

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**HALINE DUGOLIN CECCATO**

**PROCESSO EROSIVO: ESTUDO DE CASO DA ESTRADA DE ACESSO A  
CASCATA DO SALSO – CAÇAPAVA DO SUL, RS**

**CAÇAPAVA DO SUL**

**2018**

**HALINE DUGOLIN CECCATO**

**PROCESSO EROSIVO: ESTUDO DE CASO DA ESTRADA DE ACESSO A  
CASCATA DO SALSO – CAÇAPAVA DO SUL, 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<sup>o</sup>.Dr<sup>o</sup>. Rafael Matias Feltrin

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Andrea Valli Nummer (UFSM)

**Caçapava do Sul**

**2018**

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) .

C387p Ceccato, Haline Dugolin  
PROCESSO EROSIVO: ESTUDO DE CASO DA ESTRADA DE ACESSO A  
CASCATA DO SALSO - CAÇAPAVA DO SUL, RS / Haline Dugolin  
Ceccato.  
104 p.  
  
Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2018.  
"Orientação: Rafael Matias Feltrin".  
  
1. Erosão em estrada de terra. 2. Geologia- Geotécnica. 3.  
Geofísica . 4. Erosão . 5. Cascata do Salso. I. Título.

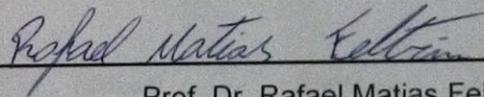
HALINE DUGOLIN CECCATO

PROCESSO EROSIVO: ESTUDO DE CASO DA ESTRADA DE ACESSO A  
CASCATA DO SALSO – CAÇAPAVA DO SUL, RS

Monografia de Conclusão de Curso  
apresentado ao programa de Graduação  
em Bacharelado em 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: 13 de dezembro de  
2018

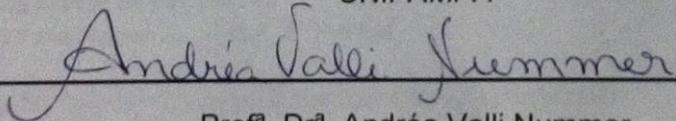
Banca examinadora:



Prof. Dr. Rafael Matias Feltrin

Orientador

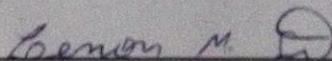
UNIPAMPA



Profª. Drª. Andréa Valli Nummer

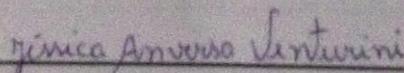
Co- Orientadora

UFSM



Prof. Ms. Lenon Melo

UNIPAMPA



Engenheira Civil Jéssica Anversa Venturini

UFSM

**Dedico este trabalho aos meus pais, Geraldo e Maria José e meus irmãos  
Heloise e Hugo, pela confiança, perseverança e credibilidade depositadas em  
mim.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela vida e por sempre ter me guiado e orientado nas decisões a serem tomadas ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, Geraldo e Maria José que são a base da minha vida. Obrigada por me estimularem a seguir meus sonhos e objetivos, mesmo sendo preciso ir morar tão longe de todos, e também, por todo o apoio, carinho e confiança, recebido nesses anos da graduação e terem dividido comigo todos os momentos nesse período, mesmo à distância. Aos meus irmãos Heloise e Hugo, por toda a força, apoio, incentivo e por muitas vezes terem me encorajado seguir adiante, por todas as lágrimas enxugadas mesmo que por telefone. Aos meus cunhados, que se tornaram pessoas importantes na minha vida; meu cunhado por sempre me incentivar nas corridas e minha cunhada, por ser essa guria de um coração enorme e sempre disposta a ajudar. Sinto muita falta de vocês, obrigada por serem os exemplos em minha vida. Cada conquista adquirida nesses anos é parte do incentivo que recebi de todos vocês ao longo deste trajeto.

Às minhas amigas que, independente da distância, sempre me ouvem e dão conselhos, Daiane, Mayara, Gabrielle, Bruna, Julia, Jessica e Pamela. E de modo especial, o Fernando, que nestes quase 15 anos de amizade é aquele que além de amigo, posso chamar de irmão.

Às amizades feitas ao longo desses anos, de modo especial a Alane, que me deu muito apoio e ombro amigo para chorar durante os anos que compartilhamos o mesmo teto. Agradeço também, a Isadora, Diogo, Fabiano, Jorge, Alisson, Amanda, Jhonatan, Camila, Louise, Daniela, Paulo, Victor, Francisco (filho), Crisleide, por de alguma forma, terem feito a diferença nesses anos morando no Sul. Em particular, as companheiras de festa e descontrações, Gabriela, Kiara, Elisa e Giovanna Rocha, que se fizeram presente mais nos últimos semestres, mas, que foram de grande importância.

