água.

Alguns estudos avaliaram esse aspecto relacionado à porosidade dos grãos do solo. Grohmann (1972) abordou a caracterização do sistema poroso sendo importante para o estudo da estrutura do solo, na investigação do armazenamento e dinâmica da água no solo. Widiatmaka (1990) estudou as características físico-hídricas dos solos de uma vertente de solo de origem granítica na França, reafirmando a relação de estrutura e porosidade como fatores determinantes para a retenção de água no solo. Bem como, Curmi (1988) relacionou o espaço dos poros com o funcionamento hídrico em amostras com estrutura conservada, reforçando a necessidade de análise da porosidade do meio para determinação de comportamento hídrico em subsuperfície.

Dos resultados obtidos em relação à porosidade do solo, constatou-se uma descontinuidade de microporos na profundidade de 180 cm (entre os horizontes Bw2 e C), onde houve uma redução de macroporos e aumento de microporos, possibilitando redução da permeabilidade e maior armazenamento de água no horizonte C. Estes dados são justificados por Carvalho (1998), onde estudou a análise de microporos na retenção de água dos solos e verificou maior retenção de água nos horizontes com maior valor de microporos.

Em relação à densidade de partículas do solo (D_s), segundo Ferreira (2010), representa a relação entre a massa de solo seco em estufa e o volume de sólidos ou partículas. A D_s é um atributo físico e estável, que sua caracterização depende exclusivamente da composição das partículas sólidas. Neste contexto, os valores de p_s são considerados com base nas proporções relativas das frações mineral e orgânica, bem como da composição mineralógica do solo. Em solos minerais, a p_s varia de 2600 a 2700 kg m⁻³ (2,6 a 2,7 g/cm³), refletindo a presença de quartzo, com massa específica igual a 2650 kg m⁻³ FERREIRA (2010). Quando ocorre a presença de metais pesados e óxidos de ferro, ocorre o aumento no valor da p_s , enquanto a matéria orgânica com massa específica em torno de 1200 kg m⁻³ (1,2 g/cm³), contribui para o seu rebaixamento. Avaliando os valores de p_s das amostras de solo, não apresentam grande diferença de um valor para o outro, estes se mantêm entre 2,6 e 2,7 g/cm³, refletindo presença de quartzo e óxidos. Outra categoria de fundamental importância ao se avaliar as descontinuidades hidráulicas do solo é a determinação de sua densidade. Entende-se a densidade do solo como a relação entre a massa do solo seco em estufa e o seu respectivo volume total, ou seja, o volume do solo, incluindo os seus espaços ocupados pela água e pelo ar.

A p (ou D_s , Densidade do solo) é um atributo que reflete a estrutura do solo, que, por sua vez, define as características do sistema poroso da amostra de análise. Sendo qualquer manifestação que possa influenciar na disposição das partículas é evidenciada diretamente nos valores de p . Ao apresentar a gênese do solo que é reflexo das condições climáticas locais, dos processos pedogenéticos e suas demais especificidades, tem-se a estrutura e, por consequência, os valores de p , são também reflexos da composição mineralógica da fração argila dos solos. Comparando com diversos solos, a grande amplitude de valores de p , é reflexo das diferentes estruturas apresentadas. Nas classes de Latossolos, em horizontes subsuperficiais (B_w), os valores de p variam de 0,9 a 1,5 g/cm³ (FERREIRA, 2010). Os Latossolos amostrados apresentaram uma D_s baixa, 1,1 g/cm³, sendo atribuída em grande parte à presença de microagregados. No entanto, a Formação Barreiras do Terciário, pelo caráter coeso, numa estrutura maciça-coerente, a densidade dos solos (Argissolos Amarelos e Latossolos amarelos, coesos) pode ser elevada, chegando a registrar 1,4 g/cm³.

FERREIRA et al. (1999), verificou que os valores de p variavam de 0,91 g/cm³ (910 kg m⁻³) para latossolos gibsítico e 1,55 g/cm³ (1550 kg m⁻³) para latossolos caulíniticos. Esses autores ainda abordam que os diferentes latossolos revelam grande variabilidade em relação a D_s e a diferença de estabilidade de seus agregados, sendo digno de registro valores de D_s maiores e o valor mais baixo de retenção de água no Latossolo Amarelo coeso, sem predomínio de estrutura em microagregado, conforme os demais latossolos.

Uma vez estabelecida as condicionantes da D_s na classe do solo estudado e sabendo-se que a estrutura do solo é um atributo dinâmico, o valor de D_s pode ser alterado pela percolação e dinâmica de subsuperfície da água. Ao tratar a água no conteúdo do solo, ela afeta a consistência dos solos, onde cada solo apresenta uma resposta diferente a semelhantes intervenções feitas. Considerando a dinâmica da água no solo como um componente importante associado às características do seu sistema poroso, ela se relaciona diretamente com a D_s .

Neste caso, a D_s é um indicativo de dinâmica hídrica de subsuperfície, indicador de rejeção de água ou permeabilidade. Conforme exposto acima, há descontinuidade hidráulica entre os horizontes B_w2 e C , atentando-se à constituição de uma importante variável para a elaboração de possíveis projetos nas áreas de irrigação e drenagem e planos de gestão de municípios no que tange ao mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos de encostas.

5.4.3 Retenção de Água no Solo

De acordo com Libardi (2010), o potencial mátrico pode ser avaliado sobre a força de uma unidade do volume de água que se deve retirar num solo saturado por forças mátricas ou torna-lá livre, como a água padrão. Em virtude da heterogeneidade dos poros do solo, devido às formas e tamanhos variáveis de um solo para o outro, não é possível se obter uma equação teórica para o potencial mátrico. No entanto, o conteúdo de água no solo é menor em situação do solo seco. Neste caso, foram desenvolvidos aparelhos, com a teoria da capilaridade como base de seu funcionamento, que buscassem uma correlação entre o solo em seu formato heterogêneo e o conteúdo da água no solo. Sua curva resultante recebeu o nome de curva de retenção ou curva característica da água no solo.

Com o objetivo de conhecer as diferenças existentes em diferentes profundidades em relação aos potenciais mátricos e associá-los ao funcionamento hídrico no Latossolo Vermelho-Amarelo estudado, foi obtida uma curva de retenção da água do solo para cada horizonte do solo, considerando-se a CC (capacidade de campo) dos Latossolos a -10 kPa. Observa-se que no ponto de menor tensão (-6 kPa) a camada Bw2 é a que possui maior porcentagem de volume de água. Para esse ponto de menor tensão, considerando que os valores obtidos para cada profundidade do solo correspondem às amostras indeformadas submetidas a mesa de tensão, admite-se como condicionante a estrutura predominante de microagregados (agregados pedológicos granulares) e textura argilosa. Os maiores valores a -6 kPa e a -10 kPa no Bw2 podem estar também relacionados ao incremento de silte, se comparado a Bw1. As camadas de horizontes Ap e Bw1 apresentaram as menores retenções de água, reduzida ainda na camada C (**Figura 31**).

