

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRYELLE ZANON

**MOVIMENTOS DE MASSA NAS ENCOSTAS DO RIO SOTURNO ÀS
MARGENS DA RS-149- FAXINAL DO SOTURNO, RS**

Caçapava do Sul

2021

GABRYELLE ZANON

**MOVIMENTOS DE MASSA NAS ENCOSTAS DO RIO SOTURNO ÀS
MARGENS DA RS-149- FAXINAL DO SOTURNO, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Rafael Matias Feltrin

Co-orientadora: Prof^a. Andrea Valli
Nunmer (UFSM)

Caçapava do Sul

2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

Z33m Zanon, Gabryelle Movimentos de massa nas encostas do Rio
Soturno às margens da RS-149- Faxinal do Soturno, RS /
Gabryelle Zanon. 76 p.

Tese(Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA,
2021.

"Orientação: Rafael Feltrin".

1. Geologia. 2. Geotecnia. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

GABRYELLE ZANON

**MOVIMENTOS DE MASSA NAS ENCOSTAS DO RIO SOTURNO ÀS
MARGENS DA RS-149- FAXINAL DO SOTURNO, RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia
da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 07 de maio de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael Matias Feltrin

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Jose Waldomiro Jimenez

Rojas

Geóloga Haline Dugolin Cecatto

UFSM



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MATIAS FELTRIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/05/2021, às 13:37, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as norma vas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 12/05/2021, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as norma vas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Haline Dugolin Ceccato, Usuário Externo**, em 13/05/2021, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as norma vas legais aplicáveis.



A auten cidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0523805** e o código CRC **612EBF1E**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de muitas horas de dedicação, e não teria sido possível sem a ajuda de algumas pessoas. Por isso gostaria de agradecer aos que contribuíram para que isso fosse possível.

Agradeço, primeiramente à Universidade Federal do Pampa, a todos os professores que tive ao longo dessa trajetória por todo o conhecimento compartilhado, aos técnicos e aos terceirizados. À Universidade Federal de Santa Maria, especialmente ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), local em que realizei os ensaios deste trabalho.

De modo especial, agradeço ao meu orientador, Professor Rafael Matias Feltrin, pelas orientações, pela paciência, pelos conselhos e por toda ajuda durante este trabalho. À minha co-orientadora, Professora Andrea Valli Nummer, agradeço a confiança depositada a mim, por todo o tempo que dedicou à esta pesquisa, o apoio e sabedoria compartilhados.

Agradeço, especialmente a Geóloga Haline Dugolin Ceccato, por todo o conhecimento compartilhado e pela ajuda ao longo de todo o trabalho.

Aos professores que aceitaram fazer parte da banca, pela disponibilidade e pelos conhecimentos agregados à pesquisa.

Os amigos que fiz ao longo dessa trajetória, Ana Paula Tavares, Bruno Teixeira Campos, Eduarda Dalla Nora Pauli, Guilherme de Avila Bitencourt e Greisi Aline de Azeredo, obrigada.

Por último, e com certeza os principais responsáveis por tudo, meus pais Diego e Marinês, sem eles nada seria possível, obrigada por toda a confiança, amor e apoio que sempre tiveram comigo. À minha irmã Emanuelle, que essa conquista sirva de exemplo e incentivo para você. E claro, meu namorado Carlos Augusto, obrigada por sempre estar ao meu lado. Que um dia eu possa retribuir tudo que fazem por mim, amo vocês. Obrigada.

RESUMO

Movimento de Massa, também conhecido como escorregamento, deslizamento, ruptura de talude, refere-se aos movimentos de descida de solos e rochas em função da força da gravidade, geralmente agravados pela ação da água. No Brasil esse processo é muito comum em função do grande índice pluviométrico em algumas regiões. Porém as atividades humanas vêm agravando essa situação. Cortes em talude, aterros, modificações na drenagem e desflorestamento de encostas, são exemplos de práticas que aceleram este processo de movimento de massa e vulnerabilizam áreas de encostas, como é o caso da área de estudo deste trabalho. Levando em consideração estes aspectos este trabalho teve como objetivo principal estudar e compreender os movimentos de massa que ocorreram e podem vir a ocorrer nas encostas do Rio Soturno, às margens da RS-149, principal rodovia de acesso entre os municípios de Nova Palma e Faxinal do Soturno, na região central do Rio Grande do Sul. A encosta onde o estudo foi realizado encontra-se coberta por material coluvionar, e apresenta evidências de movimentos de rastejo mais antigos. Seu substrato é composto pelos arenitos da Formação Caturrita e Formação Botucatu. O trabalho contou com a análise geológica da área, realizada através de mapeamento geológico, com a análise de imagens de satélite e de estudos anteriores, buscando compreender o processo ao longo dos anos, por fim foram realizados ensaios de cisalhamento direto, buscando compreender os parâmetros de resistência dos materiais presentes no terreno. Foi constatado que ocorrem, há muitos anos, na região da ruptura, movimentos de massa classificados como rastejo, movimentos estes que transformam a topografia, influenciando diretamente no sistema de drenagem das águas nas encostas. Os parâmetros de resistência obtidos através dos ensaios de cisalhamento direto, indicam que a rocha apresenta grande heterogeneidade em suas características, como granulometria, cimentação e composição. Tudo indica que a ruptura ocorreu devido à soma de vários fatores. Primeiramente, o contexto geológico do local, que proporciona uma condição favorável a estes movimentos, pois o local encontra-se sobre o contato entre duas rochas de origem sedimentar, além de estar em uma zona de falha. Além disso, o sistema de drenagem da rodovia não é suficiente para a demanda de água, o que contribui para a instabilidade deste local.

Palavras-Chave: ruptura, rodovia, geologia.

ABSTRACT

The movement of masses, also known as slippery, sliding, slope rupture, refers to movements descending from swamps and rocks due to the severity of gravity, generally aggravated by water action. In Brazil, this process is very common due to a high level of rain in some regions. However, like human activities, they aggravate this situation. Slope cuts, embankments, changes in coastal drainage and deforestation are examples of practices that accelerate this process of mass movement and make vulnerable coastal areas, as is the case in the study area of this work. Having in mind these aspects, the main objective of this work is to study and understand the movements of masses that occur and can circulate along the edge of the Soturno river, the RS-149 rails, the main access route between the municipalities. of São Paul. . . Nova Palma and Faxinal do Soturno, in the central region of Rio Grande do Sul. On the coast, the study carried out, it is found that it is covered by colluvial material, and shows signs of movement with more ancient features. Su sustrato y la favoración de peludo de la Formación Caturrita y la Formación Botucatu. The work continues with the geological analysis of the area, carried out through the geological map, with the analysis of satellite images and previous studies, seeking to understand the process in a period of years, and for the first time evaluation tests were carried out. direct. Try to understand the resistance parameters of the materials not connected to the earth present. It has been found that, for many years, in the region of rupture, mass movements have occurred that have been cataloged as traces, movements that have transformed the topography, directly affecting the drainage system of the surrounding waters along the coast. The resistance parameters obtained through the direct Indian analysis tests that the stone presents a great heterogeneity in its characteristics, such as granulometry, cementations and composition. Everything indicates that hubo averia for several factors. Firstly, this is the geological context of the site, which gives it a favorable condition for these movements, since the site is ubiquitous on the contact between rocks of sedimentary origin, in addition to being in a fall zone. Furthermore, the drainage system of the truck is not sufficient for the demand for water, which contributes to local instability.

Keywords: rupture, path, geology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Figura ilustrando um esquema de rastejo.	21
Figura 2- Figura esquemática dos tipos de escorregamentos.....	23
Figura 3- Figura de um pequeno esquema de queda de blocos.	24
Figura 4- Figura evidenciando corrida de massa.	25
Figura 5- Condição de ruptura por escorregamento.....	26
Figura 6- Mapa de localização da área de estudo.....	29
Figura 7 - Imagem de Satélite atual do local onde ocorreu o escorregamento.	30
Figura 8- Mapa Geológico da região da área de estudo.	32
Figura 9- Arcabouço litoestratigráfico da área de estudo.	33
Figura 10- Localização dos perfis geofísicos realizados na área.	35
Figura 11- Perfil 1 e 2.....	35
Figura 12- Interpretação dos perfis geofísicos.	36
Figura 13- Situação na rodovia em 2012, antes do deslizamento.....	37
Figura 14- Ruptura do asfalto em 2015.....	38
Figura 15- Foto da rodovia no ano seguinte ao deslizamento, 2016.	39
Figura 16- Foto do local em 2018, com o desvio asfaltado.	39
Figura 17- Foto da rodovia em 2019.	40
Figura 18- a) Foto tirada em abril de 2021, local onde a rodovia cedeu. b) Trinca no asfalto a cerca de 50m do deslizamento.	41
Figura 19 - Fotos tiradas durante a saída de campo.....	43
Figura 20- Amostras retiradas em campo.	43
Figura 21- Retirada da amostra.....	44
Figura 22- a) Bloco de rocha utilizado para retirada das amostras para a realização dos ensaios de cisalhamento direto. b) Etapa de molde dos anéis para o ensaio. c) Etapa de molde dos anéis. d) Anéis moldados, antes de serem submetidos à câmara úmida. e) Anel pré moldado para o ensaio. f) Anel já pronto para o ensaio.....	45
Figura 23- Prensa utilizada para o ensaio de cisalhamento.....	47
Figura 24- Caixa bipartida onde a amostra é colocada para o ensaio.	47
Figura 25- a) Corpo de prova após o ensaio na condição natural. b) Corpo de prova após o ensaio na condição inundada.	48
Figura 26- Mapa topográfico da região, indicando a porção da encosta cujo plano de curvatura é côncavo.	49
Figura 27- a) Afloramento do Arenito Caturrita. b) Amostra do Arenito Caturrita retirada em campo.	50
Figura 28- a) Arenito Caturrita com interclastos de rocha. b) retirado do Arenito Caturrita.....	51
Figura 29- a) Arenito Botucatu aflorando na estrada. b) Amostra do Arenito Botucatu retirada em campo.	51
Figura 30- Sills basálticos da Formação Serra Geral.	52
Figura 31- Imagem de satélite indicando a encosta e o local da ruptura.	53

Figura 32- Encosta recoberta por solo coluvionar com blocos de rocha.	53
Figura 33- a) Trecho há cerca de 100m antes da ruptura da rodovia, onde já é possível observar um rebaixamento na pavimentação. b) Trincas no asfalto, 100m depois da ruptura.	54
Figura 34- Encosta oposta à rodovia, onde é possível observar os degraus de abatimento (2020).	55
Figura 35- Encosta oposta à rodovia, onde é possível observar os degraus de abatimento (2021).	55
Figura 36- Imagem de satélite do ano de 2006, evidenciando o local onde está ocorrendo o processo de rastejo.	57
Figura 37- Imagem de satélite tirada em 2009, do local onde, em 2015, houve a ruptura da rodovia.	57
Figura 38- Imagem de satélite tirada em 2013, do local onde, dois anos depois, houve a ruptura da rodovia.....	58
Figura 39- Imagem de satélite do ano de 2018, evidenciando o local onde está ocorrendo o processo de rastejo.	59
Figura 40- Imagem de satélite do ano de 2019, da área de estudos, quatro anos após a ruptura da rodovia.....	59
Figura 41- Imagem de satélite da atual situação da área de estudo.	60
Figura 42- Amostra paralela às camadas, na condição natural.....	63
Figura 43- Amostra paralela às camadas, na condição natural.....	63
Figura 44- Amostra paralela às camadas, na condição inundada.....	64
Figura 45- Amostra paralela às camadas, na condição inundada.....	64
Figura 46- Amostra perpendicular às camadas, na condição natural.....	65
Figura 47- Amostra perpendicular às camadas, na condição natural.....	65
Figura 48- Amostra perpendicular às camadas, na condição inundada.....	66
Figura 49- Amostra perpendicular às camadas, na condição inundada.....	66
Figura 50- Envoltória para as amostras paralelas.	68
Figura 51- Envoltória para as amostras perpendiculares.	68
Figura 52- Comparação com as envoltórias em condição natural obtidas por Porto (2018).	70
Figura 53- Comparação com as envoltórias em condição inundada obtidas por Porto (2018).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais tipos de movimento de encosta na dinâmica ambiental brasileira.....	20
Tabela 2- Classificação dos fatores causadores dos movimentos de massa. .	27
Tabela 3- Causas dos movimentos de massa.....	28
Tabela 4- Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.	61
Tabela 5- Índices físicos dos materiais.	62
Tabela 6- Parâmetros de resistência.....	69
Tabela 7- Comparação dos parâmetros de resistência com o trabalho de Porto (2018).....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivos gerais	15
2.2	Objetivos específicos	16
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA.....	17
4.1	Encostas	17
4.2	Movimentos de massa	18
4.3	Classificações dos movimentos de massa.....	19
4.3.1	Rastejo	20
4.3.2	Escorregamento.....	22
4.3.2	Queda.....	23
4.3.4	Corrida.....	24
4.4	Condicionantes dos movimentos de massa	25
5	ÁREA DE ESTUDO	29
5.1	Clima.....	30
5.2	Geomorfologia.....	31
5.3	Geologia.....	31
5.4	Pedologia	34
5.5	Geofísica.....	34
5.1	Diagnóstico da evolução dos Movimentos de Massa na área de estudo	37
6	METODOLOGIA	41
6.1	Etapa de gabinete	42
6.2	Etapa de campo	42
6.3	Etapa de laboratório.....	45
6.3.1	Ensaios de cisalhamento direto.....	46
7.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
7.1	Contexto geológico da área de estudo.....	49
7.2	Análise cronológica dos movimentos de massa.....	56
7.3	Ensaios de cisalhamento direto	60
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

9. REFERÊNCIAS.....	74
---------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa, também conhecidos como escorregamento, deslizamento, ruptura de talude, em geral, referem-se aos movimentos de descida de solos e/ou rochas em função da força da gravidade, na maioria das vezes motivados pela ação da água. No Brasil esse processo é muito frequente, devido às estações do ano bem definidas, onde são comuns os verões de chuvas intensas. Porém as atividades humanas vêm acelerando estes eventos. Cortes de taludes, aterros, modificações nas drenagens e desflorestamento de encostas, são exemplos de práticas que impulsionam este processo de movimento de massa e vulnerabilizam áreas de encostas, como é o caso da área de estudo deste trabalho. Para Cunha et al. (2008) nos movimentos de massa ocorre um movimento coletivo do solo e/ou rocha, onde a gravidade/declividade possui um papel significativo. A água pode tornar-se ainda mais catastrófica, mas não é necessariamente o principal agente desse processo.

A RS-149, rodovia que dá acesso ao município de Nova Palma, e que liga o mesmo às cidades de Faxinal do Soturno e Santa Maria no centro do estado do Rio Grande do Sul, vem sofrendo com sérios problemas ocasionados pelos movimentos de massa. Além do prejuízo econômico, traz grandes implicações para o transporte na região e danos irreparáveis na natureza.

Além dos inquestionáveis prejuízos à agricultura, a erosão do solo provoca transporte de sedimentos para corpos hídricos, com inúmeras consequências, como a perda da qualidade das águas e o assoreamento de rios e reservatórios. Considerando o grande impacto dos processos erosivos e de movimento de massa, uma avaliação dos riscos ou possibilidades de ocorrência desses fenômenos é muito importante para obras civis, no manejo do solo para agricultura, no planejamento urbano e em empreendimentos de grande impacto no solo e no meio ambiente. Desta forma, o presente estudo tem como objetivo principal estudar os movimentos de massa que ocorrem em um trecho da encosta do Rio Soturno, às margens na RS-149, os quais causam grandes impactos de caráter tanto econômico quanto ambiental.

Estudos anteriores como o de Porto (2018), sobre os escorregamentos na RS -149 apontaram como provável superfície de ruptura dos escorregamentos circulares, o contato dos arenitos da Formação Caturrita e a cobertura coluvionar. Em seu estudo a autora realizou ensaios de cisalhamento direto no material coluvionar e no arenito (sem considerar a direção do acamamento da rocha para a realização dos ensaios) natural e remoldado.

Tendo em vista os problemas citados acima, a finalidade deste trabalho foi realizar um mapeamento geológico, assim como um levantamento de dados através de bibliografias e trabalhos realizados a respeito da área, para avaliar a suscetibilidade das rochas presentes na área aos processos erosivos aos quais são submetidos, assim como os movimentos de massa que ocorreram e podem vir a ocorrer no mesmo local. Também foram realizados ensaios de cisalhamento direto buscando apontar a resistência do material rochoso que compõem a encosta onde houve a ruptura.

Além disso, é importante enfatizar a necessidade de soluções adequadas que estabilizam os eventos que ocorrem no local ou que impeçam o desenvolvimento destes processos, assim como sugerir alternativas para que quando ou se ocorrerem, os eventos sejam menos impactantes para as pessoas que vivem naquela região, o que pode diminuir o risco e o custo de manutenção.

Portanto, esta pesquisa busca, por meio de uma investigação geológica-geotécnica, entender o porquê e como ocorreu a ruptura nesse trecho da rodovia, procurando apontar soluções para o problema.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O principal objetivo deste estudo é investigar os movimentos de massa que ocorrem nas encostas do Rio Soturno, às margens da RS-149, principal estrada de acesso entre os municípios de Faxinal do Soturno e Nova Palma, localizados na região central do Rio Grande do Sul.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos neste trabalho têm:

- Elaborar uma análise geológica da área;
- Complementar estudos anteriormente realizados na área, para assim identificar os processos aos quais a encosta foi submetida, buscando identificar as causas desses movimentos de massa;
- Por fim, apontar possíveis soluções para o caso.

3 JUSTIFICATIVA

Os movimentos de massa podem levar a catástrofes ambientais e acidentes em locais povoados, resultando em impactos aos meios físico e biótico, e por vezes podem ocasionar fatalidades e perdas econômicas de grande importância. Assim pode-se dizer que os movimentos de massa têm impactos bastante negativos para a sociedade. A ONU (1993) ressalta que os movimentos de massa são um dos eventos naturais que mais causam prejuízos financeiros e mortes pelo mundo. Dentro deste contexto, a escolha da área de estudo foi motivada pelos processos de movimento de massa que vêm ocorrendo nas encostas do Rio Soturno, às margens da RS-149, atingindo uma parte da estrada. Devido à rodovia ser o único acesso pavimentado ao município de Nova Palma, localizado na região central do Rio Grande do Sul, um polo muito importante para o ramo agropecuário no estado, é de grande importância que sejam apontadas as causas desses eventos, sugerindo alternativas para que estes processos de escorregamento de massa não voltem a ocorrer.