Agradeço a oportunidade de ter cursado o curso mais “foda para caralho”, ter pisado em diversos campos rochosos, buscando compreender a sua formação. Além de participar de vários Simpósios e Congressos que a Geologia tem a oferecer, porém,

em particular, ao último Congresso Brasileiro de Geologia (Rio de Janeiro), por ter conhecido alguém muito especial.

À Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, pela oportunidade a mim fornecida de cursar geologia com qualidade e pelo conhecimento adquirido pelos professores que se fizeram presentes ao longo desses 10 semestres.

Agradeço ao Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Raul Oliveira Neto, por ter me dado à oportunidade de desenvolver projeto de pesquisa, me orientado e aconselhado, durante o ano que trabalhamos juntos.

Agradeço a minha orientadora de projeto de extensão, Rafaela Rios, por todas as orientações, conselhos e ajuda oferecida ao longo desses dois anos que trabalhamos juntas.

Agradeço de modo especial ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Rafael Matias Feltrin, pelas orientações, paciência e ajuda oferecida ao longo deste trabalho e nos demais projetos que trabalhamos juntos.

À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, sem o apoio de vocês este trabalho não teria saído do papel. Agradeço de modo especial a minha co-orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andréa Valli Nummer, pelas orientações, ajuda e por ter disponibilizado os laboratórios desta universidade para a realização dos meus ensaios. E também, ao Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Rinaldo José Barbosa Pinheiro, por ter disponibilizado automóvel da UFSM para a realização do campo e por toda a troca de conhecimento durante a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, agradeço de modo especial ao técnico e Prof<sup>o</sup> Ms. Lenon Mello e a Geofísica Andréia, por toda a ajuda em campo e laboratório.

Agradeço aos colegas da Geologia e Engenharia Ambiental e Sanitária, Lucas, Bianca, Pedro, Orlando e Jessica, pela enorme ajuda na coleta de amostras e realização dos ensaios. Também agradeço aos técnicos de laboratório Rômulo e Ronaldo, por terem me auxiliado na realização dos ensaios.

Agradeço de modo especial a Victoria, por ter sido meu teto neste último semestre, por ter me recebido em sua casa em Santa Maria, ter compartilhado comigo os dias de medo e felicidade.

Agradeço a todos aqueles que, embora não nomeados, me apoiaram em distintos momentos e, por suas presenças afetivas e inesquecíveis, o meu reconhecimento e carinho, muito obrigado!

Por fim, agradeço ao Estado do Rio Grande do Sul, por ter me acolhido nestes dez semestres da graduação. “Se queremos lutar pelos nossos sonhos, temos que aprender a fazer escolhas” – Jonas G. Torres

**"Um dia me disseram que as nuvens não eram de algodão  
Um dia me disseram que os ventos às vezes erram a direção..."**

**Engenheiros do Hawaii**

## RESUMO

O município de Caçapava do Sul, localizado na região centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, destaca-se por sua geodiversidade, a qual apresenta aproximadamente 46 geossítios. A Cascata do Salso foi caracterizada como um destes geossítios, com uma belíssima queda d'água de mais de 20 metros. Seu acesso se dá através de uma estrada de terra que se encontra em situação precária, e vem sofrendo um intenso processo erosivo. Os primeiros cinco quilômetros do trajeto estão em boas condições. São nos trechos finais, aproximadamente nos últimos 800 metros, que as condições são intransitáveis. O objetivo deste trabalho foi realizar um diagnóstico geológico-geotécnico da atual situação dessa estrada a fim de propor medidas para amenizar a erosão e dar subsídio para o emprego de técnicas mais apropriadas que poderão diminuir suas condições de fragilidade, além de minimizar os impactos ambientais naquele local. A metodologia aplicada neste trabalho consistiu da caracterização física para os três horizontes das amostras coletados em campo, e para os demais ensaios: desagregação, critério de erodibilidade MCT (infiltrabilidade e imersão), cone de laboratório e inderbitzen, utilizou-se apenas amostras do horizonte C, pois a estrada está situada sobre a mesma, além disso, fez-se o uso da geofísica através do caminhamento elétrico – CE. A partir dos resultados obtidos nos ensaios e também nas análises em campo, conclui-se que a estrada vem sofrendo um processo erosivo bastante intensificado, como pode ser observado pelo critério MCT, foi obtido neste ensaio uma relação  $\pi/s$  entre 191,1  $g/cm^2/min/Pa$  e 371,17  $g/cm^2/min/Pa$ , sendo que é considerado um solo erodível quando está apresenta um valor superior a 52. Além disso, a estrada vem sendo sustentada por veios de pegmatito, porém, com sinais de intemperismo, não apresentando uma grande estabilidade. Portanto, pode se concluir que o processo erosivo na estrada da Cascata do Salso foi intensificado devido à intervenção antrópica que alterou o perfil original deste acesso; além disso, a falta de canaleta de drenagem acelera esse processo. Por fim, sugere-se como medida de atenuar esse intenso processo erosivo, obra de retaludamento, para ajudar na estabilização do talude e, posteriormente a implantação de estrutura de Paliçada com geotêxtil, que ajuda amenizar a velocidade de escoamento da água e retêm parte dos sedimentos por ela transportados, permitindo a estabilização do solo local.