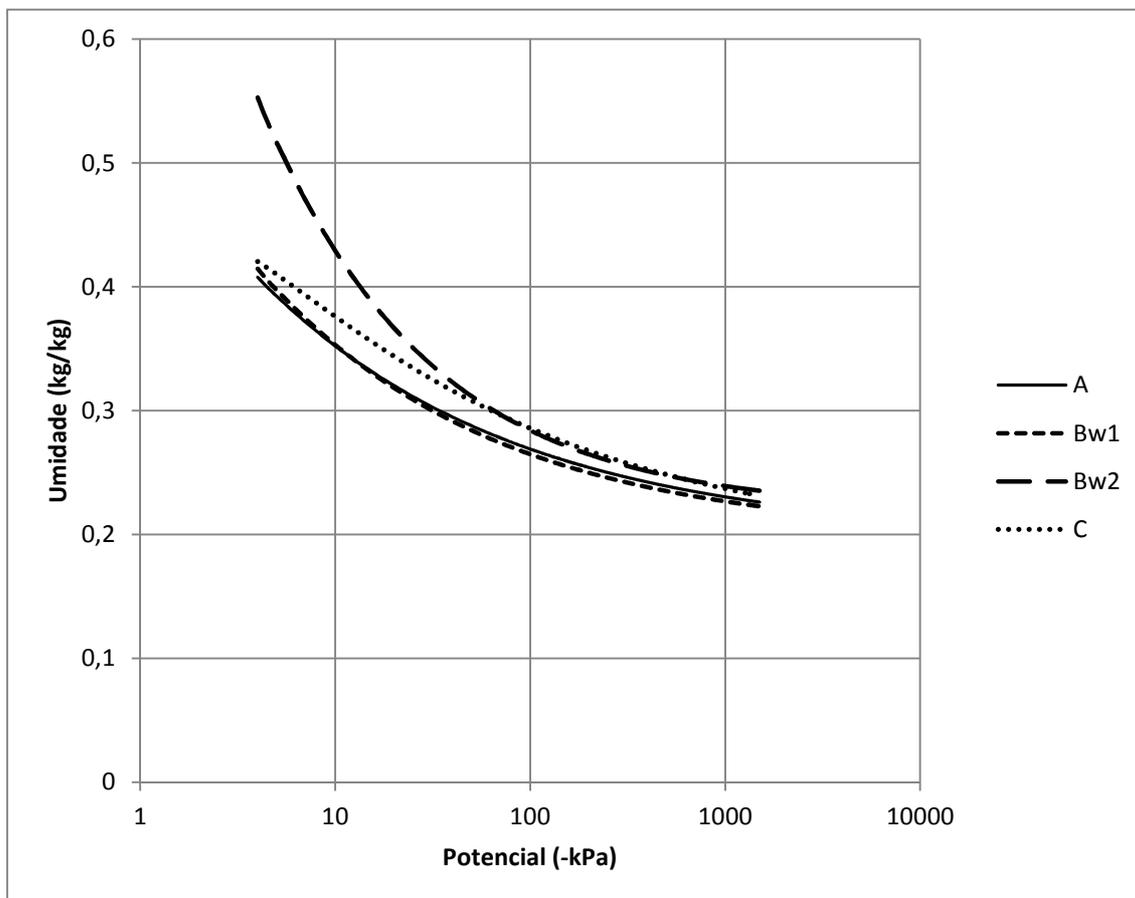


Figura 31 - Curvas de retenção de água nos horizontes Ap, Bw1, Bw2 e C de um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso de Santa Teresa –ES, ajustadas com o auxílio do software SWRC 3.0.

Ocorre uma considerável redução na retenção a baixas tensões no horizonte Ap, onde ADA foi maior. Segundo Carvalho (1998), a diminuição do tamanho dos agregados pedológicos com o incremento na proporção de argila, menor densidade do solo e maior porosidade dos agregados em latossolos são determinantes na retenção de água nessas tensões baixas, que se localiza fundamentalmente no espaço poroso intra-agregados.

No horizonte C argiloso os materiais tiveram sua capacidade de retenção de água a -6kPa e a -10 kPa reduzida devido ao aumento da densidade do solo e estrutura maciça (**Tabela 11**).

Levando em consideração o estudo da porosimetria como reservatório hídrico, a CC é usada para determinar a máxima quantidade de água disponível no solo. A CC é importante no que tange os processos destrutivos da vertente. REICHARDT (1988) aborda que seu processo é dinâmico no qual o gradiente passa gradativamente de -9,8 kPa/m (-1cm H₂O/cm) para zero, quando o fluxo de drenagem se anula e a água do solo

se encontra em equilíbrio. Nessa condição, o solo retém a água nele contida, determinando a CC e influenciando diretamente na estabilidade do solo.

5.4.4 Condutividade Hidráulica Saturada

O item abaixo relaciona o comportamento da água no solo aos demais ensaios já discutidos anteriormente. A **Tabela 12** caracteriza o perfil de solo amostrado quanto à K_{sat} .

Tabela 12 – Valores de K_{sat} nos horizontes avaliados.

Horizonte	Profundidade da Amostra	K_{sat}
	cm	cm/min
Ap	0 -20	0,39
Bw1	20 - 60	0,42
Bw2	60 - 180	0,20
C	180 - 280+	0,04

A avaliação K_{sat} , segundo Libardi (2010) diz respeito à transmissão de água através do solo na condição de saturação, ou seja, é uma propriedade do solo que traduz quão rápido ou devagar a água atravessa o solo, quando saturado. As características inerentes do meio, como textura e estrutura do solo, indicam a permeabilidade do solo e conseqüentemente sua condutividade hidráulica, conforme especificado por Oliveira et al. (2010) abaixo:

“A porosidade se expressa pela porcentagem do volume de vazios em relação ao volume total da amostra previamente coletada. Quanto mais poroso for um solo, maior será a quantidade de vazios, conseqüentemente mais permeável. Conforme o valor de condutividade hidráulica pode-se inferir sobre a permeabilidade de um solo (OLIVEIRA et al. 2010, p. 231).”