Sendo assim, este trabalho através de um estudo geológico-geotécnico busca apontar as causas para que esses movimentos de massa ocorram no local de estudo, também busca apontar soluções para que os eventos que venham ocorrendo no local sejam freados, ou até mesmo corrigidos, e o solo estabilizado. Além disso, considerando trabalhos anteriores realizados na área, que não

apresentaram resultados muito satisfatórios, motivou-se uma nova pesquisa na área, buscando realizar novos ensaios, para então apontar as causas.

4 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

As referências bibliográficas apresentam os conceitos gerais e específicos, definições e metodologias utilizadas para estudos sobre movimentos de massa, conceitos esses que foram fundamentais para a elaboração desse trabalho. Assim, buscaram-se estudos que estejam relacionados a dinâmica de encostas.

4.1 Encostas

Para Farah (2003) existem três características principais que atuam como dinamizadoras dos movimentos que ocorrem nas encostas, são: geométricas, geológicas (tipos de solos e rochas que a compõem) e pelo ambiente fisiográfico em que se insere (clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, etc). A alteração natural ou artificial destas condicionantes pode facilmente implicar a alteração da condição de sua estabilidade.

Souza (2009) cita que muitas das feições das encostas possuem sua origem associada a processos geológicos e geomorfológicos que atuaram no passado e que, em muitos casos, ainda atuam naqueles locais. A geologia do local possui papel de fundamental importância no processo de deslizamento de encostas. Entre os processos geológicos e geomorfológicos, vale destacar: fraturas, falhas e propriedades dos solos.

Segundo Maciel Filho e Nummer (2011) erosões e movimentos de massa ocorrem, principalmente em encostas ou vertentes. Ele Esses autores ainda divide as formas de relevo em dois grandes grupos: as de degradação e de agradação.

A área de degradação, classificação em que o local de estudo se enquadra, é descrita a seguir: nas formas de relevo em degradação, os rios são os principais definidores da paisagem. Nas áreas desérticas, estas influências diminuem ou talvez se anule em favor da ação do vento. Os rios formam uma rede

de drenagem que é definida como bacia hidrográfica. A linha que une os pontos mais profundos do rio é denominado talvegue. A linha que une os pontos mais altos que dividem as águas das chuvas entre as que irão para um rio e para outro é o divisor de águas. Área que fica entre um rio e outro é chamada de interflúvio. A área que fica entre um divisor de águas e outro é o vale. A área que fica entre um divisor de águas e um rio é a vertente. O estudo de erosão pluvial e dos movimentos de massa tem como base a vertente (MACIEL FILHO e NUMMER, 2011).

4.2 Movimentos de massa

Bigarella (2003), reconhece os movimentos de massa como os mais importantes processos geomorfológicos modeladores da superfície terrestre. Constituem-se no deslocamento de material (solo e rocha) vertente abaixo sob influência da gravidade, desencadeado pela interferência direta de outros agentes independentes.

IBGE (2009) os movimentos de massa ou gravitacionais compreendem a remoção e transporte, vertente abaixo, das formações superficiais e do material rochoso sob influência da gravidade. O deslizamento e o fluxo desses materiais devem-se a posição instável na vertente e às forças gravitacionais, mas o movimento de massa é intensificado pela ação da água. Também são considerados movimentos de massa o rastejamento lento de solo e fragmentos rochosos, assim como os movimentos rápidos de grandes deslizamentos sobre longas distâncias.

Pio-Fiori (1995) salienta que a gravidade origina tensões cisalhantes no interior do manto de alteração ao longo das vertentes. Estas tensões responsáveis pela ocorrência dos movimentos de massa aumentam com a inclinação e altura das encostas, com o peso específico do solo e a quantidade de água que infiltra e acumula no mesmo. Neste processo a água desempenha papel fundamental alojando-se nos planos potenciais de ruptura, diminuindo a resistência mecânica do solo, pelo efeito da pressão neutra e em função da lubrificação destes planos.

Segundo Selby (1990), movimento de massa é o movimento de solo ou material rochoso encosta abaixo sob a influência da gravidade, sem a contribuição direta de outros fatores como água, ar ou gelo. Entretanto, água e gelo geralmente estão envolvidos em tais movimentos, reduzindo a resistência dos materiais e interferindo na plasticidade e fluidez dos solos. Internamente estão ligados à alteração do equilíbrio entre as tensões no interior da massa (Cruz, 1974).

4.3 Classificações dos movimentos de massa

Dias et al., (2002) diz ser possível notar diferenças significativas entre as várias classificações analisadas. Isto se deve, sobretudo à falta de um critério único. Cada autor atribui maior importância a um determinado parâmetro, seja a velocidade, os materiais envolvidos, o modo de deformação, etc. Entretanto, notamos que alguns tipos genéricos de movimentos de massa estão presentes na maior parte das classificações. São eles: o rastejamento (creep), as corridas (flows), os escorregamentos (slides) e as quedas de blocos (rockfalls).

Bigarella (2003) diz que os movimentos de massa se enquadram em duas categorias: os que ocorrem devido a causas externas, que aumentam a tensão ao cisalhamento dos materiais das vertentes sem afetar as tensões internas desses materiais; e aqueles que afetam as tensões internas sem mudanças nas tensões de cisalhamento.

Augusto Filho (1992) apresenta na tabela abaixo (Tabela 1), as características dos movimentos de massa, conforme a dinâmica ambiental brasileira.

Tabela 1- Principais tipos de movimento de encosta na dinâmica ambiental brasileira.

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO/MATERIAL/GEOMETRIA
Rastejos (Creep)	<ul style="list-style-type: none"> - Vários planos de deslocamento (internos) - Velocidades muito baixas (cm/ano) e decrescente em profundidades - Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes - Solos, depósitos, rocha alterada/fraturada - Geometria indefinida
Escorregamentos (Slides)	<ul style="list-style-type: none"> - Poucos planos de deslocamentos (externos) - Velocidades médias (m/h) e altas (m/s) - Pequenos e grandes volumes de material - Geometria e materiais variáveis - Planares: solos poucos espessos, solos e rochas com plano de fraqueza - Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas - Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (Falls)	<ul style="list-style-type: none"> - Sem plano de deslocamento - Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado - Velocidades muito altas (vários m/s) - Material rochoso - Pequenos e médios volumes - Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. - Rolamento de matacão - Tombamento
Corridas (Flows)	<ul style="list-style-type: none"> - Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) - Movimento semelhante ao de um líquido viscoso - Desenvolvimento ao longo das drenagens - Velocidades médias e altas - Mobilização de solo, rocha, detritos e água - Grandes volumes de material - Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992 *apud* RECKZIEGEL, 2012).

Na sequência estão descritos detalhadamente os principais tipos de movimentos de massa.

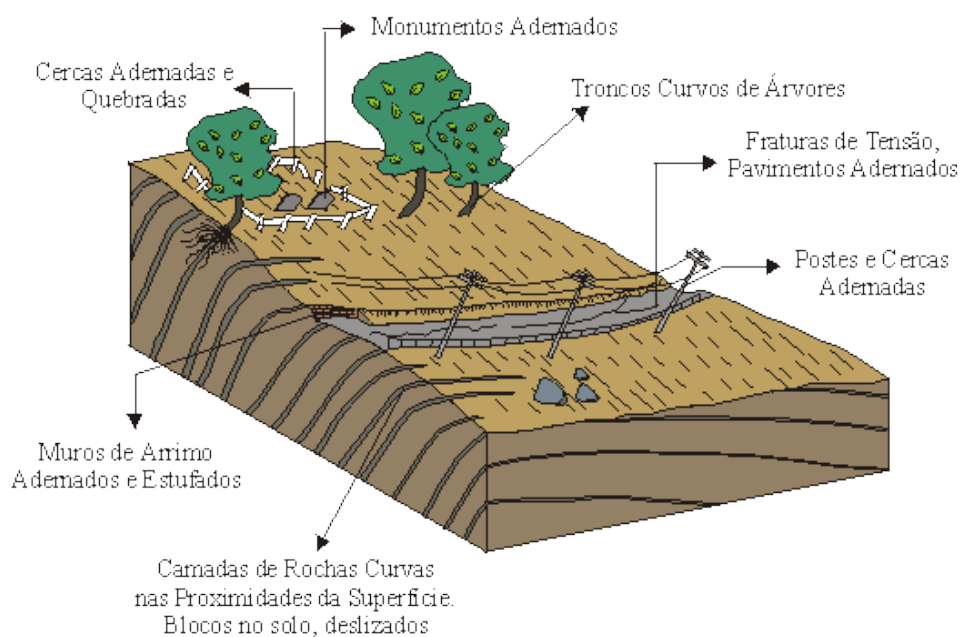
4.3.1 Rastejo

Movimento relativamente lento quando comparado ao processo de deslizamento, que pode ocorrer mesmo em terrenos com baixas declividades, como colúvios ou tálus em depósitos de sopé e/ou meia encosta. O deslocamento lento da massa possibilita detectar previamente a presença de feições de instabilidade, como trincas no solo, degraus de abatimento, deformações na

superfície e surgências d'água na base da encosta. Pode ser deflagrado por eventos de chuvas de longa duração e altos índices pluviométricos acumulados, que acarretam a elevação progressiva do nível d'água subterrâneo e tendem a instabilizar os terrenos. Desenvolvem-se segundo superfícies de ruptura irregulares e pode ser acelerado por intervenções humanas efetuadas no sopé da encosta afetada. Pode ocorrer de modo isolado ou associado a deslizamento IBGE (2009).

Já para Maciel Filho e Nummer (2011), o termo “rastejo” corresponde a movimentos lentos e contínuos (cm/ano) de material de encostas que ocorrem em depósitos de colúvios e tálus ou em rochas muito fraturadas com limites indefinidos, e podem envolver grandes massas de solo sem que haja, na área interessada, diferenciação entre material em movimento e material estacionário. Para os autores, sinais que evidenciam a ocorrência de rastejo são: árvores inclinadas ou com troncos recurvados; deslocamento de postes e cercas; trincas e rupturas em elementos rígidos; eixos de estradas e ferrovias sofrendo inflexões no alinhamento; deformação de elementos estruturais de rocha ou solo, como os da figura a baixo (Figura 1).

Figura 1- Figura ilustrando um esquema de rastejo.



Fonte: Bloom (1988 *apud* Infantil Jr. & Fornasari Filho, 1998).

4.3.2 Escorregamento

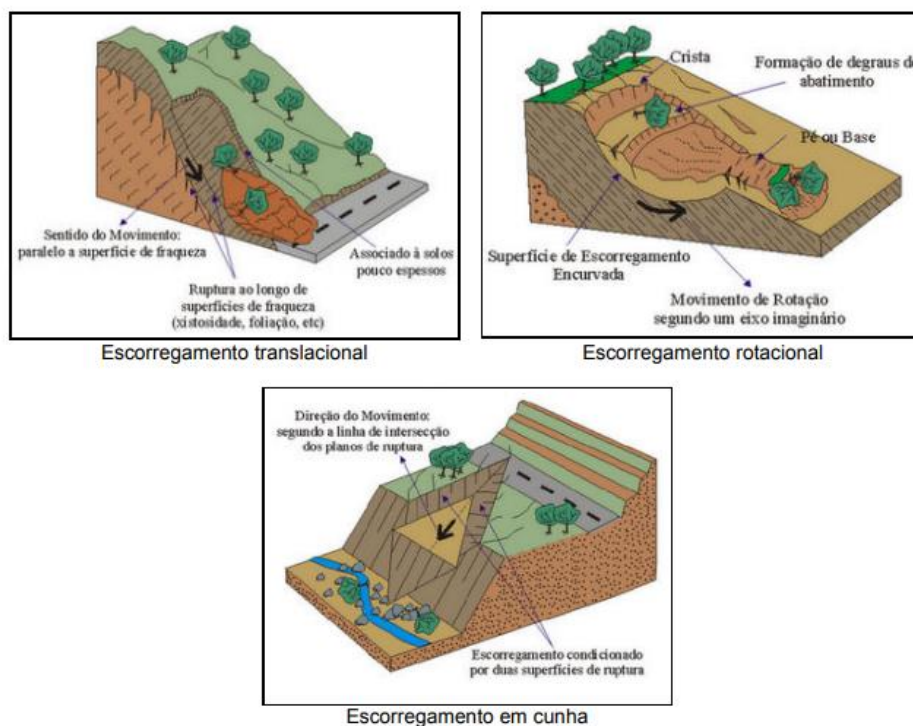
Movimento caracterizado por velocidade alta, que se desenvolve comumente em encostas com declividade e amplitude média a alta e segundo superfície de ruptura planar (translacional), circular (rotacional) ou em cunha (acompanhando planos de fragilidade estrutural dos maciços terrosos ou rochosos). É geralmente deflagrado por eventos de chuvas de alta intensidade ou com elevados índices pluviométricos acumulados, condicionados por fatores predisponentes intrínsecos aos terrenos IBGE (2009). O processo é também conhecido como deslizamento.

Maciel Filho e Nummer (2011) descrevem escorregamentos como processos rápidos, com duração curta, de massas de terreno, geralmente, bem definidas quanto ao seu volume, onde o centro de gravidade se desloca para baixo e para fora do talude.

Fernandes e Amaral (1996) definem os escorregamentos (landslides) com movimentos gravitacionais rápidos de curta duração, com volume de superfície de ruptura bem definidos, onde o material desprendido é jogado para fora da encosta, tendo como resultado, geralmente feições longas, como cicatrizes, podendo assumir geometria rotacional ou translacional.

Reckeziegel (2012), descreve os escorregamentos rotacionais sendo escorregamentos com superfície de ruptura côncava, característicos de encostas, geralmente, pouco fraturadas com formações superficiais uniformes, solos espessos, como os de origem de rochas argilosas (argilitos e folhelhos). Já os escorregamentos translacionais, são movimentos com plano de ruptura rasos bem definidos, que seguem muitas vezes paralelos à superfície da encosta. Estes planos podem ser formados por estruturas geológicas, geomorfológicas ou pedológicas, podendo ser compostas por rochas, solos residuais, tálus, colúvio, detritos ou até mesmo pela mistura dos mesmos. Na figura a seguir (Figura 2) temos os principais tipos de escorregamentos:

Figura 2- Figura esquemática dos tipos de escorregamentos.



Fonte: Rossi et al., (2010 *apud* RECKZIEGEL, 2012).

4.3.2 Queda

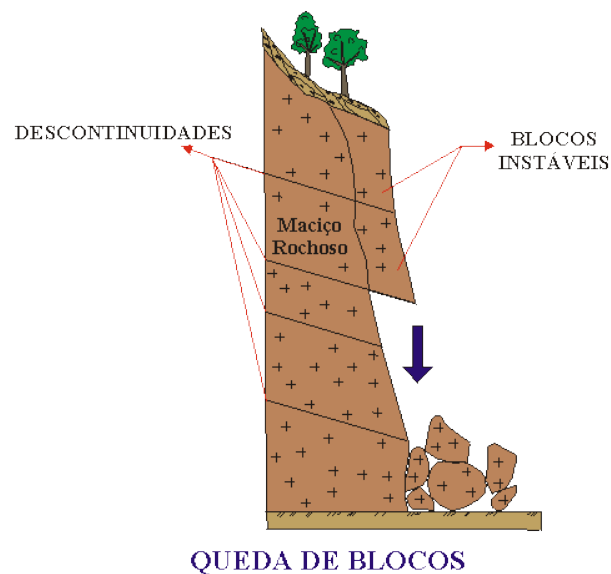
Movimento geralmente abrupto de blocos e matacões rochosos, que se desprendem de encostas íngremes, paredões rochosos ou falésias. Tem como principais fatores predisponentes as discontinuidades litológico-estruturais dos maciços rochosos e a ação do intemperismo físico-químico, podendo ser deflagrado por eventos chuvosos. O material movimentado pode quebrar com o impacto e rolar pela superfície da encosta, até encontrar obstáculo ou atingir terreno plano. A velocidade, trajetória e alcance podem variar muito, pois dependem de fatores diversos, como a declividade da encosta, a forma e dimensão do material mobilizado. Envolve principalmente quedas livres, rolamentos, tombamentos e deslocamentos de rochas (IBGE, 2009).

Segundo Parise (2002), as quedas de bloco estão entre os tipos mais comuns de movimentos de massa, e constituem na separação da rocha em um

declive íngreme e a descida consequente do material, que desliza após cair, saltando ou rolando.

Maciel Filho e Nummer (2011) dividem este processo em dois: queda de blocos e queda de detritos. A queda de blocos, ilustrada na Figura 3, ocorre em penhascos verticais ou taludes muito íngremes, blocos de rochas, deslocados do maciço por intemperismo, caem por ação da gravidade. Queda de blocos é definida, pelos autores, como uma ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação. Já a queda de detritos, é de menor importância, e constitui um termo de passagem entre a queda de blocos, a Figura 3 ilustra estes escorregamentos, e é definida como a queda, de reduzidas massas de fragmentos rochosos ou terrosos, inconsolidados ou pouco consolidados.

Figura 3- Figura de um pequeno esquema de queda de blocos.



Fonte: Infantil & Fornasari Filho (1998).