Palavras-Chave: erosão, estrada, geológico-geotécnico.

## ABSTRACT

Brazil has great potential for the development of different types of tourism. The municipality of Caçapava do Sul, located in the central-southern region of the State of Rio Grande do Sul, stands out for its geodiversity, which presents approximately 46 geosites. The Cascata do Salso was characterized as one of these geosites, with a beautiful waterfall of more than 20 meters. Its access is through a dirt road that is in a precarious situation, and has undergone an intense erosive process. The first five kilometers of the route are in good condition. It is in the final stretches, approximately in the last 800 meters, that the conditions are impassable. The objective of this work was to perform a geological-geotechnical diagnosis of the present situation of the road in order to propose measures to reduce erosion and to provide subsidies for the use of more appropriate techniques that could reduce its fragile conditions, as well as to minimize the environmental impacts. The methodology applied in this work consisted of the physical characterization for the three horizons of the samples collected in the field, and for the other tests: disintegration, MCT erodibility criterion (infiltrability and immersion), laboratory cone and indertbitzen, C, because the road is situated on the same, in addition, the geophysics was made through the electric path - CE. From the results obtained in the tests and also in the field analysis, it can be concluded that the road has undergone a highly intensified erosive process, as can be observed by the MCT criterion, a  $\pi / s$  ratio between 191.1 g / cm<sup>2</sup> / min / Pa and 371,17 g / cm<sup>2</sup> / min / Pa, being considered as erodible soil when it has a value higher than 52. In addition, the road has been supported by pegmatite veins, but with signs of weathering, not presenting great stability. Therefore, it can be concluded that the erosion process on the road of the Cascata do Salso was intensified due to the anthropic intervention that altered the original profile of this access; in addition, the lack of drainage channel speeds up this process. Finally, it is suggested as a measure to mitigate this intense erosive process, a work of shifting, to help stabilize the slope and, later, the implementation of a structure of Paliçada with geotextile, which helps to slow the flow of water and retain part of the sediments carried by it, allowing the stabilization of the local soil.

Keywords: erosion, road, geological-geotechnical.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                  | <b>10</b> |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                                    | <b>12</b> |
| <b>2.1 Objetivos gerais .....</b>                          | <b>12</b> |
| <b>2.2 Objetivos específicos .....</b>                     | <b>12</b> |
| <b>2.3 Justificativa .....</b>                             | <b>12</b> |
| <b>3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>    | <b>14</b> |
| <b>3.1 Erosão: conceitos e classificação .....</b>         | <b>14</b> |
| <b>3.2 Classificação dos processos erosivos .....</b>      | <b>18</b> |
| <b>3.2.1 Erosão superficial ou laminar.....</b>            | <b>19</b> |
| <b>3.2.2 Erosão em sulcos ou ravinas .....</b>             | <b>19</b> |
| <b>3.2.3 Voçorocas.....</b>                                | <b>21</b> |
| <b>3.3 Mecanismos dos processos erosivos .....</b>         | <b>22</b> |
| <b>3.4 Fatores que interveem no processo erosivo .....</b> | <b>24</b> |
| <b>3.5 Erosão em estrada de terra .....</b>                | <b>25</b> |
| <b>3.6 Erodibilidade dos solos .....</b>                   | <b>28</b> |
| <b>3.7 Métodos de avaliação da erodibilidade .....</b>     | <b>29</b> |
| <b>4 ÁREA DE ESTUDO .....</b>                              | <b>38</b> |
| <b>4.1 Geologia regional .....</b>                         | <b>41</b> |
| <b>4.2 Geologia local.....</b>                             | <b>43</b> |
| <b>4.3 Pedologia.....</b>                                  | <b>45</b> |
| <b>4.4 Clima .....</b>                                     | <b>46</b> |
| <b>5 METODOLOGIA .....</b>                                 | <b>48</b> |
| <b>5.1 Etapa de gabinete.....</b>                          | <b>48</b> |
| <b>5.2 Etapa de campo .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>5.3 Etapa de laboratório.....</b>                       | <b>51</b> |
| <b>5.3.1 Ensaio de caracterização física.....</b>          | <b>51</b> |