A relação da condutividade hidráulica é verificada com alto valor de K_{sat} em Ap (0 – 20cm), por conta do aumento de macroporos em decorrência de bioturbação e atividades biológicas presentes nesse horizonte. No horizonte Bw1, a K_{sat} é a maior de todas, influenciada pela maior macroporosidade e porosidade total maior, decorrente de vazios intra-agregados dos blocos subarredondados e, secundariamente, dos microagregados associados a uma textura muito argilosa. A conditividade hidráulica diminui pela metade no horizonte Bw2, com menos macroporos, mais microporos e textura argilosa, evidenciando a 60 cm de profundidade uma descontinuidade hidráulica

vertical e uma diferença da dinâmica da água de 0,42 cm/min para 0,20 cm/min. Uma segunda descontinuidade foi observada pelo valor K_{sat} entre Bw2 e C, esta se apresenta com direção lateral pela maior retenção hídrica existente entre o horizonte Bw2 e C. RESENDE (1985) e RESENDE et al. (1999), afirmam que nos Latossolos, quando muito argilosos, podem apresentar grande permeabilidade, em decorrência estrutura granular muito pequena e muito bem expressa. Esses valores de 0,20 cm/min a 0,42 cm/min atestam a grande permeabilidade para os horizontes mais pedogenizados e na secção de controle do Latossolo estudado. Apenas no horizonte C de 180 a 280 cm de profundidade a K_{sat} foi baixa.

No entanto, o plano de ruptura é evidenciado entre o horizonte Bw2 e C, ainda argiloso, deve-se ao fato de que no horizonte C houve um incremento de silte somado a uma diminuição da argila, aumento da densidade do solo associada a diminuição da porosidade total e de sua estrutura maciça coerente. Dados estes que conferem a existência de duas descontinuidades hidráulicas para um perfil relativamente espesso e homogêneo, em B latossólico e entre o horizonte Bw2 e o C, de acordo com as **Figuras 32 e 33**. Um significado dessas diferenças no tempo de deslocamento da água pode ser avaliado na formação de superfícies instáveis na vertente quando submetidas a cortes. Miquelletto (2007) aborda que a frente de infiltração se desloca paralelamente à superfície do terreno, podendo aproximar-se de um modelo unidimensional, onde rupturas planares, causadas pela redução dos parâmetros de resistência, pode ser esperado.

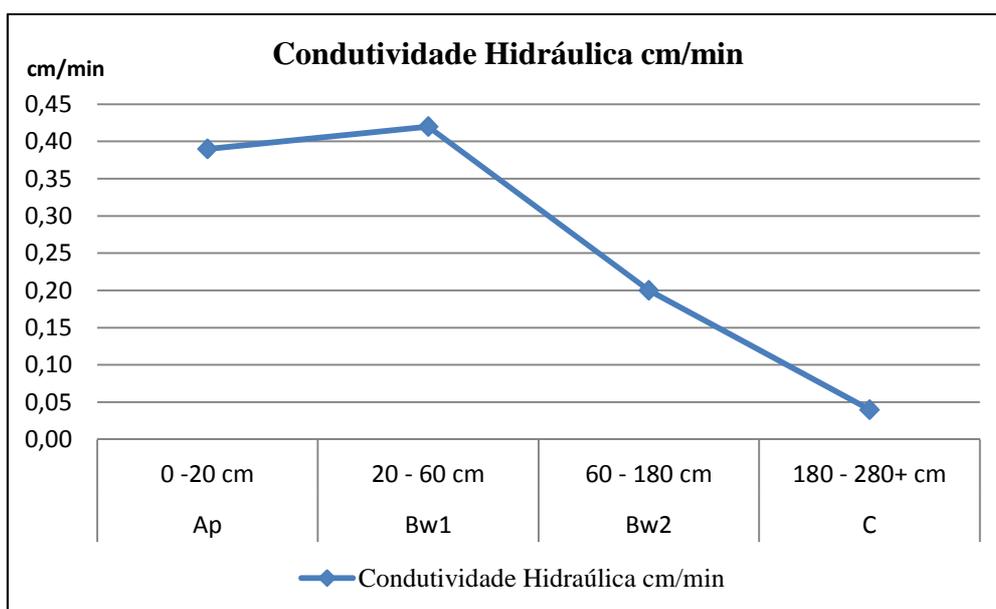


Figura 32 - Valores de Condutividade Hidráulica Saturada e suas diferentes entre os horizontes.

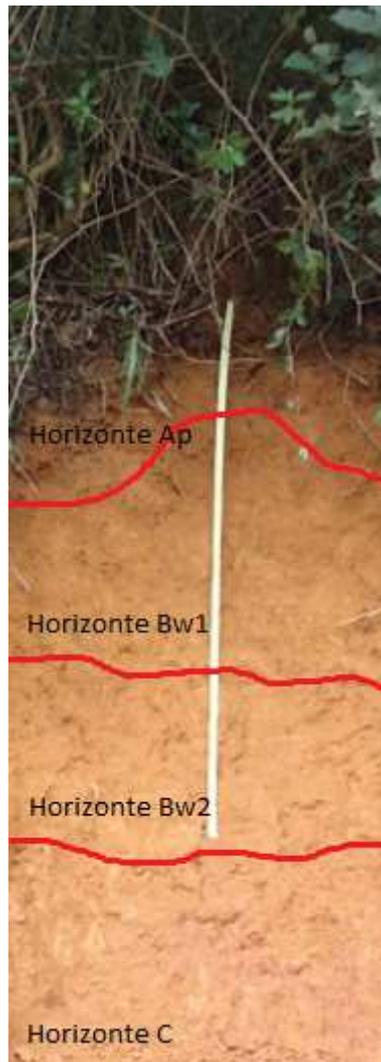


Figura 33 – Imagem do perfil de solo espesso e homogêneo.

Em relação os maiores e menores valores de K_{sat} , o horizonte Bw1 com as maiores taxas de macroporos obtidos, $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para a profundidade de 20 – 60 cm, do Bw1, estão diretamente relacionados aos maiores valores de K_{sat} com $0,42 \text{ cm}/\text{min}$. O efeito da estrutura e em especial dos poros grandes, torna possível que um solo argiloso possa exibir valores de condutividade hidráulica semelhantes aos arenosos (CARVALHO, 2002), ainda que os valores de argila sejam elevados nessas profundidades. A organização dos grãos do solo, a presença de raízes e a bioturbação verificadas ajudam a explicar a boa drenagem que essas profundidades apresentaram. Já o horizonte C apresentou o menor valor de K_{sat} , indicado por a amostra correspondente à profundidade a partir de 180 cm com os maiores valores de silte, segundo maior valor de areia fina, menor valor de areia grossa, e o menor valor de argila.

A K_{sat} de 0,04 cm/min, a menor do perfil, ajuda a explicar a baixa permeabilidade do horizonte C, justificada pela estrutura maciça e menor conteúdo de argila com seu plano de ruptura evidenciado na **Figura 34**. Isso mostra maior possibilidade de retenção de água em um evento pluviométrico intenso, bem como a maior possibilidade de ocorrer os eventos destrutivos (FURIAN et al., 1999).