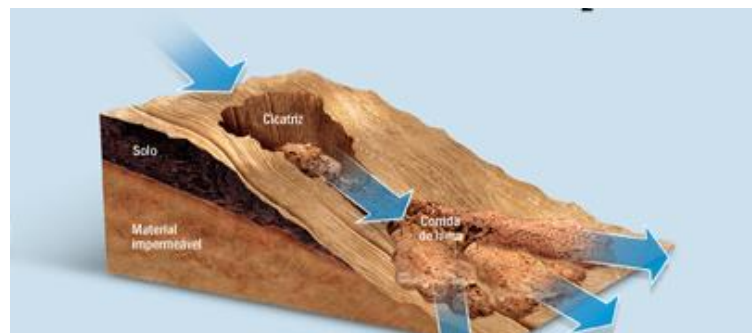
4.3.4 Corrida

Conforme IBGE (2009), as corridas são movimentos de massa complexos e com alta energia de transporte, caracterizados por fluxos concentrados de blocos rochosos e troncos vegetais imersos em matriz com alta concentração de

sedimentos de diferentes granulometrias, provenientes da ocorrência de deslizamentos nas encostas e do retrabalhamento de depósitos antigos situados ao longo de cursos d'água. Pode ser deflagrado por eventos de chuvas de alta intensidade, gerados nas porções superiores das encostas em bacias de drenagem serranas e restritas. Os materiais mobilizados podem alcançar áreas planas e distantes situadas a jusante. Por sua alta energia de escoamento e elevada concentração de sólidos, bem como por seu amplo raio de alcance, configura o tipo de movimento gravitacional de massa com maior potencial de impacto destrutivo. Inclui enxurradas associadas, geralmente no início e fim do processo, na forma de “enchente suja”, assim denominada em razão de sua alta carga de sedimentos.

Corridas, como ilustrado Figura 4, são formas rápidas de escorregamento (m/h), de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda do atrito interno, em função da destruição da estrutura, em presença de excesso de água (MACIEL FILHO e NUMMER, 2011).

Figura 4- Figura evidenciando corrida de massa.



Fonte: Skinner & Porter (2003).

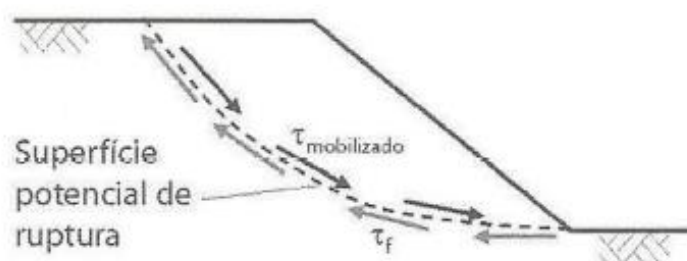
4.4 Condicionantes dos movimentos de massa

A geologia e a geomorfologia são responsáveis pelas paisagens naturais da superfície terrestre, através dos processos erosivos aos quais é submetida. Encostas e taludes são definidos por eventos naturais, como intemperismo, erosão, tectônica de placas, etc., além de ações antrópicas. Os movimentos de

massa dependem de diferentes fatores, como declividade, vegetação, estrutura geológica, e parâmetros hidro climáticos que condicionam os tipos de processos atuantes e sua velocidade de atuação (BASTOS, 2012).

Segundo Gerscovich (2016), a instabilidade de um talude ocorre quando as tensões cisalhantes se igualam à resistência ao cisalhamento, conforme mostrado na Figura 5, dividindo os agentes responsáveis por estes eventos em dois grandes grupos, como mostra Varnes (1978), na tabela 2.

Figura 5- Condição de ruptura por escorregamento.



$$\text{Fator de segurança} = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = 1; \text{ onde:}$$

τ_f = resistência ao cisalhamento

τ_{mob} = tensões cisalhantes mobilizadas

Fonte: Gerscovich (2016).

Tabela 2- Classificação dos fatores causadores dos movimentos de massa.

AÇÃO	FATORES	FENOMENOS GEOLOGICOS / ANTROPICOS
Aumento da Solicitação	Remoção de massa	Erosão Escorregamentos Cortes
	Sobrecarga	Peso da água (chuva, neve, etc.) Acumulo natural de material Peso da vegetação Construção de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações Dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc. Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões Laterais	Água em trincas Congelamento Material expansivo
Redução da Resistência ao Cisalhamento	Características inerentes ao material (geometria, estrutura, etc.)	Características geomecânicas do material
	Mudanças ou fatores variáveis	Ação do intemperismo provocando alterações físico-químicas nos minerais originais. Processos de deformação em decorrência de variações cíclicas de umedecimento e secagem, reduzindo a resistência. Variação das poro pressões: Elevação do lençol freático por mudanças no padrão natural de fluxo (construção de reservatórios, processos de urbanização, etc.) Infiltração da água em meios saturados causando redução das pressões de água negativas (sucção). Geração de excesso de poro pressão, como resultado de implantação de obras. Fluxo preferencial através de trincas ou juntas, acelerando os processos de infiltração.

Fonte: Varnes (1978).

Na Tabela 3, Cruden e Varnes (1996 *apud* NUMMER, 2003) resumem as causas principais para ocorrerem movimentos de massa, onde as dividem em 4 grandes grupos: causas Geológicas, Morfológicas, Físicas e Humanas.

Tabela 3- Causas dos movimentos de massa.

Causas Geológicas	Causas Morfológicas	Causas Físicas	Causas Humanas
Materiais fracos	Levantamento tectônico ou vulcânico	Chuvas intensas	Escavações de taludes
Materiais sensíveis	Alívio por degelo	Derretimento rápido da neve	Sobrecarga no talude ou na crista
Materiais intemperizados	Erosão fluvial no pé de talude	Precipitações prolongadas	Rebaixamento dos reservatórios
Materiais cisalhados	Erosão por ondas no pé do talude	Rebaixamentos rápidos (Enchentes, marés)	Desmatamento
Materiais fissurados ou fraturados	Erosão glacial no pé do talude	Terremotos	Irrigação
Orientação desfavorável de descontinuidades (Acamadamento, xistosidade, etc.)	Erosão nas margens laterais	Erupções vulcânicas	Mineração
Orientação desfavorável de descontinuidades (Falhas, etc.)	Erosão subterrânea (Solução e Piping)	Descongelamento	Vibração artificial
Contraste de permeabilidade	Deposição de cargas no talude ou na Crista	Intemperismo por congelamento e descongelamento	Vazamento de água
Contraste de rigidez	Remoção da vegetação (Fogo, seca)	Intemperismo por expansão e retração	

Fonte: Cruden e Varnes (1996 *apud* NUMMER, 2003).

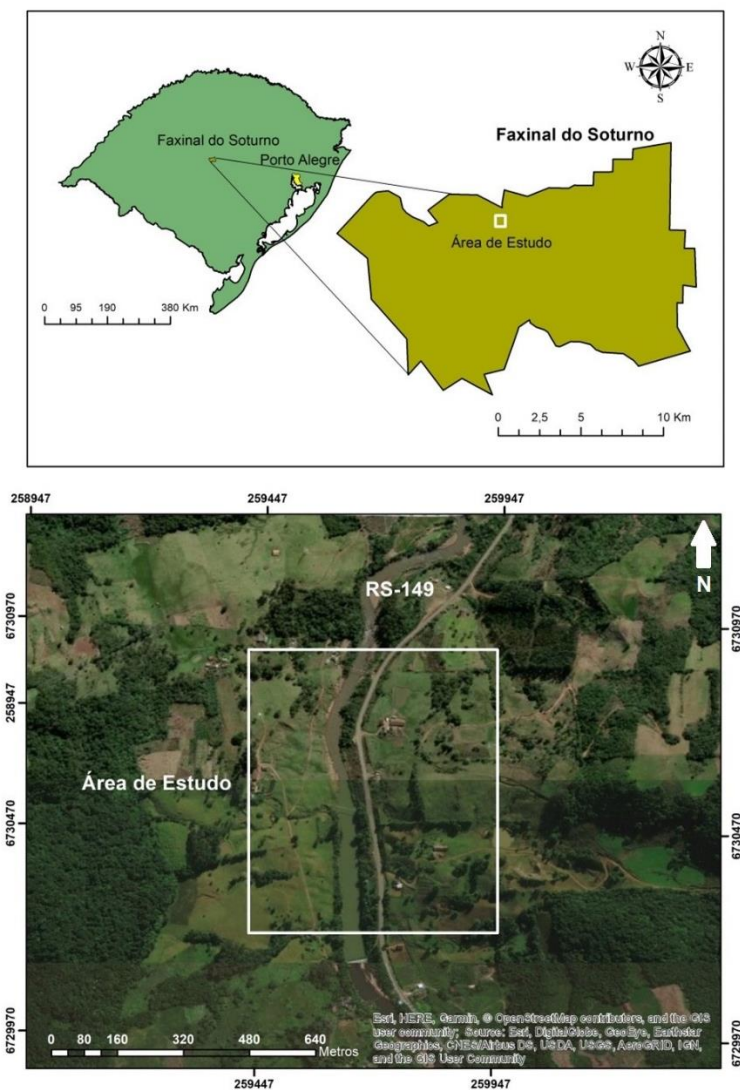
Maciel Filho e Nummer (2011) citam como causas para os movimentos de massa os seguintes aspectos: elevação de nível piezométrico em taludes; o efeito de oscilações térmicas; a diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo; mudanças na geometria do sistema; efeitos de vibrações; rebaixamento rápido do nível da água em barragens ou em enchentes; erosão subterrânea retrogressiva (piping); diminuição do efeito de coesão aparente; e ruptura por cisalhamento.

Para Bigarella et al. (2003) a movimentação de massa depende da estrutura geológica, do índice pluviométrico, da topografia, da presença ou não de vegetação, dos mantos de intemperismo, de faixas impermeáveis e da ação antrópica.

5 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se entre os municípios de Faxinal do Soturno e Nova Palma ambos localizados na região central do Estado do Rio Grande do Sul, a cerca de 280 km de Porto Alegre (Figura 6), e pertencentes à Quarta Colônia de Imigração Italiana. O local onde o trabalho foi realizado pertence ao município de Faxinal do Soturno, e fica às margens da rodovia RS-149, entre os km 149 e 150, a oeste da rodovia encontra-se o Rio Soturno, paralelo à estrada.

Figura 6- Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autora.

A Figura 7 mostra o local onde ocorreu a ruptura da rodovia, causada pelos movimentos de massa, objeto principal deste estudo.

Figura 7 - Imagem de Satélite atual do local onde ocorreu o escorregamento.



Fonte: Google Earth (2021) com modificações da autora.

5.1 Clima

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é Cfa, ou seja, clima temperado chuvoso, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e subtropicais termicamente. A média anual de chuvas para a região varia entre 1700 mm e 1800 mm, distribuídas uniformemente por todo o ano (Embrapa, 2012); sendo os meses com maiores índices pluviométricos abril, maio, setembro e outubro (BARATTO,1992). Cabe lembrar que podem ocorrer anormalidades climáticas associadas ao fenômeno El Niño, e como consequência desse fato tem-se o constante “estacionamento” de frentes, ocasionando altos índices pluviométricos e, conseqüentemente, fortes enchentes em todo o estado, inclusive

na região de Faxinal do Soturno (PREFEITURA MUNICIPAL DE FAXINAL DO SOTURNO, 2011).

5.2 Geomorfologia

Geomorfologicamente, conforme consta no Documento Oficial do Município de Faxinal do Soturno, de Planejamento de Saneamento Básico, o município de Faxinal do Soturno apresenta-se inserido em duas unidades de relevo: Depressão Rio Jacuí e Serra Geral. Estas correspondem, basicamente, às formas originárias de materiais que compõem as regiões geomorfológicas das bacias e coberturas sedimentares. Na Depressão do Rio Jacuí, no município de Faxinal do Soturno, estão incluídos os sedimentos fluviais que compõem os terraços e várzeas, situados, principalmente ao longo do rio Soturno, e sedimentos da formação Rosário do Sul e Santa Maria, as quais dão origem às formas colinosas, regionalmente denominadas de coxilhas. Constituem formas de relevo com altitudes que variam entre 100 e 200 metros em relação ao nível do mar. Os sedimentos fluviais, situados principalmente ao longo do Rio Soturno encontram-se em níveis altimétricos inferiores a 100 metros.

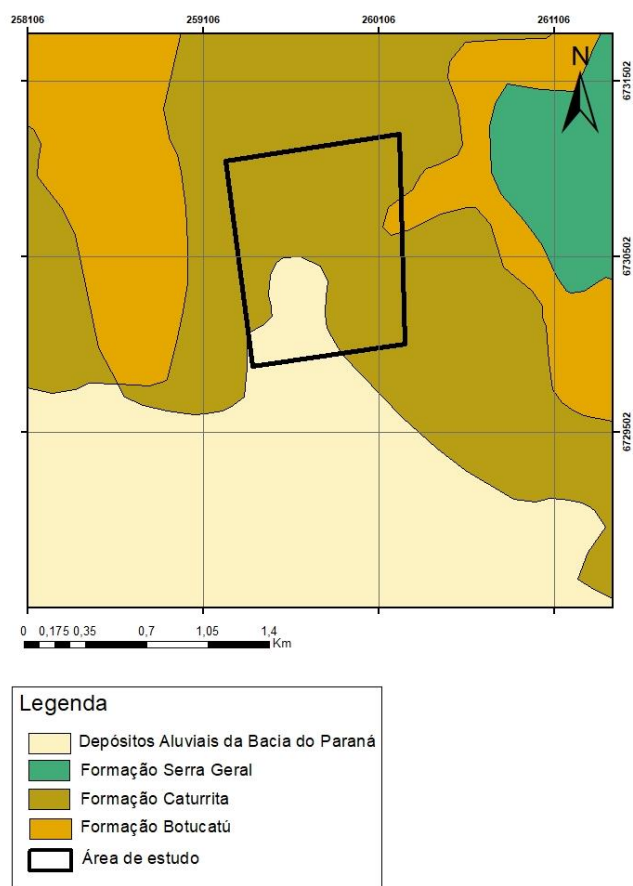
Nas formas que correspondem à unidade Serra Geral, as formações responsáveis pelos diferentes aspectos de relevo do município (patamares, escarpas, relevos residuais, morros e outros) são: arenito eólico/fluvial da Formação Botucatu e vulcânicas ácidas/básicas da Formação Serra Geral. Essa unidade de relevo, no município de Faxinal do Soturno, abrange superfícies com altitudes na faixa de 200 a 600 metros. Praticamente, abrange a parte nordeste, sudoeste e noroeste do Município (PREFEITURA MUNICIPAL DE FAXINAL DO SOTURNO, 2011).

5.3 Geologia

Quanto a geologia regional, o município de Faxinal do Soturno, local onde a área de estudo está localizada, segundo SCHIRMER (2012), está inserido no

limite meridional da extensa Bacia do Paraná, constituída por rochas sedimentares e vulcânicas. No estado do Rio Grande do sul, a Bacia do Paraná é representada por rochas vulcânicas e sedimentos gonduânicos, com presença de depósitos aluviais recentes. Na área de estudo encontram-se rochas pertencentes aos Grupos São Bento e Grupo Rosário do Sul. As rochas do grupo que pertencem ao grupo São Bento são rochas vulcânicas da Formação Serra geral, e arenitos eólicos da Formação Botucatu. Já pertencentes ao Grupo Rosário do Sul, temos os arenitos fluviais da Formação Caturrita. O mapa da Figura 8 mostra o contexto geológico da área.

Figura 8- Mapa Geológico da região da área de estudo.



Fonte: Autora.

Conforme consta na Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM – Serviço Geológico do Brasil-2003) a rodovia onde houve o escorregamento, está

localizada sobre a Formação Caturrita. Unidade, que segundo Maciel Filho (1990), é formada por arenitos finos a médios, apresentando por vezes camadas ou lentes de siltito argiloso. Os arenitos desta unidade, apresentam composição essencialmente quartzosa com uma matriz argilosa. Já o arenito basal na maioria das vezes é mais grosseiro e menos argiloso. Há também, porções da rocha que se encontram mais alteradas, onde ocorre alteração dos feldspatos por perda de cimentação, isso se dá em frações mais arenosas da rocha, onde ela se encontra mais porosa, e assim há maior percolação de fluidos.

Sobre a Formação Caturrita ocorrem os arenitos da Formação Botucatu, conforme mostra a Figura 9, que mineralogicamente são compostos por quartzo, contendo feldspatos alterados cimentados por sílica ou óxido de ferro, além de possuírem alta permeabilidade (MACIEL FILHO, 1990). Depósitos coluvionares ocorrem sobre os arenitos da Formação Caturrita, e são compostos por blocos de rochas de origem vulcânica, como basaltos e riolitos. Para Maciel Filho (1990), os colúvios sobre a Formação Caturrita na maioria das vezes não apresentam linhas de pedra e são difíceis de identificar, podendo ser confundidos com solos mais profundos.

Figura 9- Arcabouço litoestratigráfico da área de estudo.

Geocronologia		Litoestratigrafia	Litologias
Cretáceo		Formação Serra Geral	V V V V V V V V V V V V V V V V
		Formação Botucatu	
Jurássico			
Triássico	Rético		
	Noriano	Formação Caturrita	
	Carniano	Formação Santa Maria	Membro Almoa
	Ladiniano		Membro Passo das Tropas
	Anisiano		
	Scitiano	Formação Sanga do Cabral	

Fonte: Andreis *et al.* (1980).