|  |    |
|--|----|
| 5.3.2 Ensaio de desagregação.....                    | 54 |
| 5.3.3 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT..... | 55 |
| 5.3.4 Ensaio de cone de laboratório.....             | 58 |
| 5.3.5 Ensaio de Inderbitzen .....                    | 60 |
| 5.4 Análises geofísicas .....                        | 66 |
| 5.4.1 Caminhamento elétrico – CE .....               | 66 |
| 6 RESULTADOS.....                                    | 67 |
| 6.1 Caracterização da estrada de terra .....         | 67 |
| 6.2 Análise geotécnica .....                         | 71 |
| 6.2.1 Caracterização física .....                    | 71 |
| 6.2.2 Ensaio de desagregação.....                    | 77 |
| 6.2.3 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT..... | 80 |
| 6.2.4 Ensaio de cone de laboratório.....             | 83 |
| 6.2.5 Ensaio de Inderbitzen .....                    | 84 |
| 6.3 Estudo geofísico eletrorresistividade .....      | 90 |
| 7 CONCLUSÃO .....                                    | 93 |
| 8 SUGESTÕES .....                                    | 95 |
| 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                   | 96 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Erosão, transporte e deposição do solo em relação ao tamanho das partículas. ....   | 17 |
| Figura 2 – Erosão por salpicamento ou splash.....  | 20 |
| Figura 3 – Evolução do processo erosivo (a) sulcos; (b) ravinas e (c) voçorocas, Loteamento Algarve em Porto Alegre-RS .....   | 22 |
| Figura 4 – Esquema de Caminhamento Elétrico para o arranjo Dipolo-Dipolo .....   | 37 |
| Figura 5 – Vista Geral da Cascata do Salso.....  | 38 |
| Figura 6 - Mapa de Localização da Área de Estudo.....  | 39 |
| Figura 7- Vista da precariedade da estrada que dá acesso a Cascata do Salso.....   | 40 |
| Figura 8 – Vista Geral da Barragem do Salso .....  | 40 |
| Figura 9 - Mapa esquemático do Município de Caçapava do Sul, ilustrando seus principais contextos geológicos e a localização dos 46 geossítios inventariados, sendo a área de estudo, a Cascata do Salso demarcada no número 27..... | 42 |
| Figura 10 - Mapa Geológico do Município de Caçapava do Sul – RS .....  | 43 |
| Figura 11 - Mapa Geológico da região de Caçapava do Sul – Fácies do Complexo Granítico Caçapava do Sul, com as estruturas que tendem a NW e que controlam a subdivisão do corpo intrusivo. ....                                      | 44 |
| Figura 12 - Mapa Pedológico do Município de Caçapava do Sul – RS.....  | 46 |
| Figura 13 - Realização da coleta de amostras indeformadas envolvidas pelo anel de PVC. ....  | 49 |
| Figura 14 - (a) Amostra sendo parafinada para manter a sua umidade natural do dia do campo; (b) Amostra protegida por camada de parafina.....  | 50 |
| Figura 15- Ensaio do Limite de Liquidez, com o equipamento Casagrande. ....  | 51 |
| Figura 16 - Ensaio do Limite de Plasticidade .....   | 52 |
| Figura 17 – Execução do ensaio da análise granulométrica.....  | 53 |
| Figura 18- Conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria .....  | 53 |
| Figura 19 - Lupa de mesa utilizada para a análise mineralógica .....   | 54 |
| Figura 20 - Esquema representando as etapas de desagregação .....  | 55 |
| Figura 21 – Esquema do Ensaio de Perda por Imersão .....   | 56 |
| Figura 22 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de infiltrabilidade. ....  | 57 |
| Figura 23 – Ilustração do equipamento do ensaio de penetração de cone proposto por Alcântara (1997) e equipamento utilizado no ensaio.....   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24 – Execução do Ensaio de Inderbitzen .....   | 61 |
| Figura 25 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra versus tempo.....   | 62 |
| Figura 26- Representação da metodologia utilizada para descobrir a velocidade de escoamento para uma declividade de 12°.....  | 64 |
| Figura 27 – Ajuste da reta e na qual são estimadas a taxa de erodibilidade (k) e tensão de cisalhante hidráulica crítica (thcri).....   | 66 |