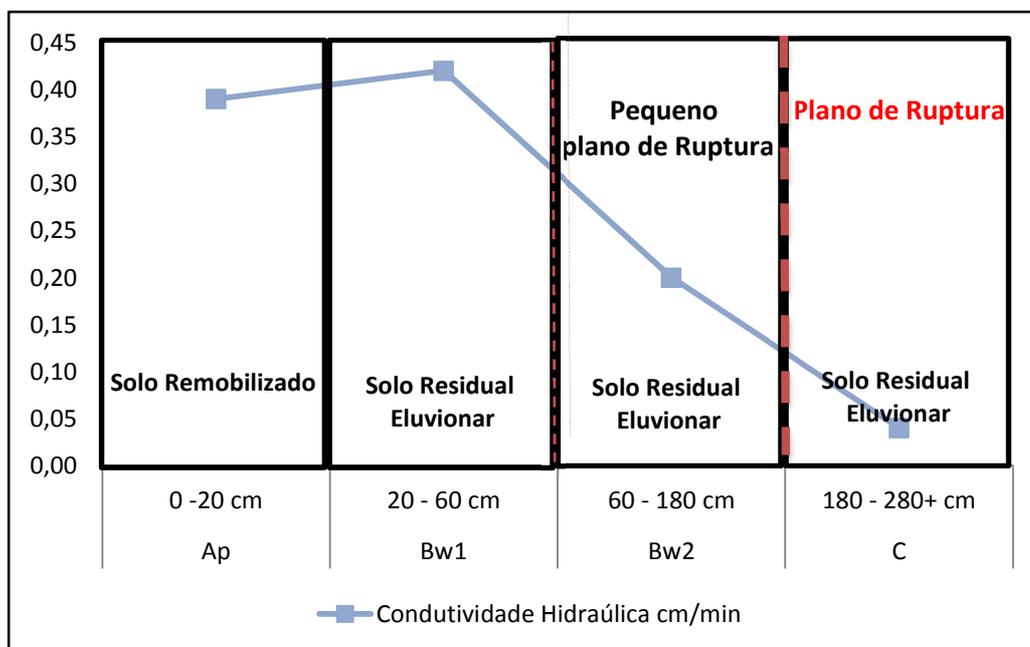


Figura 34 – Avaliação do Plano de Ruptura da vertente com base na Descontinuidade Hidráulica.

O evento de plano de ruptura em potencial é correspondente à análise registrada acima, pois a área com relação aos parâmetros morfométricos (densidade de drenagem, inclinação e hipsometria) possui grande susceptibilidade ao desencadeamento de movimentos de massa, e pelo perfil vertical e longitudinal o material do horizonte C (180 – 280 + cm) apresenta diversas descontinuidades já existentes, apontadas por georadar, e evidencia um possível abatimento de material no local, já apresentando ruptura longitudinal em 1 – 1,20 m em subsuperfície. A ruptura está sob influência das intervenções antrópicas que ocorrem no local, dos quais corte da vertente e trânsito de veículos pesados. O modelo de funcionamento da vertente aqui proposto representa a relação atuante entre homem/espço e suas reverberações processuais em eventos geomorfológicos catastróficos.

6 CONCLUSÃO

O estudo geomorfológico, por intermédio da análise do relevo e da morfodinâmica, mostra-se eficiente para evidenciar a susceptibilidade do meio antrópico a movimentos de massa. Este estudo enfatiza as características de um Latossolo Vermelho-Amarelo de uma área que apresenta evidências de trincas, creep e abatimento para explicar e contribuir com o conhecimento de estabilidade de um Latossolo e suas relações com a morfodinâmica atuante. O recorte espacial adotado permitiu aplicar técnica de pesquisa geomorfológica, geofísica, pedológica e da física dos solos, o que possibilitou compreender melhor o comportamento do relevo local, destacando como elementos principais a sua morfologia, morfometria e morfogênese.

A pesquisa seguiu os preceitos de uma pesquisa geomorfológica em estudo tripartite no seguinte formato:

- Avaliou a compartimentação topográfica com a modelagem de parâmetros topográficos da área mostrando que grande parte do contexto da sede de Santa Teresa (39,4% do município) se insere em condições potenciais de susceptibilidade média a movimentos de massa. O bairro de Vila Nova apresenta áreas com susceptibilidade de grau alto com perfil topográfico côncavo-convexo, amplitude topográfica acima de 100 m e hipsometria de 700 m de altitude, inclinação de 15% e densidade de drenagem entre 0,75 a 0,105 km com um valor de drenagem alto. A susceptibilidade de grau alto apresenta condicionantes de instabilidade do terreno com parcelamento vedado. No entanto, esta não é a realidade do bairro de Vila Nova, esta apresenta ocupações com cortes abruptos nas vertentes onde os parâmetros morfométricos podem ser danosos. A modelagem de dados morfométricos pela avaliação de multicritério foi validada em levantamento de campo e constatou evidências de áreas com instabilidade existente e susceptíveis a movimentos de massa.
- Sua estrutura superficial fundamentou-se no imageamento de subsuperfície por GPR em três perfis verticais e um longitudinal, mostrando a presença de possíveis discontinuidades hidráulicas com os abatimentos de massa de solo, as discontinuidades geológicas e atenuação do sinal por eixo preferencial de escoamento de água e blocos de rocha em subsuperfície. Tais elementos foram complementares quanto à investigação das discontinuidades hidráulicas do material associado à estabilidade máxima da vertente com a aplicação do

georadar. O emprego desta técnica de investigação trouxe importância e a validação dos eventos de descontinuidades ocorridos em subsuperfície, mostrando eficiência na avaliação da estrutura superficial da vertente no segundo nível de abordagem da pesquisa geomorfológica.

Ainda em análise de estrutura superficial, houve a descrição morfológica do perfil pedológico, caracterizando o material segundo os critérios do SiBCS (2013), bem como a avaliação física do solo, as quais foram fundamentais para se chegar às conclusões das descontinuidades existentes no solo, principalmente com a análise da condutividade hidráulica para fundamentar às conclusões de fisiologia da paisagem, que ajudaram a conhecer o comportamento do solo residual amostrado permitindo estabelecer as seguintes relações:

- O Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico de Santa Teresa (ES) é argiloso, caulínico e oxidado, sendo a estrutura do horizonte B latossólico em blocos subangulares e microagregados (granulares);
- No Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso de Santa Teresa, o horizonte B latossólico profundo, inferior ao horizonte C argiloso, possui a maior retenção de água na CC, e, a condutividade hidráulica saturada é maior no B latossólico superior, diminui no B latossólico inferior, e reduz drasticamente no horizonte C do perfil de solo. Dessa análise, conclui-se a existência de uma descontinuidade hidráulica a 180 cm de profundidade no solo;
- A descontinuidade hidráulica a 180 cm de profundidade está condicionada à redução de macroporos, aumento da densidade do solo, estrutura maciça e incremento de silte no horizonte C do solo;
- Em condições de saturação, a existência de duas descontinuidades hidráulicas no solo, uma a 60 cm e outra a 180 cm, aponta para um modelo hidrodinâmico em que até 60 cm prevalece um fluxo hídrico subsuperficial vertical intenso, passando de 60 cm a 180 cm a um fluxo hídrico subsuperficial vertical também intenso, porém menor, e ao surgimento de uma frente de saturação que pode ocorrer na base do horizonte Bw₂, próximo aos 180 cm de profundidade, sobre a camada de menor condutividade hidráulica saturada entre 180 e 280 cm correspondente ao horizonte C. Nessas profundidades podem ser desenvolvidas superfícies potenciais de ruptura. Como consequências, estão os abatimentos suaves e instabilidades nesses materiais submetidos a cortes.