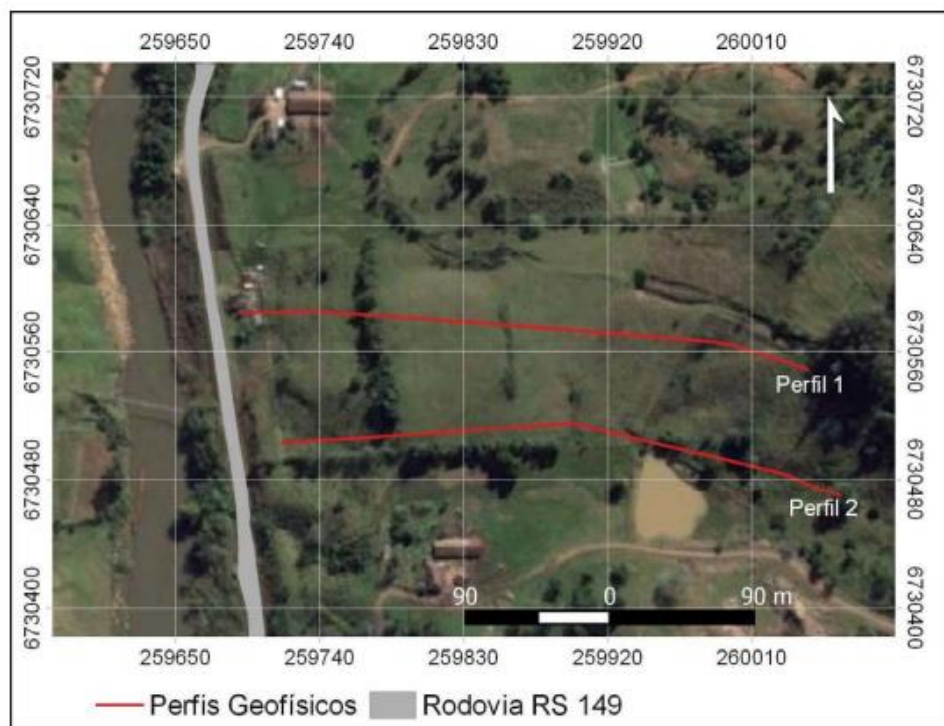
5.4 Pedologia

Quanto a pedologia da área de estudo é possível observarmos a presença de Neossolo Litólico Eutrófico, que segundo EMBRAPA (2013), é caracterizado por ser um solo pouco desenvolvido, raso, sem a presença de água, apresentando horizonte A diretamente acima da rocha, ou horizonte C de pequena espessura. São normalmente pedregosos ou rochosos, moderadamente a excessivamente drenados com horizonte A pouco espesso, bastante cascalhento, apresentando textura predominantemente média, podendo, às vezes, apresentar textura arenosa, siltosa ou argilosa. Podem ser distróficos ou eutróficos, como é o caso do solo encontrado na área, ocorrendo geralmente em áreas de relevo suave ondulado a montanhoso. Apresentam poucas alternativas de uso por se tratar de solos rasos ou muito rasos e usualmente rochosos e pedregosos. Geralmente são encontrados em áreas acidentadas de serras e encostas íngremes, normalmente com problemas de erosão laminar e em sulcos severa ou muito severa.

5.5 Geofísica

A investigação geofísica na área de estudo foi realizada por Porto, Fries, Clemente e Zago (2018), tendo sido obtidos dois perfis geofísicos para a área de estudo (Figura 10). Com o auxílio destes perfis foi possível um melhor entendimento da estratigrafia do local, permitindo identificar os contatos geológicos e as zonas de saturação do terreno. No estudo citado, foi utilizado o método de resistividade elétrica, que consiste em medir a dificuldade que um determinado material apresenta à passagem de uma dada corrente elétrica. A resistividade de solos e rochas tende a diminuir com o aumento da umidade. Assim, sedimentos não saturados, apresentam uma resistividade muito maior que os mesmos sedimentos saturados em água (MCNEILL, 1980).

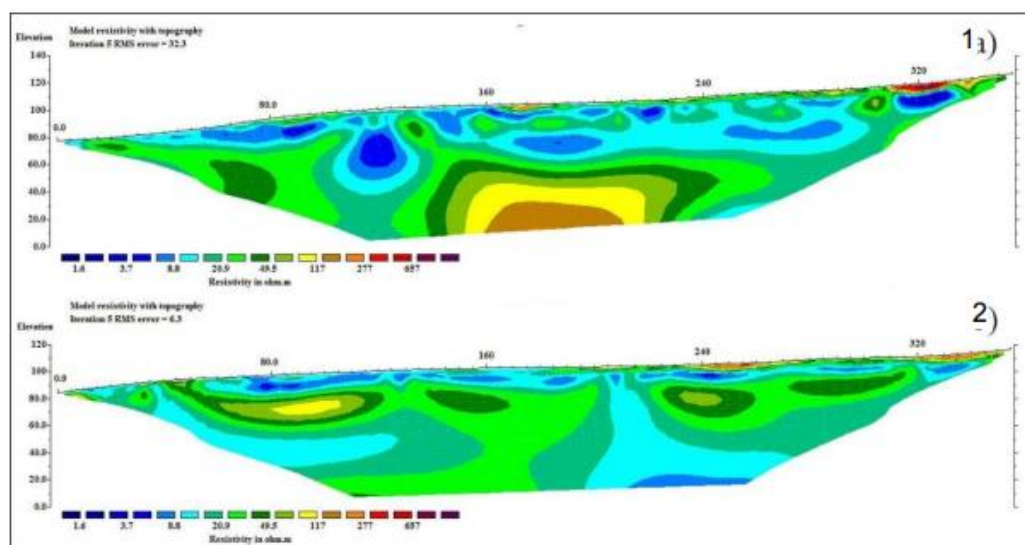
Figura 10- Localização dos perfis geofísicos realizados na área.



Fonte: Porto (2018).

Na Figura 11 são mostradas as sessões geradas com escala de cores que varia de 1,6 ohm.m a 657 ohm.m.

Figura 11- Perfil 1 e 2.



Fonte: Porto (2018).

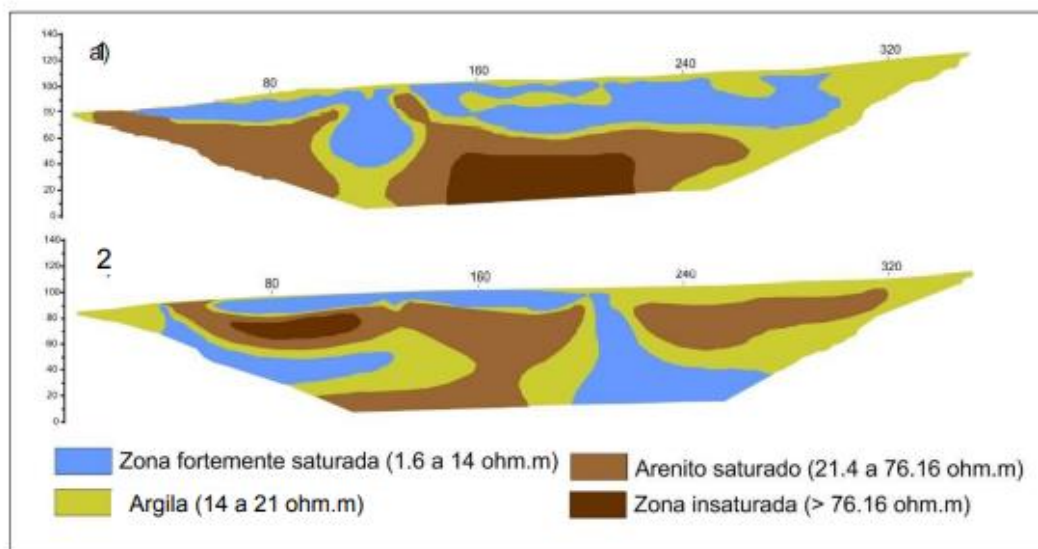
Conforme descrito por Porto (2018), os baixos anômalos de resistividade elétrica são correlacionáveis a uma zona fortemente saturada, já os materiais com resistividade intermediária, como argilas e arenito insaturado, se apresentam como uma zona fortemente insaturada.

Observando o Perfil 1 é possível observar uma zona de alta saturação a cerca de 20 metros da superfície. Esta área pode ser relacionada a matérias menos resistentes, como solos ou sedimentos. No centro do perfil é possível verificar um corpo rochoso, com cerca de 40 metros de extensão, há cerca de 20 metros de profundidade. Este corpo é composto por materiais consolidados, que se mostram menos permeáveis e com menor hipótese de movimentação.

No Perfil 2, os materiais apresentaram um comportamento mais homogêneo em relação à resistividade. Os baixos valores apresentados podem estar relacionados a presença de materiais derivados de depósitos superficiais de colúvios/tálus. Ainda no mesmo perfil é possível observar baixos anômalos em maior profundidade, o que pode estar associado a zonas de falhas e fraturas, onde ocorre a percolação de fluidos.

Na Figura 12 estão os perfis geofísicos interpretados, com as litologias representadas.

Figura 12- Interpretação dos perfis geofísicos.



Fonte: Porto (2018).

Além disso, é possível observar a presença de materiais consolidados dispostos por toda a extensão do perfil, estes materiais podem estar relacionados

a presença de arenitos com coesão maior, arenitos estes associados à Formação Botucatu, pela posição estratigráfica, e os basaltos da Formação Serra Geral.

Também é possível observar alto grau de saturação de água por toda a extensão da encosta, que está relacionada à presença das rochas sedimentares que compõem a litologia do local, além dos depósitos superficiais de colúvios/tálus.

5.1 Diagnóstico da evolução dos Movimentos de Massa na área de estudo

O local vem sofrendo constantes processos de movimento de massa, que ocorrem nas encostas do Rio Soturno, o que causou a ruptura da rodovia que passa ao lado do curso d'água, no ano de 2015. No Google Earth é possível encontrarmos imagens do local do ano de 2012 (Figura 13), onde já haviam sido feitos reparos referentes a problemas na rodovia. Imagens mais recentes, dos anos de 2015, 2016, 2018, 2019 (Figuras 14, 15,16 e 17, respectivamente) e de 2021, atual situação da rodovia (Figuras 18), demonstram que o problema continua ocorrendo e está cada vez mais agravado.

Figura 13- Situação na rodovia em 2012, antes do deslizamento.



Fonte: Google Earth.

No ano de 2015 houve a queda da rodovia, levando ao trancamento total da passagem de veículos pelo local. Depois desse episódio a rodovia nunca passou por reparos de modo a ser recuperada, foi feito apenas uma extensão lateral da mesma para que o fluxo de veículos pudesse continuar, o que levou ao agravamento da situação, como pode ser visto nas imagens mostradas nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18, dos anos seguintes até hoje, momento em que a situação se encontra muito mais agravada em decorrência dos mesmos eventos.

Figura 14- Ruptura do asfalto em 2015.



Fonte: Diário de Santa Maria.

Neste mesmo ano o DAER (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem) realizou uma licitação para a recuperação do trecho que cedeu, a empresa que venceu foi a EPT (Empresa de Pesquisa Técnica) e na ocasião foi realizada uma vistoria no local, com a utilização de topografia, porém o trabalho não teve continuidade (Porto, 2018). Em maio de 2018 o trabalho foi retomado pela empresa, realizando sondagens e instalação de piezômetros no local. Com a demora para o início da obra, a prefeitura do município de Faxinal do Soturno asfaltou, por iniciativa própria, o desvio que havia sido criado em 2015, o ano em que a rodovia cedeu. Embora tenha sido asfaltada essa passagem alternativa, nada foi feito a respeito do problema de movimentação da encosta, portanto o problema de instabilidade no local continua até os dias atuais tendo inclusive avançado.

Figura 15- Foto da rodovia no ano seguinte ao deslizamento, 2016.



Fonte: Porto (2018).

Figura 16- Foto do local em 2018, com o desvio asfaltado.



Fonte: Porto (2018).

Figura 17-Foto da rodovia em 2019.

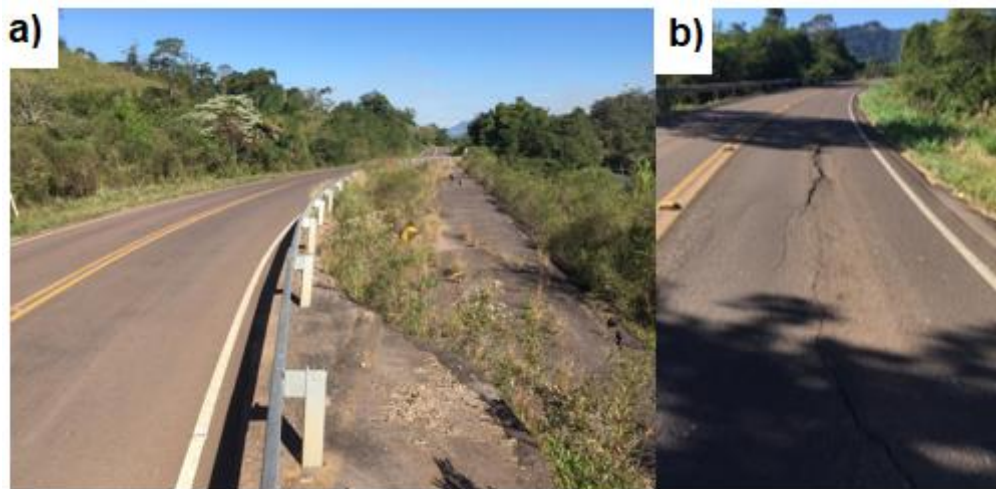


Fonte: Autora.

Cinco anos após o escorregamento da rodovia, é possível observar, através da figura 18, que nada foi feito para a estabilização da encosta, e é evidente que o processo continua acontecendo, agora, no trecho onde foi feito o desvio em 2015, e posteriormente asfaltado, em 2018.

Fotos da atual situação da rodovia mostram que o problema no local de estudo continua, cada vez mais grave. Atualmente a pavimentação mais à frente do local apresenta trincas, e a cerca de 100 m da ruptura, é possível notar um rebaixamento da rodovia, local que pode acabar sofrendo o mesmo processo que o local do deslizamento.

Figura 18- a) Foto tirada em abril de 2021, local onde a rodovia cedeu. b) Trinca no asfalto a cerca de 50m do deslizamento.



Fonte: Autora.

6 METODOLOGIA

Este trabalho é baseado em um estudo de caso, com o objetivo de analisar e caracterizar a região onde houve a movimentação de massa, para compreender como ocorreu a ruptura na rodovia. Para isso foram realizadas revisões na literatura de trabalhos já existentes sobre o local e região, assim como ensaios para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das rochas, no local do contato entre elas, e ainda uma análise geológica e cronológica do processo.

Neste item serão descritas as etapas que foram desenvolvidas ao longo de todo o trabalho, a metodologia que foi empregada, as técnicas e materiais que serviram como base para que todas as etapas fossem realizadas, assim como o tratamento dos dados que foram obtidos.

A metodologia do trabalho está dividida em quatro etapas. A primeira etapa, de gabinete, consistiu no estudo de trabalhos realizados na área anteriormente, levantamento bibliográfico, elaboração de mapas temáticos e posteriormente a interpretação deles. A segunda etapa, foi a etapa de campo, onde foi feito o

reconhecimento da área e o mapeamento geológico. Após isso, foi dado início a terceira etapa, realizada em laboratório, onde, com amostra previamente retirada do local, foram feitos ensaios de cisalhamento direto, com a amostra nas condições natural e inundada. Após os resultados obtidos através dos ensaios de cisalhamento, foi feita a análise de estabilidade e a análise dos resultados do ensaio, com posterior comparação com resultados obtidos em outros trabalhos realizados anteriormente no local.

6.1 Etapa de gabinete

Durante esta etapa foi realizado o levantamento bibliográfico, em livros, artigos, teses, dissertações e acerca da área de geologia, engenharia civil e geotécnica, com foco em casos de movimento de massa, aplicação de ensaios de cisalhamento direto e análise de estabilidade. Também foram coletados dados a respeito do projeto de execução da estrada e do local onde aconteceu o deslizamento, junto ao DAER e ao EPT, respectivamente. Foram feitas buscas no Google Earth, com a intenção de visualizar a área via satélite, com a finalidade de acompanhar o processo ao longo do tempo e melhor entendê-lo.

6.2 Etapa de campo

Durante a realização do trabalho foi realizada uma saída de campo até a área de estudo (Figura 19), no dia 21 de janeiro de 2020, com a finalidade de reconhecer o local e realizar um mapeamento geológico, não apenas pontualmente onde ocorreu o movimento de massa, mas sim em uma área maior, portanto foi seguido um perfil do local da ruptura até a estrada de acesso ao município de Pinhal Grande, passando a cidade de Nova Palma, que foi pré-definido na etapa de gabinete, com a finalidade de identificar processos semelhantes dentro de uma área de influência maior. Na saída de campo foram utilizados um mapa topográfico, feito na etapa pré-campo, bússola, GPS do tipo Garmin, caderneta de campo para anotações, lupa de mão para análise da rocha em maior detalhe e câmera fotográfica.

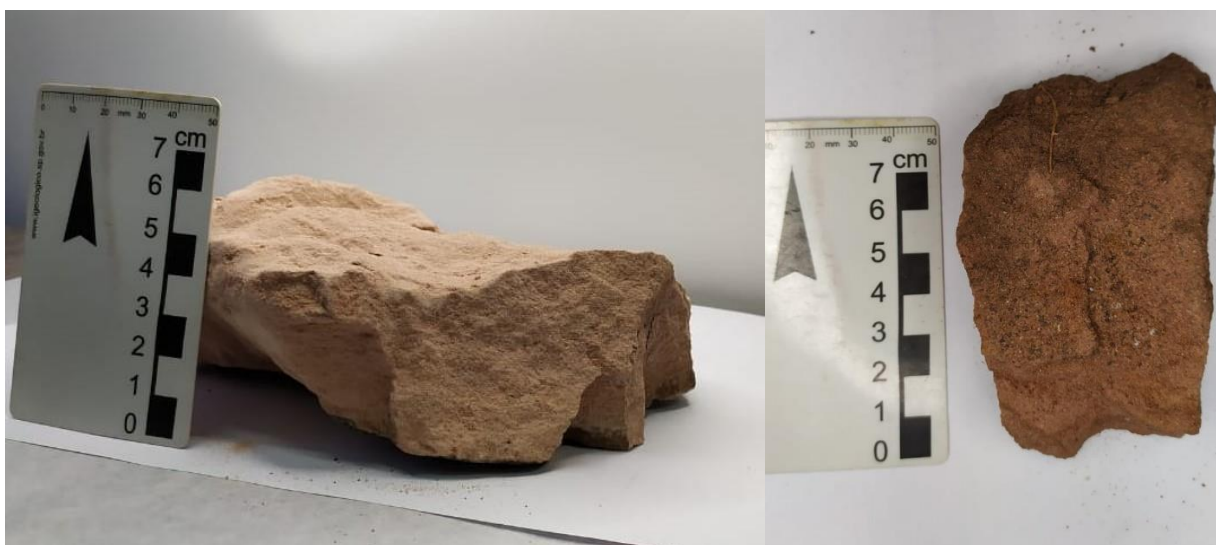
Figura 19 - Fotos tiradas durante a saída de campo.



Fonte: Autora.

Durante a etapa de campo foram coletadas algumas amostras de rocha em condição natural (Figura 20), em diferentes pontos do mapeamento, com a finalidade de ajudar na interpretação litológica e auxiliar assim na caracterização da área.

Figura 20- Amostras retiradas em campo.



Fonte: Autora.