| Figura 28 – Perfil de solo dentro da voçoroca .....   | 67 |
| Figura 29- Mapa de Fluxo. ....  | 68 |
| Figura 30 – Perfil Topográfico ao longo da estrada.....   | 69 |
| Figura 31 – Incisões de sulcos ou ravinas no trecho inicial da estrada na topografia 320 metros.....  | 69 |
| Figura 32 – Feições erosivas encontradas no interior da voçoroca.....   | 70 |
| Figura 33 - Gráfico de Curva Granulométrica dos materiais da estrada. ....  | 72 |
| Figura 34 – Mascroscopia dos minerais de quartzo. (a) quartzo com presença de óxido de ferro; (b) quartzo incolor a branco.....   | 76 |
| Figura 35 - Mascroscopia dos minerais de mica. (a) mica; (b) quartzo com mica.....  | 77 |
| Figura 36 - Comportamento da amostra em condição natural quando submetidas à inundação .....  | 79 |
| Figura 37 - Comportamento da amostra em condição seca ao ar quando submetidas à inundação .....   | 80 |
| Figura 38 - Volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) para as amostras do horizonte C. ....   | 82 |
| Figura 39 - Velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte C.....  | 82 |
| Figura 40- Representação Gráfica do ensaio de penetração .....  | 84 |
| Figura 41 – Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras do horizonte C em diferentes condições de umidade para vazão de 3l/min.....  | 85 |
| Figura 42 - Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras do horizonte C em diferentes condições de umidade para vazão de 6 l/min.....   | 85 |
| Figura 43 – Resultado das amostras sob umidade seca ao ar após o ensaio de Inderbitzen, (a) ensaio realizado para uma vazão de 6 l/min e (b) ensaio realizado para uma vazão de 3l/min, em preto tem-se uma estrutura que foi preservada no momento da coleta da amostra..... | 87 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 44- Resultado do ensaio Inderbitzen para a amostra na condição de umidade natural.....        | 88 |
| Figura 45- Resultado do ensaio Inderbitzen para a amostra na condição de umidade seca ao ar. ....    | 88 |
| Figura 46- Resultado do ensaio Inderbitzen para a amostra na condição de umidade pré-umedecida. .... | 89 |
| Figura 47- Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen.                   | 89 |
| Figura 48 – Perfil do Caminhamento Elétrico 1 - CE1 .....  | 91 |
| Figura 49 – Perfil do Caminhamento Elétrico 2 - CE2 .....  | 91 |
| Figura 50 – Perfil do Caminhamento Elétrico 3 - CE3 .....  | 92 |
| Figura 51 - Perfil do Caminhamento Elétrico 4 - CE4.....   | 92 |
| Figura 52– Perfil do Caminhamento Elétrico 5 – CE5 .....   | 92 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Suscetibilidade à erosão pela textura dos solos .....  | 29 |
| Tabela 2 – Resistividade de algumas rochas e solos .....  | 36 |
| Tabela 3 - Número de amostras indeformadas coletadas e ensaios .....  | 50 |
| Tabela 4 - Valores de velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para a relação de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ ) .....   | 63 |
| Tabela 5 – Frações Granulométricas .....  | 71 |
| Tabela 6 - Índices Físicos .....  | 72 |
| Tabela 7 - Análise Mineralógica presente nos horizontes de solo .....   | 73 |
| Tabela 8 - Descrição do comportamento das amostras durante o ensaio de desagregação para o Horizonte C.....   | 78 |
| Tabela 9- Valores do coeficiente de sorção ( $s$ ) e perda por imersão ( $p_i$ ) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte C – critério de erodibilidade da metodologia MCT.....   | 81 |
| Tabela 10 - Resultados obtidos com o ensaio de Cone de Laboratório.....   | 83 |
| Tabela 11 - Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo (10-3 g/cm <sup>2</sup> /min), para diferentes condições de fluxo ( $Q$ = vazão e $i$ = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros $\tau_{hcrit}$ (Pa) e $K$ (10-2 g/cm <sup>2</sup> /min/Pa)..... | 86 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CE – Caminhamento Elétrico