A avaliação integrada dos elementos físicos e antrópicos com a morfodinâmica permitiram apresentar áreas mais susceptíveis a movimentos de massa, assim como destacar a potencialidade da área frente ao uso e ocupação, atentando-se para a fragilidade do bairro de Vila Nova e adjacências. Em relação ao aporte teórico-metodológico, destaca-se que a análise integrada da vertente contribui para a articulação entre os componentes da paisagem, de modo que seja possível espacializá-los. Essa abordagem, quando associada aos procedimentos geomorfológicos, de geofísica e de física do solo mostrou-se eficaz na interpretação e caracterização do comportamento hídrico de subsuperfície do Latossolo amostrado, sendo aplicado à fisiologia da paisagem voltada aos movimentos de massa.

Torna-se importante salientar que a análise de uso e cobertura identifica a tendência de expansão da ocupação residencial exatamente sobre as vertentes do bairro de Vila Nova, em resposta a escassez de terras planas na sede de Santa Teresa, realidade de muitos municípios da região serrana capixaba. A avaliação da susceptibilidade a movimento de massa é problematizada quando a ocupação crescente e desordenada acontece nessas áreas sem as devidas precauções ambientais. Neste caso, esta pesquisa contribuiu para melhorar o grau de confiabilidade do diagnóstico de susceptibilidade, buscando a realização de ações de planejamento ambiental e urbano por parte do poder público.

A metodologia e técnica apresentada mostraram-se eficientes na previsão das áreas susceptíveis a movimentos de massa, a continuidade deste trabalho permitirá a remontagem das condições naturais passadas, bem como gerar diferentes cenários futuros que possibilitem ao poder público redirecionar as ações de desenvolvimento urbano e ambiental no controle, mitigação e gerenciamento de áreas predisponentes a eventos de natureza destrutiva.

7 ANEXO

Síntese dos Resultados							
Susceptibilidade a Movimento de Massa				Ground Penetrating Radar (GPR)			
Grau Médio na Vertente de Análise				Evidências nos Perfis (transversal e longitudinal)			
Feição Morfológica	Amplitude Topográfica	Densidade de Drenagem	Inclinação	Ruptura de Solo	Abatimento Longitudinal	Eixos de Escoamento de Água	Blocos Rochosos
Colinas	< 100 m	0,45 - 0,75 km	12 - 15%				
Morfologia do Solo							
Descrição Morfológica		Química do Solo			Análise Mineralógica		
Minerais do grupo da caulinita e óxidos de ferro		Grau elevado de decomposição da argila do solo (Ki), Mesoférrico (Fe ₂ O ₃), Eletronegativo (Δ pH negativo) e CTC (Capacidade de Troca Catiônica) de atividade baixa			Frações de areia grossa e fina: predominantemente o mineral quartzo e 4% de feldspato nas areias finas do horizonte Bw1. Fração cascalho:		
Agregados pedológicos de blocos subangulares fracos e microagregados no horizonte Bw1 e de predominantemente microagregados no horizonte Bw2		Latosolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (saturação por bases baixa, < 50 %) e típico por não se incluir nas demais classificações (SiBCS, 2013).			predominantemente quartzosa, com poucos cascalhos e concreção ferruginosa.		
Física do Solo							
Relação Textural	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Relação Silte/Argila	Argila Dispersa em Água	Porosidade Total
Argilosa/ Muito Argilosa	Maior no horizonte Ap	Maior no horizonte Bw2	Maior no horizonte C	Maior no horizonte Bw1	Maior no horizonte C	Maior no horizonte Ap	Maior no horizonte Bw1
Microporosidade	Macroporosidade	Densidade do Solo	Curva de Retenção da Água no Solo		Condutividade Hidráulica Saturada		
Maior no horizonte C	Maior no horizonte Bw1	Maior no horizonte C	Elevada retenção no horizonte Bw2 e baixa em C		Descontinuidade 1: fluxo vertical entre o horizonte Bw1 e Bw2 Descontinuidade 2: fluxo horizontal de maior expressão entre o horizonte Bw1 e o C		

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB´SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AB´SÁBER, A. N. **Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário**. Geomorfologia. n. 18, IG-USP, S. Paulo, 1969.

ABREU, A. A. de. **Análise geomorfológica: reflexão e aplicação**. Tese (Livredocência) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2002. 211p.

AHRENDT, A.; ZUQUETTE, L. V. **Triggering factors of landslides in Campos do Jordão city, Brazil**. Bull. Eng. Geol. Environ 62, 231-244, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-3080: Standart test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**, 1998.

AMOOZEGAR, A. **Comparison of the Glover solution with the simultaneous equations approach for measuring hydraulic conductivity**. Soil Science Society of America Journal, v. 53, n° 5, 1989. p. 1362-1367.

ARANHA, P. R. A. e AUGUSTIN, C. H. R. R. **Utilização do GPR para auxiliar na compreensão da evolução da paisagem: estudo de caso do Parque Estadual Veredas do Peruáçu: MG, Brasil**. Para Desenvolver a Terra: Memórias e Notícias de Geociências no Espaço Lusófono. Imprensa da Universidade de Coimbra, 2012.

AUGUSTO FILHO, O. and J. C.VIRGILI. **Estabilidade de Taludes**. In ABGE (ed) Estabilidade de Taludes. ABGE, São Paulo, pp. 243-269, 1998.

BAGARELLO, V.; PROVENZANO, G. **Factors affecting field and laboratory measurement of saturated hydraulic conductivity**. Transactions of the ASAE, v. 39, n°1, 1996. p. 153-159.

BELTRAME, A. V. **Estudo das propriedades físicas do solo, visando conhecer seu funcionamento hídrico (Sorocaba do Sul/Biguaçu/SC)**. Tese de doutorado, Pós-graduação da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

BIGARELLA J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2. Ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2007. 1436 p. 3. V.

BIGARELLA, J. J; MOUSINHO, M. R.. & SILVA, J. X. **Pediplanos pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil**. Boletim Paranaense de Geografia, UFPR. Curitiba, n.16/17, p.117-151, 1965.

BIGARELLA, J.J & MOUSINHO, M. R. **Contribuição ao estudo da Formação Pariquera-Açu**. Bol. Paran. Geogr., Curitiba, 16/17: 17-42, 1965b

BLOOM, A. L. **Superfície da Terra**. São Paulo: Blucher, 1972.