As amostras utilizadas nos ensaios de cisalhamento foram moldadas de dois blocos de rocha retirados na encosta, local onde ocorreu o deslizamento. Blocos estes retirados por uma retroescavadeira, para alcançar a profundidade necessária, durante o trabalho de Porto (2018). A Figura 21 mostra a etapa da coleta. Posteriormente foram armazenados de forma a conservar as características originais do campo, e mantido na câmara úmida na Universidade Federal de Santa Maria.

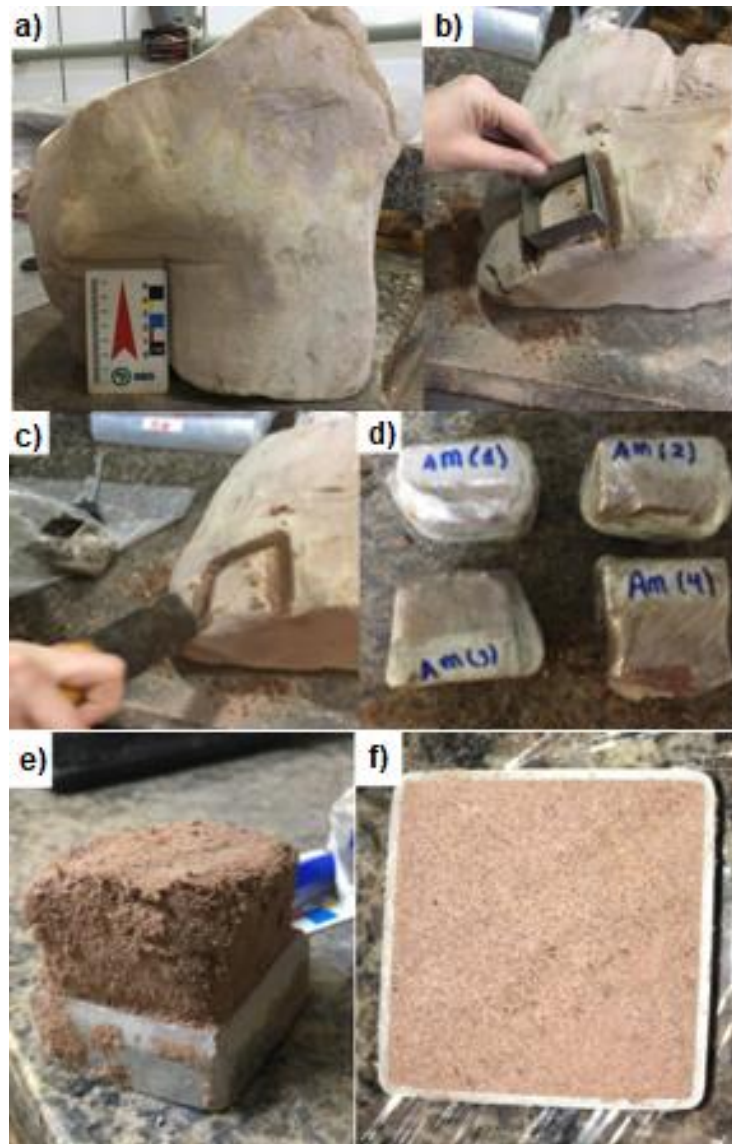
A partir destes blocos de rocha foi possível moldar os anéis para os ensaios de cisalhamento (Figura 22 a e b). Foram moldados 16 anéis, com a finalidade de realizar 12 ensaios. O molde dos anéis foi feito manualmente, através de espátulas e lâminas cortantes, conforme mostra a Figura 22 c. Após serem moldados, foram enrolados em filme plástico (Figura 2 d) e guardados dentro de uma caixa de isopor e armazenados novamente na câmara úmida, até o momento em que foram realizados os ensaios. A Figura 22 e, mostra os corpos de prova nos anéis, em fase de preparação, e posteriormente, já preparados para o ensaio, na Figura 22 f.

Figura 21- Retirada da amostra.



Fonte: Porto (2018)

Figura 22- a) Bloco de rocha utilizado para retirada das amostras para a realização dos ensaios de cisalhamento direto. b) Etapa de molde dos anéis para o ensaio. c) Etapa de molde dos anéis. d) Anéis moldados, antes de serem submetidos à câmara úmida. e) Anel pré moldado para o ensaio. f) Anel já pronto para o ensaio.



Fonte: Autora.

6.3 Etapa de laboratório

Durante esta etapa foram realizadas a análise mineralógica das rochas encontradas na área, utilizando as amostras retiradas em campo, os ensaios de

cisalhamento direto nas condições natural e inundada, com anéis moldados perpendiculares e paralelos ao plano de acamamento da rocha. Por fim foram analisados e comparados aos dados obtidos em outro trabalho realizado na área, porém em condições distintas, a fim de apontar qual seriam os resultados mais fiéis.

6.3.1 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto seguiu os procedimentos presente na normativa americana ASTM: D3080-11,. Já para a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obedecidas as normas ABNT NBR 11682/ 2009 (estabilidade de encostas).

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Universidade Federal de Santa Maria. Foi utilizada uma prensa de cisalhamento direto, da marca Ronald Top S/A, conforme mostra a Figuras 23. Na prensa, foi utilizada uma caixa bipartida (Figura 24), local onde vai a amostra que será submetida ao ensaio, com as dimensões de 5x5x2cm. Onde são colocadas placas metálicas, nas partes inferior e superior da amostra, com ranhuras no sentido perpendicular ao sentido do deslocamento, para evitar que a amostra se movimente e interfira nos resultados. Também são colocadas pedras de arenito poroso, que permite a circulação de água, facilitando a livre drenagem durante a execução do ensaio.

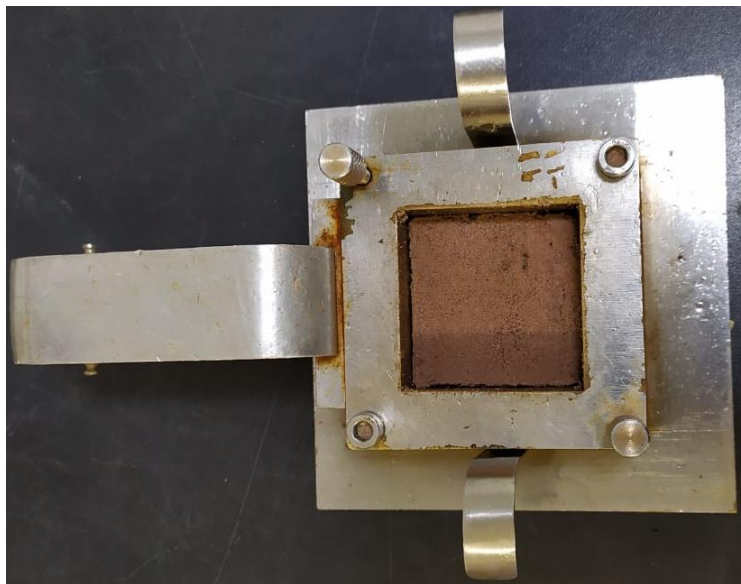
No primeiro momento, a amostra é submetida a uma força normal, e logo em seguida é aplicada a força cisalhante, força essa que é responsável pelo deslocamento horizontal da amostra, até que aconteça a ruptura do corpo de prova. Tanto o deslocamento horizontal como o vertical são medidos por deflectômetros, já a resistência da rocha ao cisalhamento é medida por um anel dinamométrico que está conectado à parte superior da caixa de cisalhamento. A força vertical é gerada pela aplicação de pesos que é pendurado ao equipamento por um braço de alavanca que permite a aplicação de elevadas tensões normais.

Figura 23- Prensa utilizada para o ensaio de cisalhamento.



Fonte: Autora.

Figura 24- Caixa bipartida onde a amostra é colocada para o ensaio.



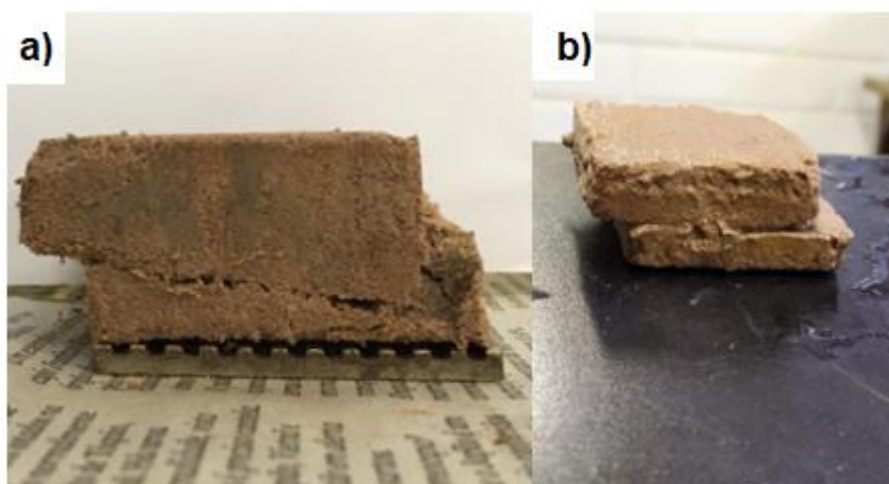
Fonte: Autora.

Foram realizados doze ensaios, os primeiros com amostras retiradas perpendiculares às camadas da rocha, em condições natural e inundada, e os seguintes foram realizados com os corpos de prova retirados paralelos às

camadas, ambas as condições foram utilizadas amostras de rocha indeformada. As tensões aplicadas foram 25kPa, 50kPa e 100kPa, para todos os corpos de prova.

Os corpos de prova foram cisalhados em velocidade constante de 0,034mm/min até que fosse atingido o deslocamento de 1,0 cm (Figura 25). Os ensaios tiveram duração média de 1 hora e 30 minutos cada um, e nos ensaios em condição inundada, aguardou-se cerca de 30 minutos antes de começar o deslocamento horizontal, com a caixa da prensa cheia d'água, para que fosse estabilizado o deslocamento vertical.

Figura 25- a) Corpo de prova após o ensaio na condição natural. b) Corpo de prova após o ensaio na condição inundada.



Fonte: Autora.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

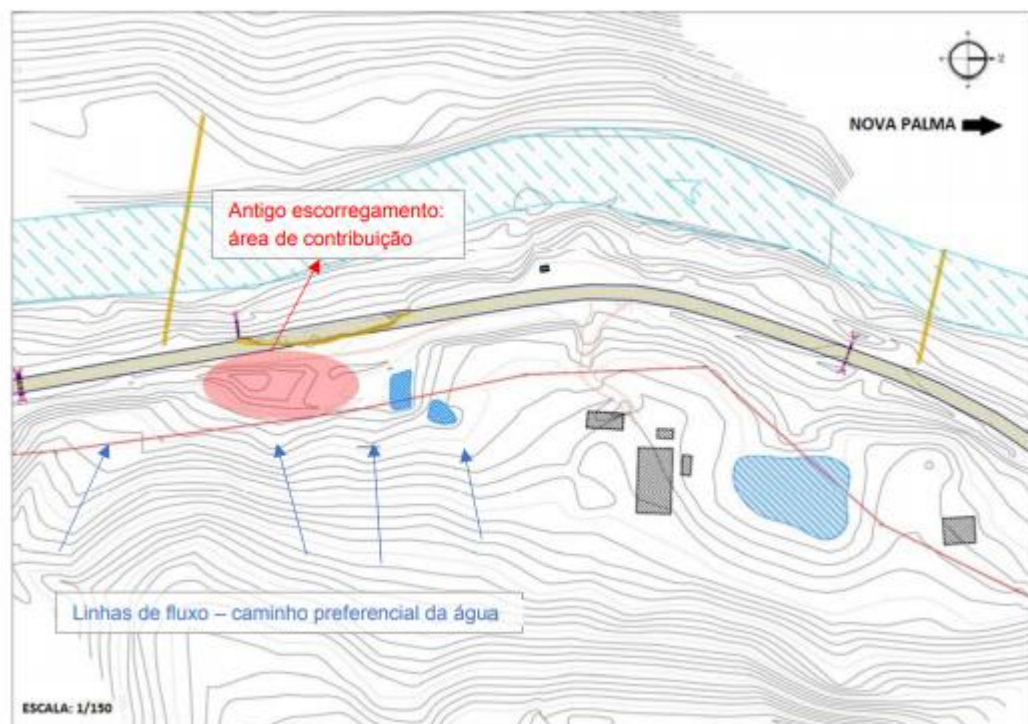
Neste tópico do trabalho, serão apresentados resultados e discussões acerca da caracterização geológica da área de estudo, buscando relacionar aos movimentos de massa local. Nesse sentido, foram considerados dados obtidos no trabalho de campo, análise de imagens de satélites e referências obtidas da bibliografia. Além disso, também serão discutidos os ensaios de cisalhamento direto, que foram efetuados durante a etapa de laboratório. Por fim, com base em

todas as informações coletadas e resultados obtidos, estes serão correlacionados a outro trabalho realizado anteriormente no mesmo local de estudo.

7.1 Contexto geológico da área de estudo

Com base na topografia de detalhe (Figura 26), trabalho de campo e descrição da geologia regional e local, é possível observar que a rodovia está sujeita ao alto risco de romper novamente, tendo em vista que, a estrada encontra-se localizada na base de uma encosta íngreme, associada a planície de inundação do Rio Soturno (PORTO, 2018). Além disso, o Rio Soturno, no trecho da rodovia que faz parte deste estudo, é retilíneo e está encaixado em uma falha de direção Leste-Oeste. Condição que pode estar contribuindo para os movimentos de massa que ocorram, pois as linhas de fluxo de direção em que a água percola pela encosta, até o Rio, seguem a orientação da falha, ou seja a falha contribui para que toda a água acabe chegando até a encosta.

Figura 26- Mapa topográfico da região, indicando a porção da encosta cujo plano de curvatura é côncavo.

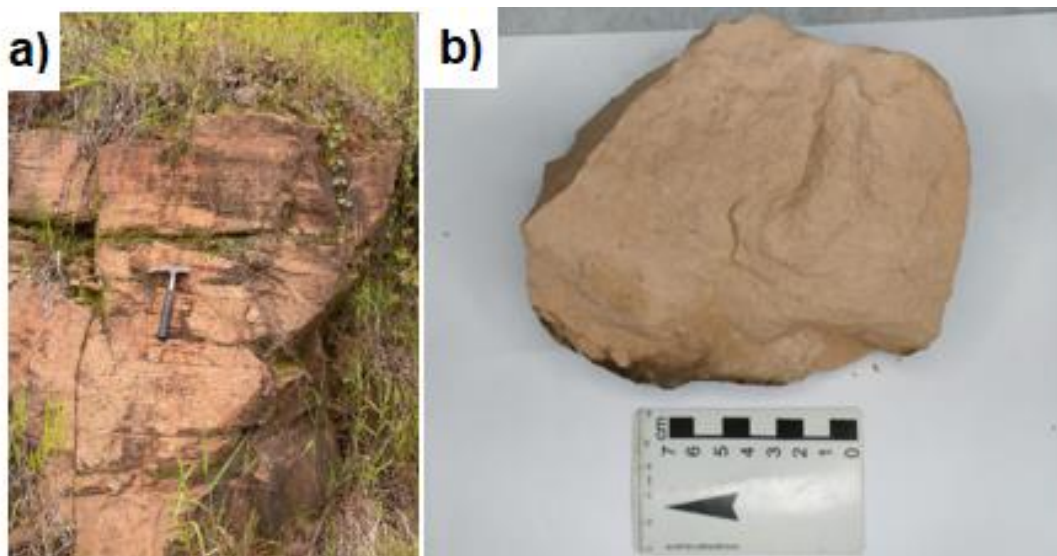


Fonte: Porto (2018).

Geologicamente, a área de estudo está inserida na Formação Caturrita e na Formação Botucatu e, a oeste desta área, é possível observar a presença de basaltos da Formação Serra Geral. Estratigraficamente, ocorrem os arenitos da Formação Caturrita na base, logo acima os arenitos da Formação Botucatu, à oeste os basaltos da Formação Serra Geral e novamente o arenito intertrapp da Formação Botucatu.

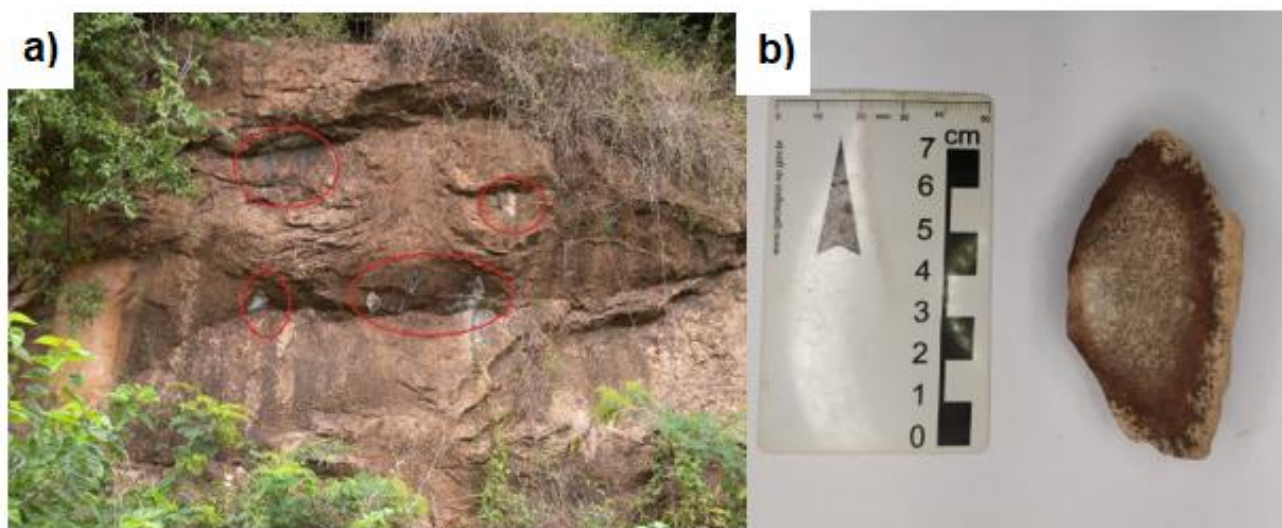
Os arenitos da Formação Caturrita (Figura 27), consistem em uma rocha de coloração clara, com granulometria fina e presença de lentes de siltito e argila. Durante o mapeamento geológico, foi possível notar a presença de interclastos de argilito e siltito (Figura 28).