USLE - Equação Universal de Perda de Solo

MCT – Miniatura Compactada Tropical

MDEP - Maine Department of Environmental Protection

## 1 INTRODUÇÃO

O termo erosão provém do latim “erode” cujo significado é corroer (BASTOS, 1999). De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2006), a erosão constitui um processo natural que não pode ser evitado, sendo considerado um agente geológico que provoca modificação das paisagens terrestres, lento e medido através do tempo geológico. Porém, a interferência humana altera este processo natural, comumente através de atividades de desmatamento, seguido de cultivo de terras, implantação de obras civis e diversas outras alterações no meio físico, sobretudo quando realizadas de forma inadequada, acelerando a ação da erosão e aumentando sua intensidade. Desta forma, a ação antrópica pode intensificar a erosão causada pelos processos hídricos, sendo assim denominada como erosão acelerada (BASTOS, 1999).

Um dos principais problemas relacionados a estradas de terras é, em consequência do processo erosivo, provocada pela água da chuva que cai no leito nas regiões marginais dessas estradas não pavimentadas (GRIEBELER et al., 2009). As estradas não pavimentadas são consideradas uma das principais fontes de produção de sedimentos, devido a sua influência direta nos processos hidrológicos, ou seja, resultado da interceptação direta das gotas de chuva no leito da estrada, baixa taxa de infiltração da água em solos e, em contrapartida, maior volume de escoamento superficial, além de concentração do volume escoado em áreas adjacentes ao canal de drenagem da estrada (FORSYTH et al., 2006 apud ENRIQUEZ, 2015).

De acordo com o *Maine Department of Environmental Protection* – MDEP (2010), cerca de 80% dos problemas relacionados às estradas não pavimentadas estão associadas as questões de má drenagem. Segundo Pruski (2009 apud ENRIQUEZ, 2015), o agente causador principal da erosão em estradas não pavimentadas é o escoamento superficial.

A erodibilidade do solo é um dos principais fatores condicionantes da erosão, estando intimamente relacionada com suas propriedades geotécnicas. A erodibilidade é o fator que justifica o motivo de alguns solos erodirem mais facilmente que outros, mesmo quando submetidos à ação dos mesmos agentes erosivos. Bastos (1999) descreve que a erodibilidade é uma propriedade do solo que

evidencia a maior ou menor facilidade com que as partículas do solo são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo, sendo a propriedade de maior complexidade de determinação, por estar condicionada a um grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. Assim, é de extrema importância conhecer as características naturais do espaço físico antes da realização de qualquer atividade humana, além de possibilitar o direcionamento adequado do tipo de manejo do solo, permitindo identificar possíveis problemas acarretados pelo efeito das ações antrópicas sobre essas regiões, tendo relação direta com a conservação e a exploração sustentável dos recursos naturais. O planejamento adequado da terra deve ser realizado constantemente para que a degradação não ocorra ou, ao menos, seja amenizada ao longo dessas áreas, principalmente nas de preservação permanente.

O município de Caçapava do Sul, localizado na região centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, destaca-se por sua geodiversidade. Segundo o inventário do patrimônio geológico de Caçapava do Sul, dentro dos limites do município foram identificados 46 geossítios (BORBA, et al. 2013). A Cascata do Salso foi caracterizada como um dos geossítios e apresenta uma belíssima queda d'água de mais de 20 metros de altura. O local abriga a antiga Barragem do Salso, que no passado forneceu energia elétrica para o município de Caçapava do Sul, está situada em área de preservação permanente e se localiza a aproximadamente oito quilômetros da sede do município, mas com acessibilidade precária, pois a estrada vem sofrendo um intenso processo erosivo.

A falta de manutenção das estradas não pavimentadas, ou até abandono por um período de tempo, traz consigo um leito estradal muitas vezes intrafegável, além de provocar sérios problemas ambientais, como o assoreamento de corpos d'água e o lançamento sobre áreas agricultáveis de sedimentos provenientes de material carregado pelas águas das chuvas (SANTOS et al., 1988). Dentro deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo estudar processos erosivos presentes em uma das estradas de terra de acesso ao geossítio da Cascata do Salso, e propor medidas para atenuar a erodibilidade, que traz riscos ambientais e sociais. Espera-se que os resultados obtidos desta pesquisa possam auxiliar a secretária de turismo e planejamento do município quanto a recuperação e manutenção da estrada de

terra, dando subsídios para o emprego de técnicas apropriadas que poderão melhorar suas condições, além de minimizar os impactos ambientais naquele local.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

O objetivo principal deste estudo foi avaliar os processos erosivos em uma estrada de terra de acesso à Cascata do Salso, um dos principais pontos turísticos do município de Caçapava do Sul, RS.