BOUMA, J.; JONGMANS, A.; STEIN, A. **Characterizing spatially variable hydraulic properties of a boulder clay deposit in the Netherlands**. Geoderma, 45: 19-29, 1989.

BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos/** Nyle C. Brady, Ray. R. Weil; tradução técnica: Igor Fernando Lepsch. – 3° ed. – Porto Alegre: Bockman, 2013.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedade dos solos.** Freitas Bastos, Rio de Janeiro: 878p, 1989.

CARVALHO, L. A. de. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo.** Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 98p, 2002.

CARVALHO, M. A. **Retenção de água e outros atributos físicos de agregados de um latossolos vermelho-escuro.** Tese de doutorado do Curso de Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa, 1998.

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo/** Valter Casseti – São Paulo: Contexto, 1991.

CASSETI, V. **Geomorfologia.** [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 02/02/2015.

CAUS, F. M. **Proposta de análise empírica da instabilidade potencial do relevo em estudos integrados.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Vitória, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. 1936. **Geomorfologia.** São Paulo, Edgard Blucher, 2. Ed, 1980.

CORDEIRO, J. S.; FERREIRA, F. F.; ARANHA, P. R. A.; COSTA, R. D.; SILVA FILHO, J. A. **Aplicação de GPR e Cintilometria para a caracterização de descontinuidades estruturais e litológicas na porção leste da serra do Cantagalo, São Tomé das Letras (MG).** GEONOMOS 15(2): 21- 31, 2007.

CPRM, Serviço Geológico do Brasil. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a enchentes e movimentos de massa, Santa Teresa – ES.** Ministério de minas e energia/ secretaria de geologia, mineração e transformação mineral, 2012.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Folha Colatina SE-24-Y-C-IV.** Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1990.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geológico do estado do Espírito Santo.** Ministério de Minas e Energia. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral. 2013.

CRUZ, O. **Estudo dos processos geomorfológicos do escoamento pluvial na área de Caraguatatuba** – São Paulo. Tese de Livre Docência, FFLCH-USP, São Paulo, 1982.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A, J, T. **Degradação Ambiental.** In: Geomorfologia e Meio Ambiente/ Antônio José Teixeira Guerra e Sandra Baptista Cunha (organizadores). 2 ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 372 p.

CURMI, P. **Comportement physique intrinseque de mottes à macroporosité différente.** In: MONIER, G. & GROSS, M. J. Eds., Soil compaction and regeneration. Proc. Of the workshop on soil compaction: consequences and structural regeneration processes. 1985. Avignon, France. Balakema, Pub. 53-58, 1987.

- CURMI, P. **Relação entre o espaço poral do solo e seu funcionamento hídrico.** In: A responsabilidade social das ciências do solo. Coord. Antônio C. Moniz, A. M. C. Furlani, P. R. Furlani, S. S. Freitas – XXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Campinas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. P. 447-457, 1988.
- DALRYMPLE, J.B., BLONG, R. J, CONACHER, A. J. **A hypothetical nine unit land surface model.** Zeitschrift fur Geomorphologie (1968), 12 (1), pp. 60-76.
- DAVIS, W. M. **The Geographical cycle.** Journ. Londres, 14(5): 481-504, 1899.
- DE PLOEY, J e CRUZ, O. **Landslides in the Serra do Mar, Brazil.** Catena 6, 11-112, 1979.
- DIAB, M.; MEROT, P & CURMI, P. **Water movement in a Glossaqualf as measured by two tracers.** Geoderma, 43: 1-19, 1988.
- DIETRICH, W. E. and T. DUNNE. **Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain.** 29: 191-206, 1978.
- DOURADO NETO, D; NIELSEN, D, R; HOPMANS, J, W; REICHARDS, K. **Programa SRWC.** Piracicaba, São Paulo, 2001.
- DUCHAUFOR, P. **Pédologie.** Masson S. A. Éditeur. 219 p. Paris, 1984.
- DUNNE, T.; ZHANG, W.; AUBRY, B. F. **Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff.** Water Res. Research, v.27 (9): 2271-2285, 1991.
- DYLIK, J. **Notion du versant en geomorphologie.** Bull. Acad. Pol. Sci. Série des Sc. Geol. Geogr., 16(2): 125-132, 1968.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. – Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solos.** 2. Ed – Rio de Janeiro, 1997 e 2011. 212 p.: il.
- Estimativa de permeabilidade e condutividade hidráulica de acordo com diferentes materiais (FREEZE e CHERRY, 1979).** Disponível em: <http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11146&page=38> Acessado em 08/01/2015.
- FAIRBRIDGE, R. W. **The encyclopedia of geomorphology.** Nova York, Reinhold Book Corporation, 1968.
- FERNANDES, N. F, GUIMARÃES, R, F, GOMES, R, A, T. VIEIRA, B, C. MONTGOMERY, D, R e GREENBERG, H. **Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis.** Revista Brasileira de Geomorfologia, Volume 2, n° 1 (2001) 51 – 71, 2001.
- FERNANDES, N. F., A. L. COELHO NETTO and W. A. LACERDA. **Subsurface Hydrology of Layered Colluvium Mantles in Unchannelled Valleys - Southeastern Brazil, 1994.** Earth Surface Processes and Landforms 19: 609-626, 1994.
- FERNANDES, N. F., R. F. GUIMARÃES, R. A. T. GOMES, B. C. VIEIRA, D. R. MONTGOMERY AND H. GREENBERG. **Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling.** Catena 55: 163-181, 2004.

- FERNANDES, N. F.; GOMES, R, A, T.; CARVALHO JUNIOR, O, A.; GUIMARÃES, R, F. **Movimentos de Massa**. In: Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais/ Teresa Gallotti Florenzano (org.). – São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- FERREIRA, J. T. P. et al. **Avaliação da fertilidade dos solos cultivados com café Conilon (Coffea canephora) no município de Santa Teresa – ES**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, N.16; p. 356-366, 2013.
- FERREIRA, M. M. **Caracterização Física do Solo**. In: Física do Solo./ Editor: Quirijn de Jong van Lier. – Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. **Influência da fração mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região Sudeste do Brasil**. R. Bras. Ci. Solo, 23:515-524, 1999b.
- FERREIRA, P.A. **Drenagem de terras agrícolas**. Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2002. 211p.
- FLORENZANO, T. G. **Introdução à Geomorfologia**. In: Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais/ Teresa Gallotti Florenzano (org.). São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- FREDLUND, D. G. **Slope stability analysis incorporating the effect of soil suction**. In Anderson, M.G. e Richards, K.S (eds.) Slope Stability. John Wiley, Chichester: 113-144, 1987.
- FREEZE, R. A; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, Prentice Hall: 604p, 1979.
- FREITAS, R. C.A. **Argila dispersa em água determinada por agitação rápida, lenta e ultrassom**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas- Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 63p, 2011.
- FURIAN, S.; BARBIÉRO, S. e BOULET, R. **Organisation of the soil mantle in tropical southeastern Brazil (Serra do Mar) in relation to landslides processes**. Catena 38. 65-83, 1999.
- GILBERT, G.K. **The geology of the Henry Mountains**. Washington, United States Geographical and Geological Survey, 1877.
- GOMES, M. C. V. **Análise da influência da condutividade hidráulica dos solos nos escorregamentos rasos na bacia do rio Guaxinduba (SP)**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. – São Paulo, 2012.
- GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo – GEOBASES**. <Disponível em: <http://www.geobases.es.gov.br/portal/> Acesso em: 22 de mar. de 2015>.
- GUERRA, A, J, T. **Encostas Urbanas**. In: Geomorfologia Urbana/ Antônio José Teixeira Guerra (org.). – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 280 p.
- GUIDICINI G.; NIEBLE C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo, E. Blücher, 196 p. 1983.
- GUIMARÃES, R. F., B. C. VIEIRA, R. A.T. GOMES and N. F. FERNANDES. **Avaliação Estatística de Parâmetros Fito-Morfológicos nas Cicatrizes dos**