Figura 27- a) Afloramento do Arenito Caturrita. b) Amostra do Arenito Caturrita retirada em campo.



Fonte: Autora.

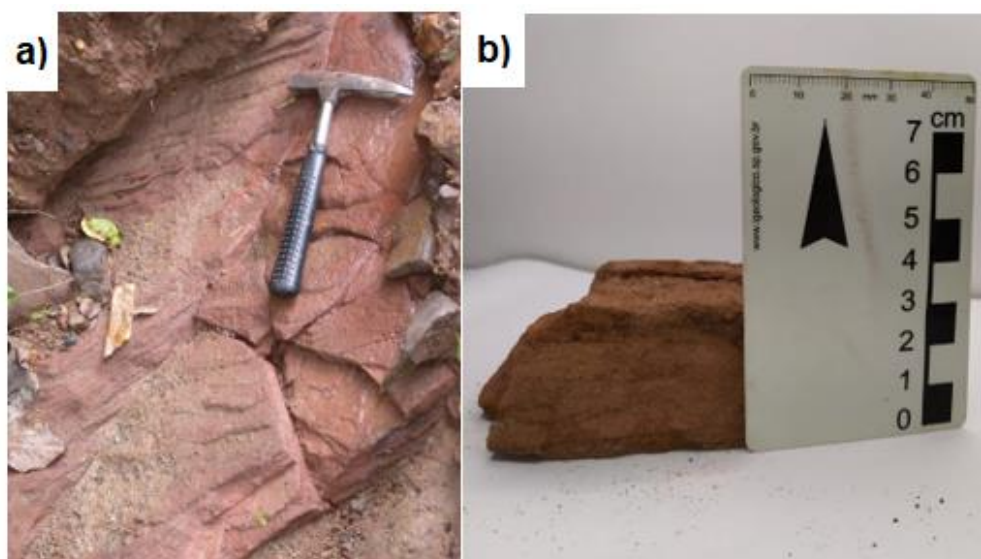
Figura 28- a) Arenito Caturrita com interclastos de rocha. b) retirado do Arenito Caturrita.



Fonte: Autora.

Os arenitos da Formação Botucatu (Figura 29) apresentam coloração mais escura, em relação aos da Formação Caturrita, assim como, granulometria mais grossa. Essa diferença se dá justamente por tratar-se de um arenito de origem eólica, enquanto a Formação Caturrita apresenta uma origem fluvial.

Figura 29- a) Arenito Botucatu aflorando na estrada. b) Amostra do Arenito Botucatu retirada em campo.



Fonte: Autora.

Os basaltos da Formação Serra Geral (Figura 30), aparecem em locais de não conformidade e discordância, estes sills basálticos, maciços, foram encontrados pontualmente, à oeste do escorregamento e sobre os arenitos da Formação Botucatu.

Figura 30- Sills basálticos da Formação Serra Geral.



Fonte: Autora.

O contexto geológico do local contribui diretamente para que os movimentos de massa ocorram. A litologia do local é praticamente toda baseada em arenitos, das Formações caturrita e Botucatu, rochas estas que são mais susceptíveis aos processos de intemperismo e erosão. Além do mais, a encosta encontra-se sobre o contato entre estas duas Formações, o que pode ter contribuído para o processo de ruptura. Além disso, o local trata-se de uma zona de falha.

Por conseguinte, o relevo do local de estudo apresenta-se encaixado nessa zona de falha. A base da encosta situa-se exatamente na margem do Rio Soturno, como destacado na imagem de satélite da Figura 31, onde é possível observar depósitos aluviais e coluvionares. A encosta encontra-se recoberta por depósitos coluvionares, de matriz arenosa, onde também foi possível observar blocos de rocha com tamanhos variados (Figura 32).

Figura 31- Imagem de satélite indicando a encosta e o local da ruptura.



Fonte: Google Earth, com modificações da autora.

Figura 32- Encosta recoberta por solo coluvionar com blocos de rocha.



Fonte: Porto (2018).

No trecho estudado da rodovia, ocorreu uma ruptura do tipo circular, onde se observa no local degraus de abatimento. Além disso, cerca de 100 metros antes e após o trecho da rodovia que cedeu, foi identificado no pavimento asfáltico evidências que permitem inferir que a rodovia continua se movimentando .

Conforme pode ser observado na Figura 33 A, há um rebaixamento na pavimentação, assim como, na Figura 33 B, as trincas no asfalto indicam tratar-se de uma área instável, ou seja, o local apresenta alto risco de uma nova ruptura.

Figura 33- a) Trecho há cerca de 100m antes da ruptura da rodovia, onde já é possível observar um rebaixamento na pavimentação. b) Trincas no asfalto, 100m depois da ruptura.



Fonte: Autora.

Ao analisar o relevo no local da encosta, é possível ver sinais de rastejo, em ambos os lados do Rio Soturno e da rodovia. Na encosta oposta à rodovia, é observado degraus de abatimento bem evidentes, fato esse não tão presente na outra margem. Portanto, pode-se então dizer que os movimentos de massa ocorrem, na grande maioria e com maior influência na encosta oposta.

Além disso, ao longo do mapeamento geológico da área, foi possível verificar que essa forma de relevo se repete pelo entorno do local da ruptura, ou seja, estes degraus não são um caso isolado. Deste modo, nas imagens das Figura 34 e Figura 35, datadas de 2020 e 2021, respectivamente, é possível observar o quanto o processo está evoluindo de forma rápida.

Figura 34- Encosta oposta à rodovia, onde é possível observar os degraus de abatimento (2020).



Fonte: Autora.

Figura 35- Encosta oposta à rodovia, onde é possível observar os degraus de abatimento (2021).



Fonte: Autora.

O rio Soturno é um rio do tipo encaixado, em períodos de enchentes, o seu nível de água sobe rapidamente, consequentemente, ocasiona erosão na base do

aterro da rodovia. Além disso, é possível observar rupturas do tipo circular na margem direita deste rio (margem oposta à rodovia), causadas pela erosão. Rupturas estas que moveram grande quantidade de blocos de rocha e sedimentos para o leito esquerdo do rio e ocasionou mudança na margem de retilínea para convexa. Da mesma forma, a margem esquerda do rio, margem em que se encontra a rodovia, também sofre processos erosivos, tornando-se uma margem côncava, o que possivelmente pode ter sido a causa da ruptura.

Além disso, é possível notar a presença de 3 açudes na encosta onde se encontra a rodovia. Quando esses açudes atingem sua capacidade máxima de água, extravasam, contribuindo com o aumento da vazão de água e influenciando no processo, pois essa água, quando transborda, vai direto para canaleta de drenagem localizada na lateral da rodovia, causando uma sobrecarga na mesma. No entanto, no local há a presença de bueiros que fazem parte do sistema de drenagem da rodovia, porém, atualmente encontram-se totalmente obstruídos pela carga sedimentar e a vegetação presentes no local (conforme já mencionado, a encosta é coberta por material aluvial e coluvionar). A carga de sedimentos que se desprende da encosta, se acumula continuamente na sua base, obstruindo assim os sistemas de drenagem do local. Além do mais, gerando mudança na geometria original da encosta e causando instabilidade no local.

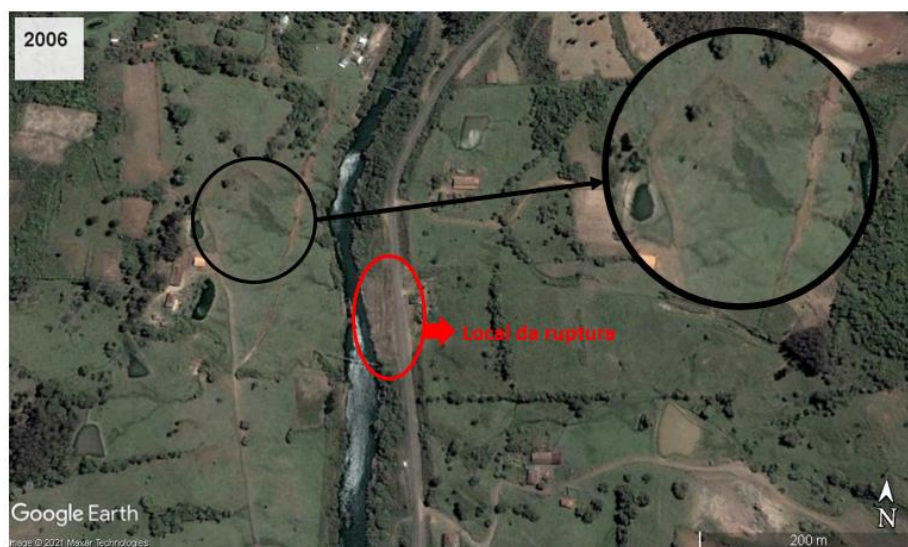
7.2 Análise cronológica dos movimentos de massa

O local de estudo vem há anos sofrendo as consequências de movimentos de massa, como pode ser observado pelas evidências estruturais que marcam a paisagem no local. Sabendo que, há diversos processos associados as diferentes condicionantes, faz-se necessário, entender qual o processo que ocorre na área.

Portanto, a seguir será feita uma análise cronológica através de imagens de satélite extraídas do Google Earth Pro dos processos que ocorrem na área. Por meio desta avaliação é possível aferir que a área de estudo há anos apresenta características de instabilidade.

A ruptura da estrada ocorreu posterior ao período de 2006 a 2013. No entanto, por meio das imagens de satélites dos anos de 2006, 2009 e 2013 (Figura 36, Figura 37 e Figura 38, respectivamente), é possível observar que para este período, o movimento de massa do tipo rastejo já era presente na margem esquerda do rio. Além disso, embora os pesquisadores discutam que esse tipo de movimento seja lento, no caso da rodovia a ruptura passou de rastejo para escorregamento rotacional que é um movimento mais rápido.

Figura 36- Imagem de satélite do ano de 2006, evidenciando o local onde está ocorrendo o processo de rastejo.



Fonte: Google Earth com modificações da autora.

Figura 37- Imagem de satélite tirada em 2009, do local onde, em 2015, houve a ruptura da rodovia.



Fonte: Google Earth.

Figura 38- Imagem de satélite tirada em 2013, do local onde, dois anos depois, houve a ruptura da rodovia.



Fonte: Google Earth.

Conforme salientado, a ruptura ocorreu no ano de 2015, porém, não foi possível obter imagem de satélite desta data. No entanto, na imagem datada de 2016 (Figura 39) presente no Google Earth, uma nuvem dificulta verificar de modo claro a área de estudo. Porém, foi apresentada neste trabalho para fins de comprovação do rompimento da rodovia. Por sua vez, nas imagens dos anos subsequentes, 2018 até 2021 (Figura 40, Figura 41 e Figura 42, respectivamente), é possível observar a ruptura da estrada, que possivelmente vem se agravando, além do agravamento do rastejo na margem esquerda do rio.

Figura 39- Imagem de satélite do ano de 2018, evidenciando o local onde está ocorrendo o processo de rastejo.



Fonte: Google Earth com modificações da autora.

Figura 40- Imagem de satélite do ano de 2019, da área de estudos, quatro anos após a ruptura da rodovia.



Fonte: Google Earth.

Figura 41- Imagem de satélite da atual situação da área de estudo.



Fonte: Google Earth.

Através da análise das imagens é possível observarmos que ao longo desses quinze anos o processo ocorre de forma contínua, ou seja, não se pode dizer que apenas um fator ou evento foi responsável pela ruptura da rodovia. Se compararmos a imagem de 2006 com a imagem de 2021, é evidente que o Rio Soturno sofreu um estreitamento em seus leitos, tanto do lado esquerdo como do lado direito. Estreitamento este causado pelo movimento de rastejo que ocorre na encosta à esquerda do rio. Este processo resulta no acúmulo de sedimentos no leito esquerdo, fazendo com que o corpo d'água modifique seu curso, se posicionando mais para a direita, o que causa a erosão da encosta onde está localizada a Rodovia RS-149.

7.3 Ensaios de cisalhamento direto

Para a obtenção dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito e coesão) foram realizados ensaios de cisalhamento direto na condição natural e inundada. Salienta-se que em ambos os casos foram utilizadas amostras indeformadas. Os ensaios foram realizados para as tensões normais de 25, 50 e 100 KPa e uma velocidade baixa para evitar a geração de pressão interna nos corpos de prova.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados seguindo duas condições, no primeiro caso, respeitou-se a orientação das camadas estruturais da rocha e no segundo caso, as amostras foram extraídas perpendicularmente às camadas. Na Tabela 4 estão os resultados da resistência ao cisalhamento do arenito, para todas as condições.

Tabela 4- Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Condição do material	Tensão Vertical (kPa)	Tensão de cisalhamento (kPa)	
		Natural	Saturado
	25	12,4	46,1
Paralelo	50	39,5	157,2
às camadas	100	61,6	253,9
	25	132,1	122,5
Perpendicular às	50	181,7	155,1
camadas	100	263	525,9

Fonte: Autora.

Na Tabela 5, encontram-se os índices físicos do material, representados pelos seus valores médios. Estes valores foram obtidos através das amostras de arenitos que foram ensaiadas.

Tabela 5- Índices físicos dos materiais.

	Condição	Tensão (kPa)	w (%)	e (%)	s (%)
Paralelo	Natural	25	18,1	0,623	78,55
		50	18,1	0,76	64,46
		100	15,9	0,7	61,07
	Saturado	25	20,5	0,623	89,11
		50	20	0,67	80,53
		100	20,4	0,83	66,37
Perpendicular	Natural	25	16,9	0,54	84,95
		50	17,5	0,55	85,32
		100	17,8	0,58	82,29
	Saturado	25	21,1	0,748	76,49
		50	21,5	0,73	79,31
		100	23,8	0,76	85

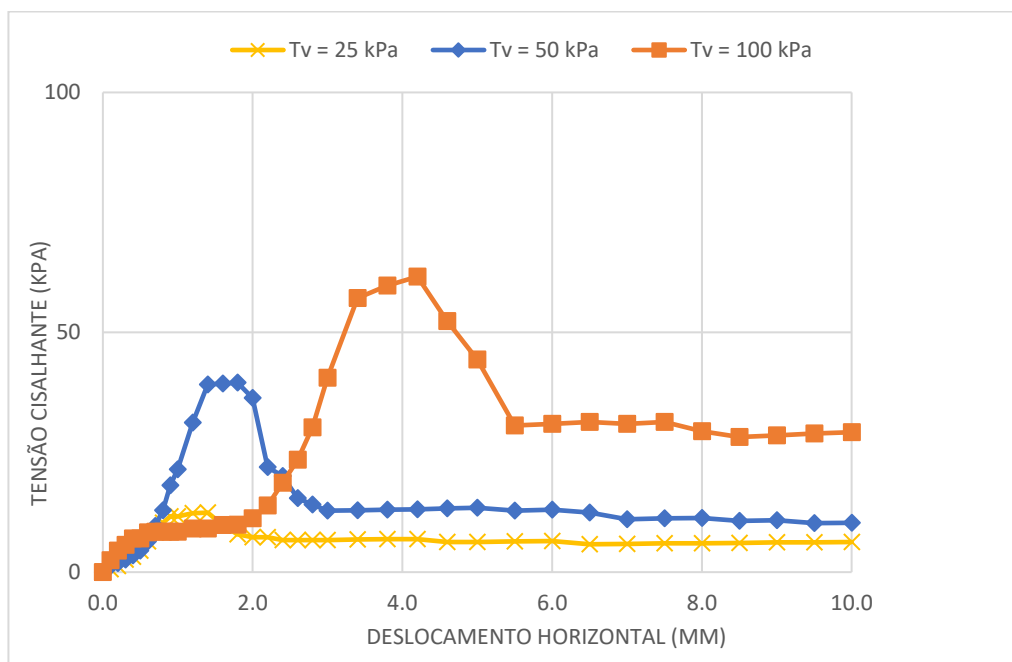
Legenda:

w= teor de umidade; e= índice de vazios; s= grau de saturação.

Fonte: Autora.

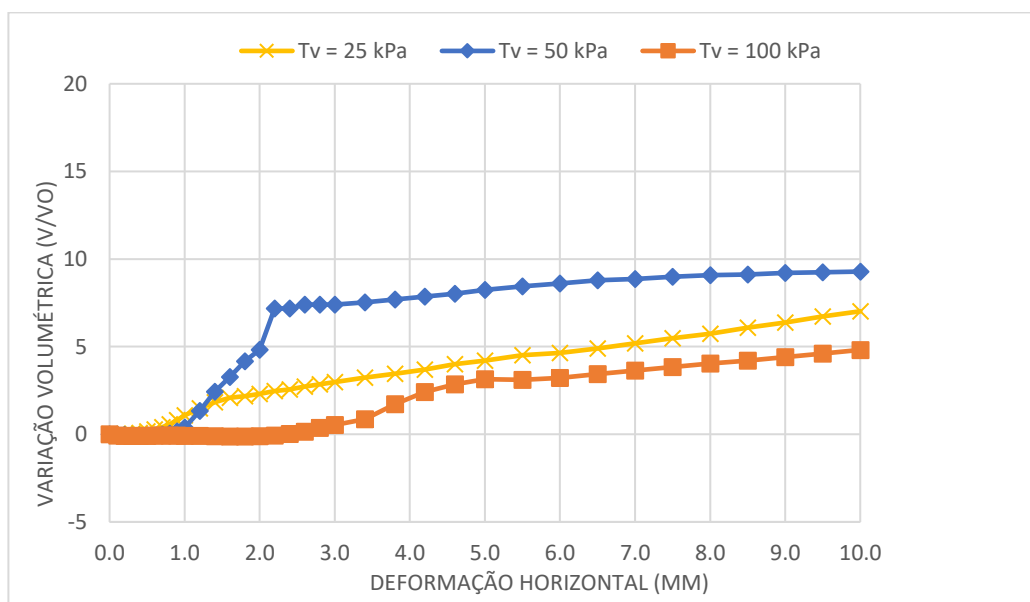
Abaixo estão os gráficos gerados a partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Estes gráficos representam as curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (Figuras 42, 44, 46 e 48), e variação volumétrica *versus* deslocamento horizontal (Figuras 43, 45, 47 e 49), respectivamente, nas condições natural e inundada, para as tensões normais 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa, para as amostras paralelas e perpendiculares as camadas do arenito.