### **2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, procurou-se:

- Investigar e descrever as características físicas do terreno, como o tipo de material presente (solos e rochas) e suas resistências ao processo erosivo;
- Caracterizar fisicamente através de ensaios de caracterização física e de erodibilidade de amostras de solo;
- Determinar quais são os principais fatores que atuam em favor da evolução do processo erosivo; e,
- Explicar o fenômeno erosivo que ocorre no local e propor uma forma de minimizá-lo.

### **2.3 Justificativa**

O Brasil apresenta um grande potencial para o desenvolvimento de diferentes tipologias de turismo. Um maior contato com a natureza surge como alternativa para a revitalização da economia local e como forma de conservar e utilizar os recursos naturais de forma sustentável, na busca pela melhoria da qualidade de vida das comunidades receptoras. Quando o turismo é desenvolvido de acordo com os

princípios da sustentabilidade, ele atua como um importante objeto na proteção do meio ambiente.

Para Barreto (1998), o fenômeno turístico possui aspecto social tão importante quanto o desenvolvimento econômico, possibilitando a expansão do ser humano, seja pelo divertimento, ou pela possibilidade de conhecer novas culturas e lugares. Desde a década de 1980, o termo “ecoturismo” passou a designar atividades turísticas fortemente ligadas à natureza, em que o visitante também procura um contato mais direto em relação a comunidade receptora (FACO, 2010).

Dentro deste contexto, o município de Caçapava do Sul, localizado na região centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul, destaca-se por sua geodiversidade, tendo sido reconhecida oficialmente, pela Assembleia Legislativa do Rio Grande do Sul, como a “capital gaúcha da geodiversidade”, através de Lei Ordinária Estadual nº 14.708, sancionada pelo governo do estado em 15 de julho de 2015 (RIO GRANDE DO SUL, 2015). Desta forma, o Município passa a ser visto com maior curiosidade, sendo necessário investir maiores esforços na conservação de seus geossítios.

Devido a falta de técnicas adequadas de manutenção e conservação, a estrada que dá acesso à Cascata apresenta condições de degradação por erosão. Desta forma, a precariedade desta estrada pode tornar a Cascata pouco competitiva em relação aos demais geossítios presentes no município, prejudicando o turismo local. A manutenção das estradas de terra que dão acesso aos geossítios pode ser definida como a junção de elementos que visem à segurança no transporte, economia de capital e proporcione certo conforto aos seus usuários. Sendo assim, este trabalho teve como finalidade a realização de um estudo geológico-geotécnico nesta área, bem como propor medidas de atenuar o intenso processo erosivo na estrada que dá acesso à Cascata do Salso.

### **3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos referentes à erosão: conceitos e classificações; classificação dos processos erosivos; mecanismos dos processos erosivos; fatores intervenientes de processos erosivos; erodibilidade do solo; erosão em estradas de terra; e métodos de avaliação da erodibilidade.

#### **3.1 Erosão: conceitos e classificação**

A formação do solo, assim como do relevo em geral, está relacionada com a interação de diversos processos geomorfológicos e geológicos que retratam uma variação do espaço e tempo que ocorre dentro de um sistema inteiramente dinâmico. Segundo Guerra e Vitte (2004, p. 227), “os solos e as paisagens são considerados como sistemas abertos, na medida em que ganham e perdem matéria e energia, além das suas fronteiras”. Pode-se dizer que a erosão dos solos é um dos processos superficiais de grande importância para o equilíbrio de um sistema.

Erosão, termo que provém do latim “erode” cujo significado é corroer, tem variadas definições encontradas na literatura. Conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT, 1986), a erosão é o resultado do processo de desagregação e remoção de partículas do solo ou das rochas pela interação da gravidade (g) com a água, gelo, vento e organismos.

Bastos (1999) considera erosão como um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são desagregados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, tais como as geleiras, os rios, os mares, o vento ou a chuva.

A erosão dos solos pode ser causada por fatores naturais (erosão natural) ou por ação antrópica (erosão acelerada), como destaca Infanti Junior e Fornasari Filho, (1998). Segundo Cunha (1997) os primeiros são caracterizados pelo desenvolvimento da paisagem, sendo responsável pela remoção do material de superfície através do vento, gelo ou água. Bertoni e Lombardi Neto (1985) consideram benéfico este tipo de processo, pois, através dele formaram-se inúmeras colinas suaves, planícies extensas e vales férteis. No entanto, a erosão acelerada, ocorre em intensidade superior à erosão natural e numa escala de tempo

relativamente curta, sendo assim, incapaz por si só de alcançar a nova compensação de forças. De acordo com Facio (1991) e Camapum de Carvalho et al. (2006), o que causa o desequilíbrio são as mudanças climáticas e as intervenções antrópicas, como o mau uso do solo na agricultura e obras de engenharia, que interferem diretamente no meio físico provocando processos erosivos diretos e, em sua maioria, previsíveis.