Movimentos de Massa da Bacia do Rio Quitite, Jacarepaguá (RJ). In XL Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte/MG: 417, 1998.

HARP, E. L.; WELLS II, W. G.; SARMENTO, J. G. **Pore pressures responses during failures soils.** Geological Society of America Bulletin, 102: 428-438, 1990.

HORTON, R.E, 1945. **Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology.** Bulletin of the Geological Society of America 56, 2 75-3 70. Progress in Physical Geography December 19: 533-554, 1995.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Informações sobre os municípios brasileiros.** < Http://cidades.ibge.gov.br> Acessado em 16/02/2015.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra.** Ministério do planejamento, orçamento e gestão. 3º edição. Rio de Janeiro, 2013.

IEMA – Instituto Estadual de Meio Ambiente. **Ortofotomosaico 2012-2015.** Vitória, 2016.

IJSN. Instituto Jones dos Santos Neves. **Mapeamento Geomorfológico do Espírito Santo.** Vitória, ES, 2012.

IMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados da Estação Santa Teresa A613.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas> Acessado em 17/02/2015.

INCAPER. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Caracterização climática do município de Santa Teresa.** Disponível em: <http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/caracterizacao/santateresa.php> Acessado em 17/02/2015.

INCAPER. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Programa de Assistência Técnica e Extensão Rural Proater 2011-2013 Santa Teresa.** Secretaria de agricultura, abastecimento, aquicultura e pesca. Vitória, 2011.

KELLER, G.V. **Rock and mineral properties.** Investigations in Geophysics, n°3. Eletromagnetic Methods and Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v. 1, p. 13-51.

KING, L. C. **Canons of landscape evolution.** Bull. Geol. Soc. Amer., 64(7): 721-752, 1953.

KOHNKE, H & FRANZMEIER, D. **Soil science simplified.** Prospect Heights, Waveland Press, 162 p. 1995.

LARCEDA, W. A., O. F. SANTOS. Jr. and M.EHRLICH. **Efeitos das Variações de Poro-Pressão sobre a Estabilidade de Encostas em Solos Residuais.** In 2a Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas/2nd Pan-American Symposium on Landslides, Rio de Janeiro: 381-388, 1997.

LEE, D. M.; REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; CLOTHIER B.E. **A comparison of three techniques for measuring saturated hydraulic conductivity.** Canadian Journal of Soil Science. v.65, n°3, 1985. p.563-573.

Lei: Lei Federal n° 6.766, de dezembro de 1979 (considerando alterações);

LIBARDI, P. L. **Água no solo.** In: Física do solo/ editor Quirijn de Jong van Lier. – Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**/ Paulo Leonel Libardi – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

MACIEL JUNIOR, O. C. **Estudo de Movimentos de Subsidência na Região Central de São João Del Rei – MG**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

MANFREDINI, S.; PADOVESE, P. P.; OLIVEIRA, J. B. **Efeito da composição granulométrica da fração areia no comportamento hídrico de Latossolo de textura média e Areias Quartzosas**. Ver. Bras. Ci. Solo – vol. 8. Soc. Bras. Ci. Solo. Campinas. P. 13-16, 1984.

MARQUES, J. D. O.; TEXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; CRUZ JUNIOR, O.F.; MARTINS, G. C. **Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas**. Acta Amazonica. Vol. 38(2) 193-206, 2008.

MEIS, M. R. M., A. L. COELHO NETTO and J. R. S. MOURA. **As descontinuidades nas formações colúviais como condicionantes dos processos hidrológicos e de erosão acelerada**. In: Simpósio Nacional de Controle à Erosão. ABGE, Maringá-PR: 179-189, 1985.

MEIS, M.R.M. & MOURA, J.R.S. 1984. **Upper Quaternary Sedimentation and Hillslope Evolution: SE Brazilian Palteau**. Am. J. Sci., 284:241-254.

MENEZES, S. M.; SAMPAIO, F. M. T.; RIBEIRO, K. D. **Estudo da condutividade hidráulica relacionada com alguns parâmetros físicos do solo**. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica/ IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas/ III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Curitiba: 149-153 2006^a.

MIQUELETTO, M. **Desenvolvimento de procedimentos numéricos para análise de infiltração e estabilidade de taludes em bacias de drenagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MODENESI, M. C. **Evolução Quaternária de Uma Montanha Tropical: O Planalto de Campos do Jordão – São Paulo**. Rev. IG, São Paulo, 5 (1/2): 7-13, Jan. /dez. 1984.

MODENESI, M. C. **Um conceito de Geomorfologia a serviço das pesquisas do Quaternário**. In: A Obra de Aziz Nacib Ab'Sáber/ Org: May Christine Modenesi-Guattieri; Andrea Bartorelli; Virginio Mantesso-Neto; Celso dal Ré Carneiro; Matias Barbosa de Andrade Lima Lisboa. São Paulo: Beca-BALL edições, 2010.

MOHANTY, B.P.; KANWAR, R.S.; EVERTS, C.J. **Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil**. Soil Science Society of América Journal, 58(3): 672-677 1994.

MOURA, J. R. S.; PEIXOTO, M. N. O.; SILVA, T. M. **Geometria do Relevo e Estratigrafia do Quaternário como Base à Tipologia de Cabeceiras de Drenagem em Anfiteatro – Médio Vale do Rio Paraíba do Sul**. Revista Brasileira de Geociências. 21 (3): 255-265 setembro de 1991.

NETO, P. X. **Processamento e interpretações de dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém – CE**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte –

Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Tese de Doutorado. Natal, 2006.