Figura 42- Amostra paralela às camadas, na condição natural.



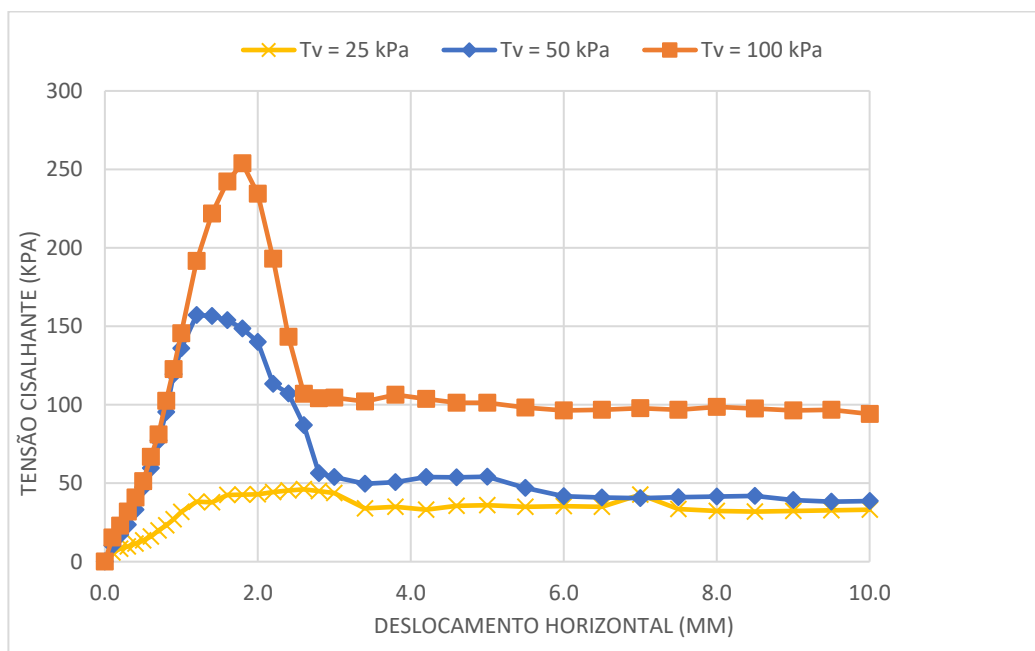
Fonte: Autora.

Figura 43- Amostra paralela às camadas, na condição natural.



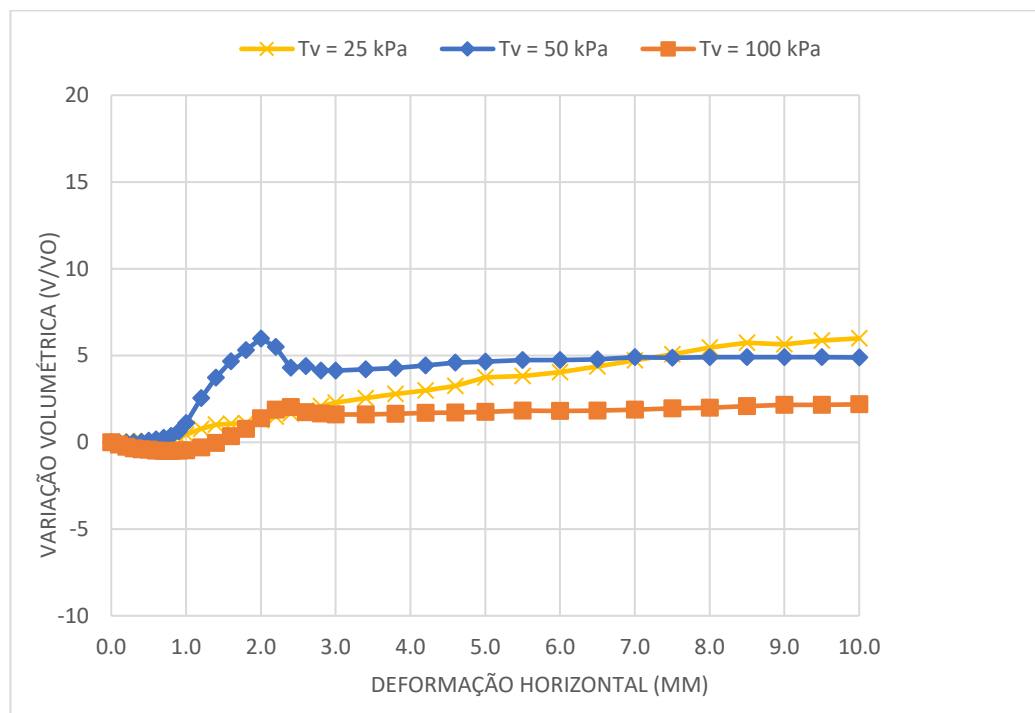
Fonte: Autora.

Figura 44- Amostra paralela às camadas, na condição inundada.



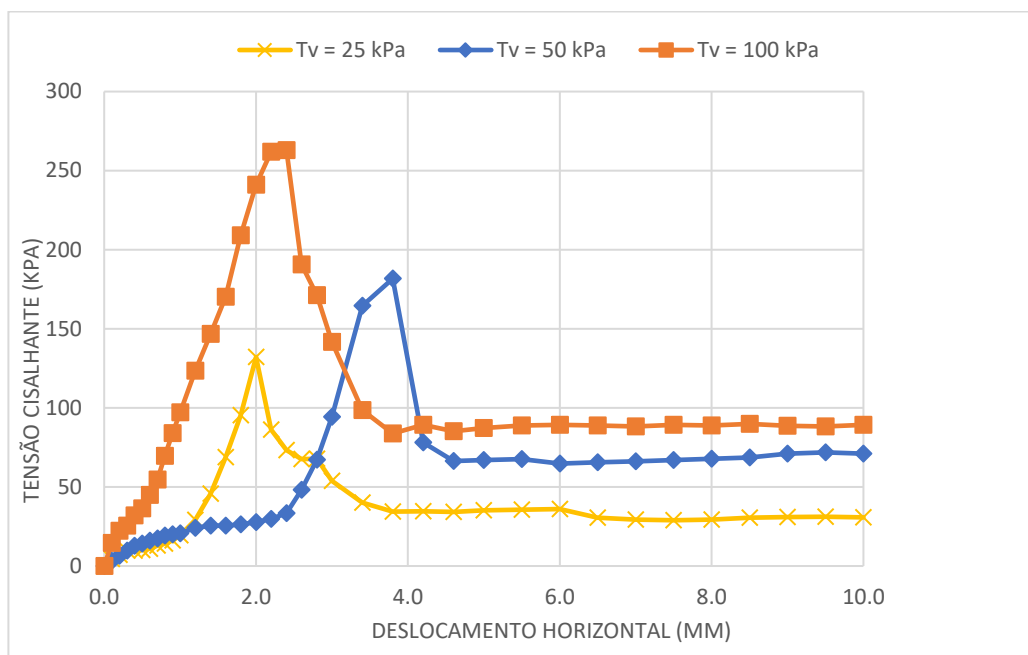
Fonte: Autora.

Figura 45- Amostra paralela às camadas, na condição inundada.



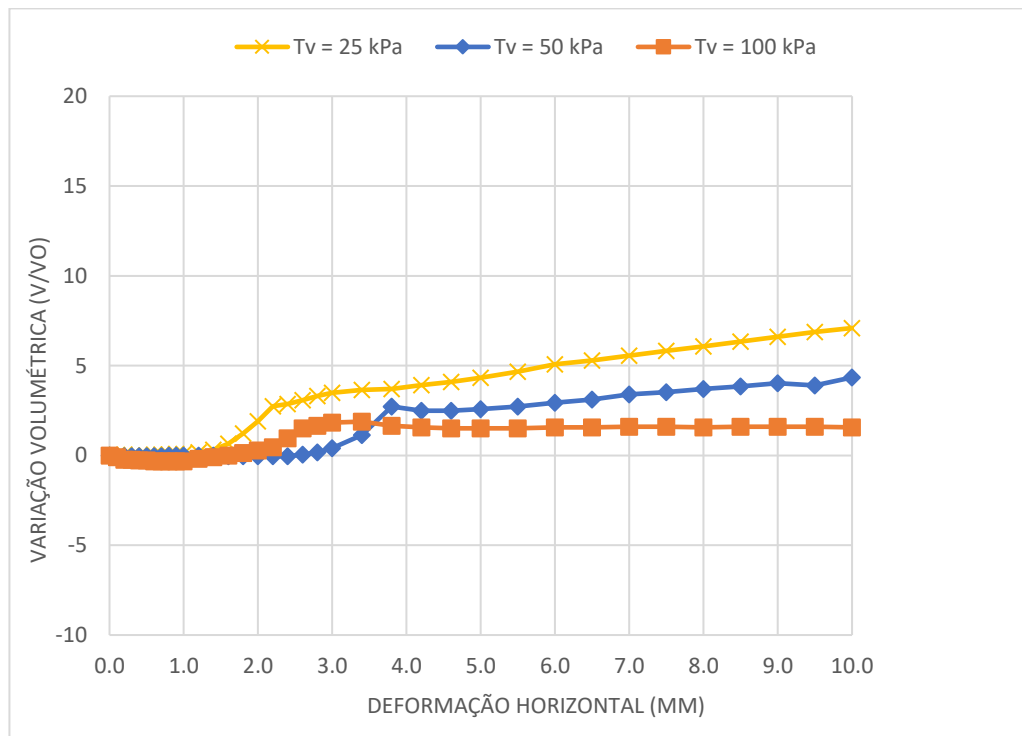
Fonte: Autora.

Figura 46- Amostra perpendicular às camadas, na condição natural.



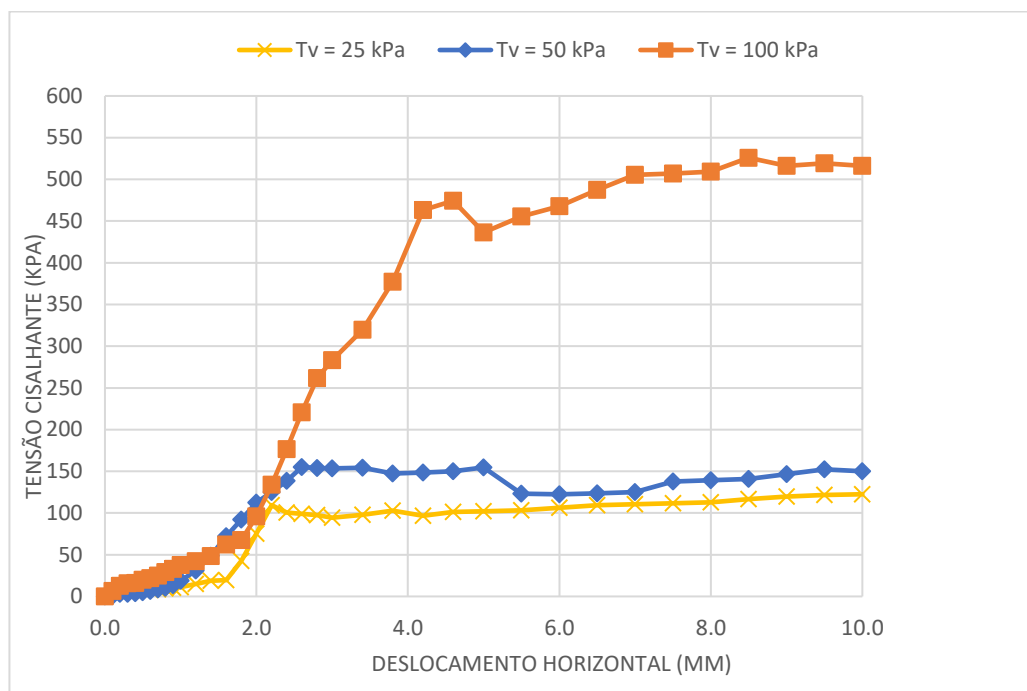
Fonte: Autora.

Figura 47- Amostra perpendicular às camadas, na condição natural.



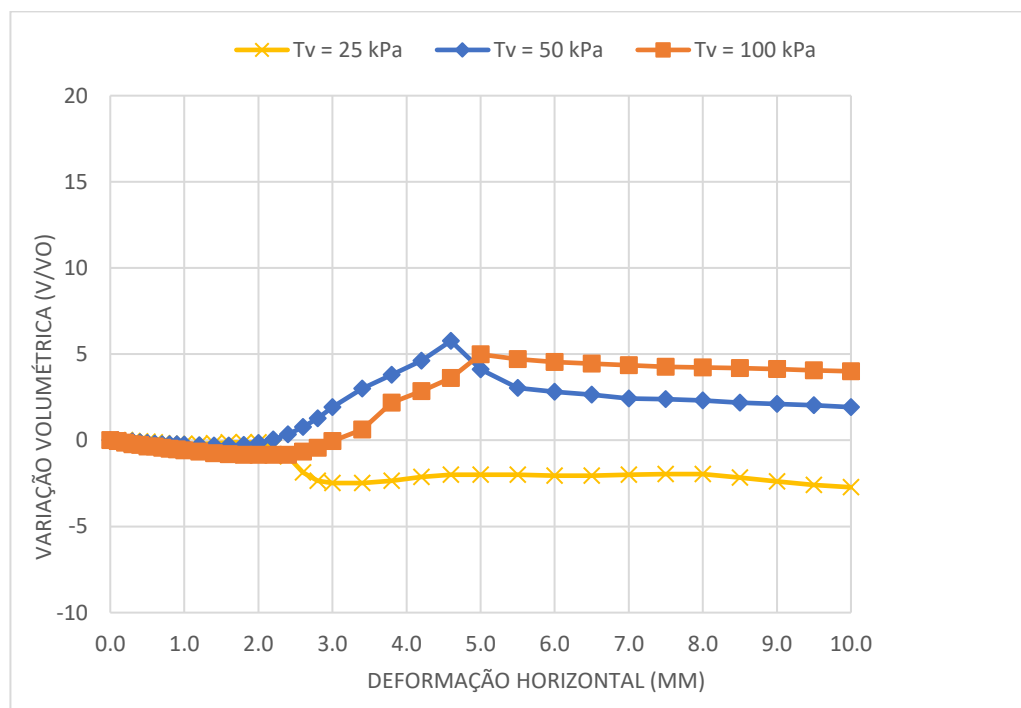
Fonte: Autora.

Figura 48- Amostra perpendicular às camadas, na condição inundada.



Fonte: Autora.

Figura 49- Amostra perpendicular às camadas, na condição inundada.



Fonte: Autora.

Com base nos gráficos de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal obtidos através dos ensaios, é possível perceber um aumento da tensão cisalhante para cada incremento da tensão normal. Além disso, para uma mesma tensão normal aplicada, a tensão cisalhante aumenta com o acréscimo da umidade, para as amostras paralelas ao acamamento da rocha. Ou seja, quando em condição saturada, o pico de tensão cisalhante foi superior a condição natural. Já para as amostras perpendiculares ao acamamento, apenas para a tensão de 100 Kpa apresentou essa mesma relação. No entanto, independente do plano de orientação da amostra, as curvas tensão-deformação apresentam um comportamento semelhante, com um crescimento da tensão de cisalhamento pelo deslocamento horizontal, até certo ponto, onde, a partir daí, as tensões tendem a permanecer constantes.

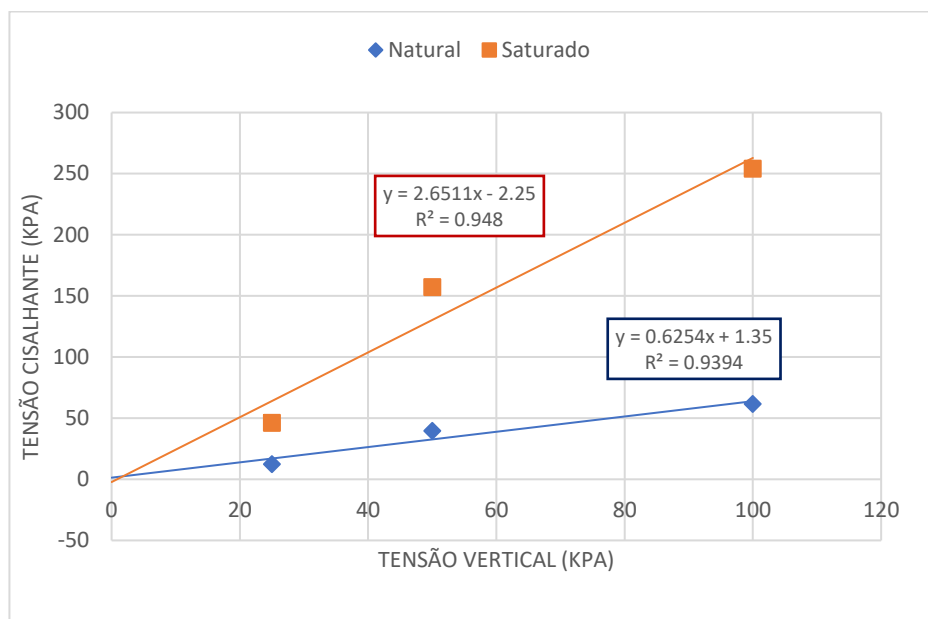
Além disso, a amostra na condição saturada apresenta um incremento em todas as tensões normais aplicadas, quando comparada com o material na condição natural. As curvas demonstradas nos gráficos representam o comportamento de um material do tipo “frágil”. Em outras palavras, cada amostra avaliada tem um pico de resistência ao cisalhamento, onde a ruptura é definida pela máxima tensão cisalhante suportada pelo material antes de romper.

Já em relação aos gráficos de variação volumétrica *versus* deslocamento horizontal, de modo geral, a variação volumétrica diminui com acréscimo do teor de umidade e o incremento da tensão normal aplicada, salvo em algumas situações. Para as amostras paralelas às camadas, tanto na condição natural quanto saturada, observa-se a ocorrência de dilatação. Por conseguinte, nas amostras perpendiculares às camadas, na condição saturada, nota-se que, inicialmente sofreu uma compressão seguida por expansão, com exceção para a tensão de 25 Kpa, que sofreu apenas compressão.