OLIVEIRA, L. A.; GONÇALVES, R.M.; MARTINS, F.P. **Contraste de condutividade hidráulica em solos de textura arenosa e argilosa encontrados nos tributários da margem esquerda do rio Tijuco, município de Ituiutaba, Estado de Minas Gerais, Brasil.** Revista Caminhos de Geografia. v. 11, p. 230-243, n. 33. 2010.

PARIZZI, M. G.; SOBREIRA, F. G.; GALVÃO, T. C de B.; ARANHA, P. R. A.; ELMIRO, M. A. T.; BERIGO, E, A. **Processos de Movimentos de Massa em Belo Horizonte.** Revista Geografias. Belo Horizonte, 2010.

PENCK, W. **Die morphologische Analyse.** Stuttgart, J. Engelhorn's Nachf, 1924.

PHILIP, J. R. **Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil - Water.** Resources Research. v. 21, n°7, 1985. p.1025-1033

PMRR. **Plano Municipal de Redução de Risco Geológico e Plano Diretor de Águas Pluviais/Fluviais de Santa Teresa.** Avantec Engenharia/ Zemlya consultoria e serviços. Alfredo Chaves – ES, 2014.

RADAMBRASIL. **Folha SE. 24 Rio Doce: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra/** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. – Rio de Janeiro: IBGE, 1987.

REICHARDT, K. **Capacidade de Campo.** R. bras. Ci. Solo, 12: 211-216, 1988.

RESENDE, M. **Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação dos solos.** Inf: Agropec., 128:3-18, 1985.

RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A, F, C.; e BRAGA, J, M. **Mineralogia da argila de Latossolos estimada por alocação a partir do teor de óxidos do ataque sulfúrico.** R. Bras. Ci. Solo, 11:17-23, 1987.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. **A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationships.** Ground Water Monitoring. Rev. V.6 (1), 1986. P.84-95

RUHE, R. V. **Geomorphic processes and surficial geology.** In: Geomorphology. Boston, Houghton Mifflin Company. 246 p, 1979.

RUIZ, H. A. **Física dos Solos: Granulometria, Estrutura e Consistência.** Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos, 2009.

RUIZ, H. A. **Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila).** R. Bras. Ci. Solo, 29:297-300, 2005

RUIZ, H. A. **Métodos de Análises de Física dos Solos.** Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos, 2004.

RUIZ, H. A., FERREIRA, G. B. & PEREIRA, J. B. M. **Estimativa da capacidade de campo de latossolos e neossolos quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade.** R. Bras. Ci. Solo, 27:389-393, 2003.

SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 5° ed. Revista e ampliada Viçosa, Sociedade Brasileira de Solo, 2005.

- SELBY, M. J. **Hillslope: materials & processes**. Oxford: Oxford University Press, 446 p. 1993.
- SHOAEI, G. e SIDLE, R. C. **Variation in soil characteristics and hydrologic properties associated with historic land use near a recent landslide, Nagano Prefecture, Japan**. *Geoderma*, 153: 37-51.
- SIDLE, R. C., A. J. Pearce and C. L. O'Loughlin. **Hillslope stability and land use**, Washington, 1985.
- SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBURQUEQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. **Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes condições de preparo**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.35, n.3, p. 544-552, mai-jun, 2005.
- SILVA, R.P.; MACHADO, K.M.; SATO, A.M.; COELHO NETO, A.L.; BECKER, L.B.; SILVA JÚNIOR, G.C.; LACERDA, W.A.; PITA R.C.S. **Comportamento Hidrológico de Encosta em Substrato Rochoso Granítico sob Influência de Deslizamento Raso – Nova Friburgo, Rio de Janeiro**. *REVISTA GEONORTE*, Edição Especial 4, V.10, N.1, p.199-205, 2014.
- SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. **Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.10, n.4, p.842-847, Campina Grande, PB, DEAg/UFCG. 2006
- SILVEIRA, C.S.; RAMOS, J. A. S. **Análise Espacial com SIG de parâmetros ambientais e comportamento hidrológico (chuva-vazão) de uma bacia de drenagem montanhosa na serra dos órgãos: Bacia do Paquequer, Município de Teresópolis, RJ**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.8, n.1, p.23-34, 2007.
- SISTEMA BARSILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS/** Humberto Gonçalves dos Santos [et al.]. 3 ed. ver. ampl. – Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.
- SOTO, M. A. A. **Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), Brasil, 1999. 123p.
- SOUZA, M. M. **Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.
- TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. **Desempenho do Tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e Condutividade Hidráulica do solo**. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, n. 2, p. 161-168, 2005.
- TEIXEIRA, W.G. **Land use effects on soil Physical and Hydraulic Properties of a Clayey Ferralsol in the Central Amazon**. University of Bayreuth. Bayreuth – Alemanha Tese de Doutorado. 255p, 2001.
- TORRES, F. T. P. **Introdução à geomorfologia/** Fillipe Tamiozzo Pereira Torres, Roberto Marques Neto e Sebastião de Oliveira Menezes. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- TRICART, J. **Mise en point: l' evolution des versants**. *L'information géographique*, (21): 108-115, 1957.
- TROEH, F. R. **Landform equations fitted to contour maps**. *Soil Science Society American Journal*. New York, v.263, p.616-27. 1965.

- VAN GENUCHTEN, M. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Sci. Soc. Am. J.44: 892–898, 1980.
- VIEIRA, B. C. and N. F. FERNANDES. **Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity.** Hydrological Processes 18: 791-805, 2004.
- VIEIRA, B. C. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas.** Rio de Janeiro, 2007. 193p
- VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. **Análise qualitativa de fatores condicionantes de escorregamentos rasos a partir de um modelo de previsão de áreas de risco.** In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 9, São Paulo, Anais, CDrom, 15p, 1999.
- VIEIRA, S.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. **Spatial variability of field-measured infiltration rate.** Soil Science Society of America Journal, 45: 1040-1048, 1981.
- WHIPKEY, R. Z. e KIRKBY, M. J. **Flow within the soil.** In: M. J. Kirkby (Ed.). Hillslope Hydrology. New York: John Wiley & Sons. Flow within the soil, p.121-143. 1978.
- WIDIATMAKA, P. THIBAUD. **Analyse Structurale d'un Versant Granitique (Massif de Quintin, Bretagne).** Approaches macroscopique, microscopique et physico-hydrigue. SDS 1 n° 418, Septembre. Ecole National Superieure Agronomique de Rennes/INRA. Rennes. P.31-77.
- WOLLE, C. M. and C. S. CARVALHO. **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil.** Solos e Rochas: 27-36, 1989
- WOLLE, C. M. and C. S. CARVALHO. **Taludes Naturais.** In F. F. Falconi and A. N. Jr. (eds), Solos do litoral de São Paulo. Associação Brasileira de Mecânica de Solos - Núcleo Regional de São Paulo - ABMS, São Paulo, pp. 180-203, 1994.