Como já era esperado, nos ensaios realizados com as amostras paralelas a resistência foi inferior às amostras com orientação perpendicular a estrutura da rocha. É normal que a menor resistência esteja associada ao plano de maior fraqueza da rocha. A maior resistência ao cisalhamento em amostras saturadas, pode ser explicada pela presença de camada mais cimentada por óxido de ferro o que é comum nos arenitos da Formação Caturrita conforme já descrito no trabalho de Porto (2018).

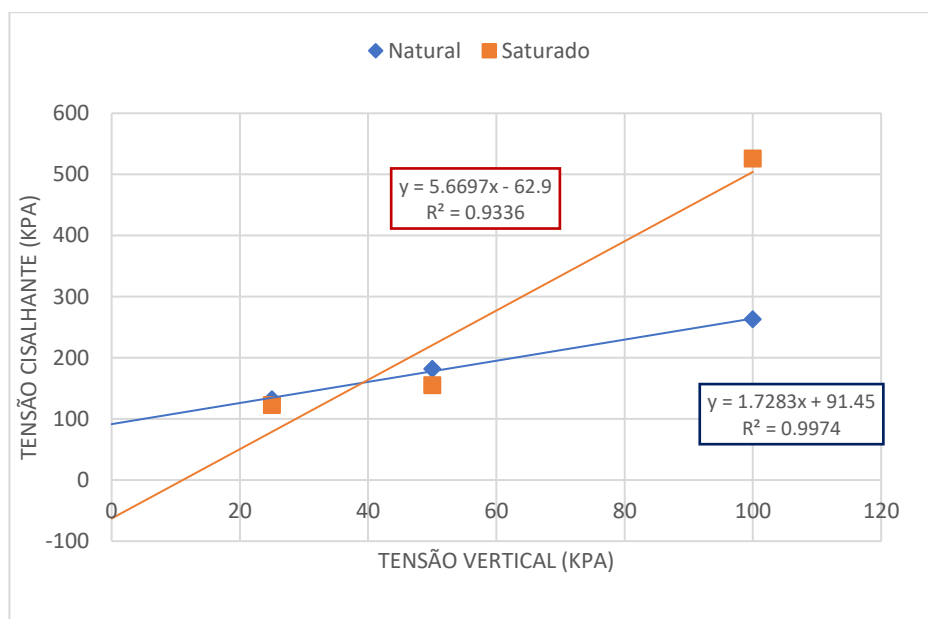
Os gráficos das Figuras 50 e 51 apresentam as envoltórias de resistência ao cisalhamento para as condições estudadas.

Figura 50- Envoltória para as amostras paralelas.



Fonte: Autora.

Figura 51- Envoltória para as amostras perpendiculares.



Fonte: Autora.

A partir das envoltórias demonstradas na Figura 50 e Figura 51 é possível verificar que há coesão apenas nas amostras naturais. A condição inundada pode contribuir para diminuir a cimentação entre as partículas e consequentemente a sua coesão. No entanto, o ângulo de atrito apresentou valores diferentes do esperado para as condições naturais e inundadas sendo estes maiores do que os

encontrados nas amostras naturais o que pode ser explicado pela presença de alguma camada mais resistente (oxidação) conforme Tabela 6.

Tabela 6- Parâmetros de resistência.

Condição	Natural	θ	c
Paralela	Natural	32,02	1,35
	Saturada	69,33	0
Perpendicular	Natural	59,94	91,45
	Saturada	79,99	0

Fonte: Autora.

Por conseguinte, foram comparados os resultados obtidos nesta pesquisa com os de Porto (2018) (Tabela 7). Ao analisar a amostra na condição natural, nota-se que, os resultados da amostra remoldada apresentam semelhança ao encontrado neste estudo com coeficiente de variação na ordem de 11%, sendo esse um indicativo de baixa dispersão. Entretanto, o mesmo não ocorre para a condição inundada. Ressalta-se que ao remoldar, embora busque obter as mesmas condições de campo nem sempre isso é possível. Conforme mencionado pela própria autora. por intermédio da análise petrográfica, na etapa de compactação ocorreu a quebra dos grãos, que de certo modo interfere na resistência do material.

Tabela 7- Comparação dos parâmetros de resistência com o trabalho de Porto (2018).

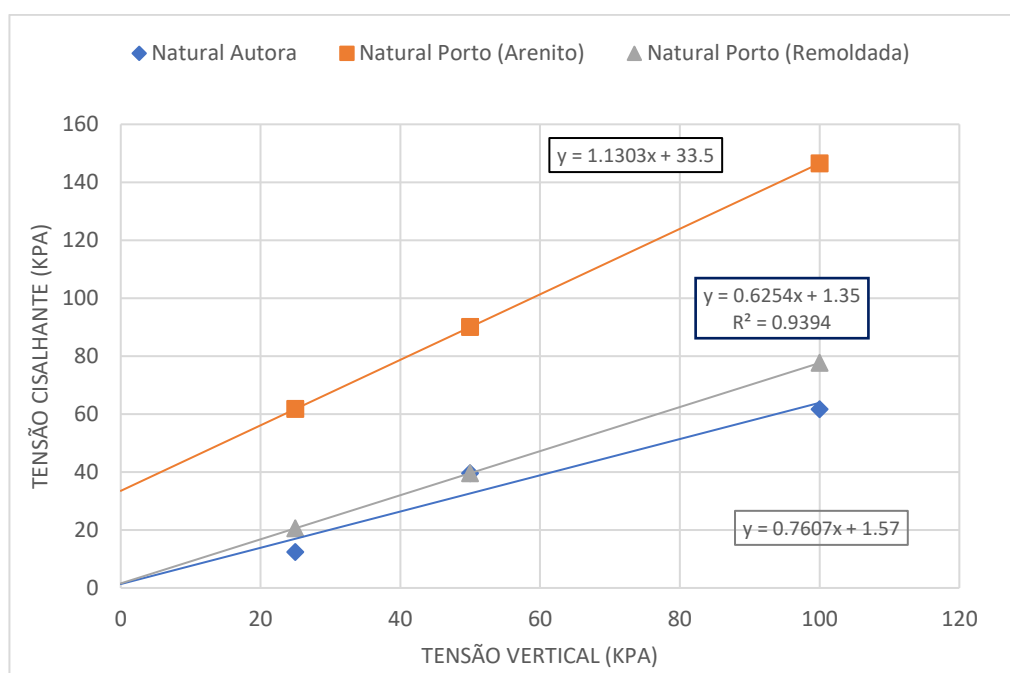
Condição	Natural	θ	c
Porto, 2018 (arenito)	Natural	48,5	33,5
	Saturada	43,6	12,7
Porto, 2018 (remoldada)	Natural	37,26	1,57
	Saturada	36,5	0,30

Autora	Natural	32,02	1,35
	Saturada	69,33	0

Fonte: Autora.

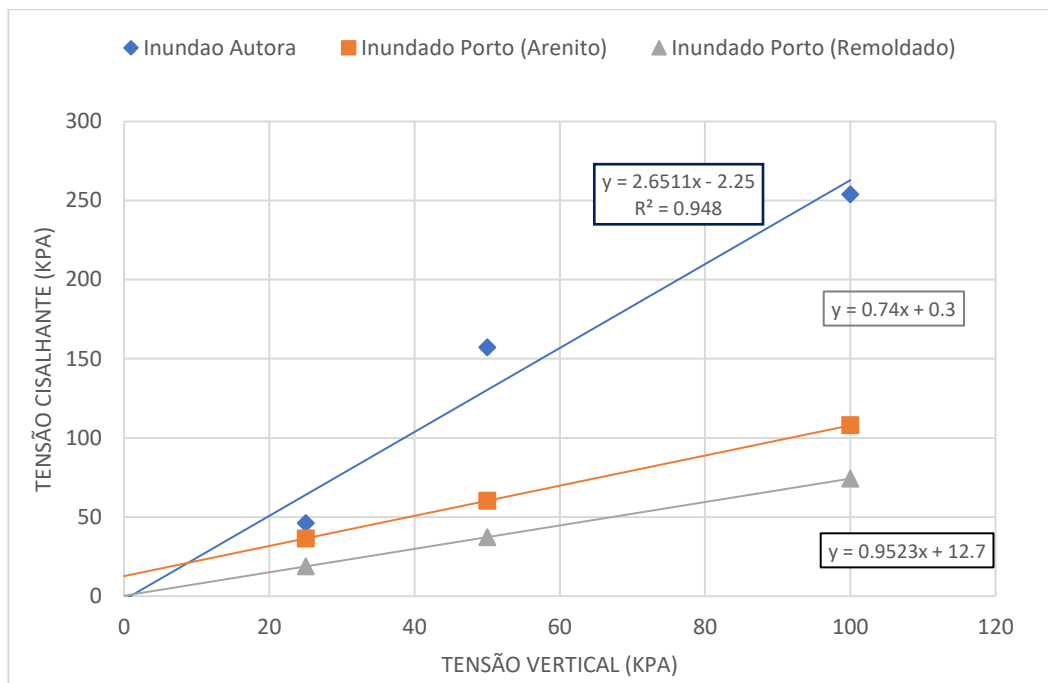
As Figuras 52 e 53 mostram os gráficos da envoltória de ruptura para amostra paralela ao plano de acamamento da rocha, obtidas através dos ensaios de cisalhamento, assim como, os dados de Porto (2018) obtidos através de ensaios de cisalhamento com amostras do arenito em condição natural e remoldada.

Figura 52- Comparação com as envoltórias em condição natural obtidas por Porto (2018).



Fonte: Autora.

Figura 53- Comparação com as envoltórias em condição inundada obtidas por Porto (2018).



Fonte: Autora.

Jaeger et al., (2007) descreve que as propriedades mecânicas da rocha variam não apenas entre diferentes tipos de rocha, mas entre diferentes corpos de prova retirados de uma mesma rocha. Sendo assim, e de posse aos resultados apresentados, nota-se que o arenito da Formação Caturrita é um material bastante heterogêneo, como pode ser observado pela diferença nos resultados na condição saturada em ambas as amostragens. Portanto, faz-se necessário a realização de uma campanha amostral com maior número de amostras para avaliar de modo mais preciso os resultados. Entretanto, em decorrência da atual situação de pandemia que estamos vivendo, o acesso aos laboratórios e realização de nova coleta em campo, inviabilizaram a realização de novos ensaios.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho buscou descrever e interpretar os movimentos de massa das encostas do Rio Soturno, às margens da RS-149, que ocorreram em 2015 após

uma enchente. O trabalho contou com a realização de um mapeamento geológico, ensaios de cisalhamento direto e com a pesquisa em bibliografias e trabalhos anteriormente realizados na área. Para tanto, detectou-se que a encosta se encontra coberta por material aluvio-coluvionar. Material este que está sobre as rochas sedimentares das Formações Caturrita e Botucatu, arenitos e siltitos.

É possível observar movimentos de massa, como rastejo, tanto na encosta onde está localizada a rodovia, quanto na encosta oposta, além destes movimentos naturais que são responsáveis pela transformação da topografia do local, ainda há uma forte influência da ação antrópica na região, fator que implica diretamente na drenagem superficial das águas. Pois não ocorre drenagem suficiente quando, em períodos de chuvas intensas, os açudes construídos pelos moradores extravasam. Sendo assim, a água desses açudes acaba acumulando ao lado do aterro da rodovia, local que em épocas chuvosas já se encontra sobrecarregado. Este pode ter sido um dos fatores que levaram à ruptura da rodovia. Outro motivo para que tenham ocorrido esses movimentos de massa, é o fluxo de água, tanto superficial quanto subsuperficial, que convergem para a base da encosta. Vale lembrar que em períodos de chuvas intensas, o nível de água do rio sobe rapidamente, o que causa erosão na base do aterro da encosta em que se encontra a estrada, fator que contribui para que o processo de queda ocorra.

Inicialmente presumiu-se que a ruptura havia ocorrido no contato entre as duas litologias que se encontram sob a rodovia, os arenitos da Formação Caturrita e Formação Botucatu, pois pelas características da ruptura imaginava-se que este contato era o responsável pela instabilidade da estrutura da rodovia. Os ensaios de cisalhamento foram realizados com objetivo de analisar os parâmetros de resistência da rocha, tanto para a condição paralela ao plano de acamamento da rocha, quanto perpendicular. Porém, as características da rocha, como granulometria, composição, tamanho de grão e cimentação, se mostraram bastante heterogêneas. Em função dessa heterogeneidade da rocha e da pequena quantidade de amostras ensaiadas, os resultados não foram tão representativos como esperado.

Para trabalhos futuros recomenda-se a realização de novos ensaios de cisalhamento, com a coleta de novas amostras, e com uma amostragem maior, gerando assim resultados mais precisos para a obtenção dos parâmetros de resistência do solo. Uma nova análise de estabilidade, através dos dados obtidos pelos ensaios, é outra sugestão para estudos que serão realizados a respeito da área. Também seria interessante, para complementar os estudos já existentes sobre a área, uma nova análise geofísica, incluindo a rodovia, para resultados mais satisfatórios. Em relação ao problema de drenagem do local, o recomendado é que seja feita uma análise do sistema de drenagem, ensaios de permeabilidade do solo da encosta e o estudo da bacia hidrográfica da área.

Como possíveis soluções para o problema, há a necessidade de um projeto de estabilidade de talude, em ambas as encostas do rio, não somente na encosta em que se encontra a rodovia. Outra sugestão é que o sistema de drenagem seja refeito, o que apenas tornaria o processo, que acontece naturalmente, mais lento. E por fim, a opção mais coerente seria um novo projeto de rodovia para este trecho que não interferisse diretamente na encosta como um viaduto, por exemplo.

9. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 3080/2011**: Standard Test Method for Direct Shear Test os Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, 2011.

_____. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33p.

ANDREIS, R.R.; BOSSI, G.E. & MONTARDO, D.K. **O Grupo Rosário do Sul (Triássico) no Rio grande do Sul**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 31, Balneário de Camboriú, 1980. Anais... Balneário de Camboriú, SBG, v. 2, p.659-673.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Anais. Rio de Janeiro, 1992.

BARATTO, J. **Variabilidade da precipitação pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Alto Jacuí- RS**. 177f. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

BASTOS, Frederico de Holanda. **Movimentos de massa no maciço de Baturité (CE) e contribuições para estratégias de planejamento ambiental**. Tese (Doutorado em geografia – Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Vol 3. Florianópolis. Ed: da UFSC, 2003.

BRABB, E.E. The worldlandslide problem. **Episodes**. Vol 14, 1991.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed.** – Rio de Janeiro : EMBRAPA SPI, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. ed. Brasília, Distrito Federal, 2012.

FARAH, F. **Habilitação e Encostas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2003.

FENDRICH, R. et al. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 3. ed. São Paulo: IBRASA. Curitiba: Ed. Universitária Champagnat, 1991. 442 p.

FERNANDES, N. F. et al. **Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 2, p. 51-71, 2001. ISSN 1.

GONZAGA DE CAMPOS, L. F. Seção geológica. In: São Paulo, Comissão Geográfica e Geológica. **Relatório...**São Paulo, 1889. P. 21-34.

GUERRA, A. J. T. Encostas e Questão Ambiental. In: GUERRA, A. J.T.; CUNHA, S. B. A. **Questão Ambiental: Diferentes abordagens.** Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

GUIMARÃES, R. F. et al. **Movimentos de Massa.** In: FLORENZANO, T. G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 6, p. 159 – 184.

HANN, R. et al. **Modern Pavement Managenet.** Malabar, Krieger Publishing Company, 1994.

IBGE. COORDENAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS E ESTUDOS AMBIENTAIS. **Manual Técnico de Geomorfologia.** 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INFANTI JR., N. FORNASARI FILHO N. Processos de dinâmica superficial. In: Oliveira, A. M. dos S.; BRITO, S.N.A. de. (org). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE-CNPq-FAPESP, 1998.

IPT. **Manual de Ocupação de Encostas.** CUNHA, M. A. (Coord.) São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

JACINTHO, E. C. et al. Solos Tropicais e o Processo Erosivo. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO. M. T. S. (Org.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro.** Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, p. 93-156, 2006.

JAEGER, J. et al. **Deformation and Failure of Rocks.** Fundamentals of Rock Mechanics. 4th Edition, Blackwell Publishing, 80. 2007.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; IAN, H. **Geofísica de Exploração.** Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos, p.438, 2009.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 2a. Ed. Campinas/SP.: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, p. 45, 1982.

LLOPIS TRILLO, G. **Control de la erosion y obras de desagüe, Manual de Estabilizacion y Revegetacion de Taludes.** Entorno Grafco S. L., Madrid, 1999.

LOKE, M. H. **Res2DINV software user's manual,** University Sains Malaysia, Penang, 1996.

MACIEL FILHO, C.L.; NUMMER, A.V. **Introdução à geologia de engenharia**. Santa Maria, RS. Editora UFSM, 2011.

MARTINI, L.C. et al. **Avaliação da Suscetibilidade a Processos Erosivos e Movimentos de Massa: Decisão Multicriterial Suportada em Sistemas de Informações Geográficas**. Geologia USP Série Científica, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 41-52. 2006.

MORIWAKI, Y.; MITCHELL, J. **The Role of Dispersion in the Slaking of Intact Clay**. In: Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects, ed. J. Sherard and R. Decker (West Conshohocken, PA. ASTM International), p. 287-302. 1977.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area**. Bulletin of International Association of Engineering.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 240p.

NUMMER, A.V. **Parâmetros geológico-geotécnicos controladores dos Movimentos de Massa na Rota do Sol/ RS 486 – Itati, RS**. PPGEC/UFRGS. Tese de Doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 2000.

PIO-FIORI, A. **Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas**. Boletim Paranaense de geomorfologia. n. 43, 1995.

PORTO, E. Z. **Estudo de estabilidade de uma encosta em Faxinal do Soturno-RS**. 153f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FAXINAL DO SOTURNO. **Plano Municipal de Saneamento Básico**, Etapa 1, Faxinal do Soturno, 2011.

RECKZIEGEL, E.W. **Identificação e mapeamento das áreas de perigo de movimento de massa no município de Porto Alegre, RS**. 90f. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012

SCHIRMER, G. J. **Mapeamento geoambiental dos municípios de Agudo, Dona Francisca, Faxinal do Soturno, Nova Palma e Pinhal Grande- RS**. 155f. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.