Segundo Carolino de Sá (2004), erosão resume no transporte de partículas do solo por agentes naturais, portanto, trata-se de um processo de desgaste da superfície terrestre, devido à ação de agentes naturais (água, vento, gelo) e de organismos vivos (animais e plantas).

Segundo o Manual de Geotecnia do Departamento de Estradas e Rodagem (DER, 1991), a erosão é “um processo que ocasiona a destruição da estrutura do solo e sua remoção, sobretudo pela ação das águas de escoamento superficial, depositando-o em áreas mais baixas do relevo”. Além disso, os “processos de erosão apresentam normalmente uma peculiaridade que é a baixa velocidade, porém contínua e progressiva ao longo do tempo. Desta forma, a erosão dos solos é o resultado de um processo físico, químico e biológico natural, mas que, se ocorrer de forma acentuada é considerado como um problema”.

Desta forma, podemos dizer que a erosão natural é aquela que ocorre sobre condições naturais dentro de um quadro extremamente dinâmico. Quando esse equilíbrio é rompido e a taxa de erosão excede valores esperados para um determinado ambiente, designamos de erosão acelerada. Além disso, numa erosão natural as perdas de solo são geralmente muito menores quando comparadas com a erosão acelerada.

As principais causas dos processos de erosão acelerada estão no desmatamento e posterior uso do solo para atividades agrícolas e pastoris (GUERRA e VITTE, 2004). Além disso, a construção civil, o crescimento das cidades, a mineração e outras atividades cunho econômico, também contribuem de forma direta para o surgimento de agravantes de situações de erosão acelerada e quase sempre irreversíveis.

Em relação ao agente erosivo, segundo Camapum de Carvalho et al. (2006), é possível classificar as erosões em: eólica, causada pelo vento; glacial, causada pelo gelo; organogênica, causada pelos seres vivos; e hídrica, causada pela água.

Assim, no desenvolver deste trabalho, será enfatizada a erosão de caráter hídrico, buscando sua compreensão, identificação e classificação, bem como as ações antrópicas que tendem a acelerar este processo.

A água é considerada o principal fator no processo erosivo, sendo responsável por sua gênese e evolução. Infanti Junior e Fornasari Filho (1998) descrevem que o processo erosivo é provocado pela chuva através do impacto das gotas, que ao caírem sobre a superfície do solo provocam a desagregação das partículas, e o escoamento superficial é responsável pela remoção e transporte.

Com relação ao processo erosivo, ele se diferencia na paisagem de diversas formas, sendo elas: laminar, sulcos, ravinas e voçorocas. Estas formas estão relacionadas com o clima, geologia, geomorfologia, solo, cobertura vegetal, hidrografia e uso/ocupação da terra. As lâminas, ravinas, sulcos e voçorocas são formas visíveis nas paisagens. Porém, têm-se ainda as formas que ocorrem no interior do solo ou rocha, gerando esqueletização<sup>1</sup> do maciço. Essas formas contribuem para o desenvolvimento das erosões exteriorizadas, e interferem para o desencadeamento de novos processos como os movimentos de massa (CASAGRANDE, 2004). Referente à importância da erosão hídrica:

Atua como desprendimento das partículas dos solos devido ao impacto da gota da chuva. A partir daí o escoamento superficial, atua transportando fragmentos de solo e partículas de rochas. Esse processo dá origem a erosão laminar. Quando as chuvas são mais intensas e são favorecidas por parâmetros naturais, como a declividade e a forma côncava da vertente, ou intervenções antrópicas a erosão pode se desenvolver por escoamento concentrado ou linear, formando sulcos na superfície do terreno; estes sulcos podem evoluir para ravinas até atingir a configuração de voçorocas. (CASAGRANDE, 2004, p.8).

Desta forma, a erosão hídrica se inicia com a desagregação do solo devido ao impacto das gotas de chuva, posteriormente, tem-se o transporte dessas partículas pela água que não infiltrou e escoou superficialmente. Esse sedimento irá depositar em áreas de menor declive, resultando em depósito (PITTELKOW, 2013).

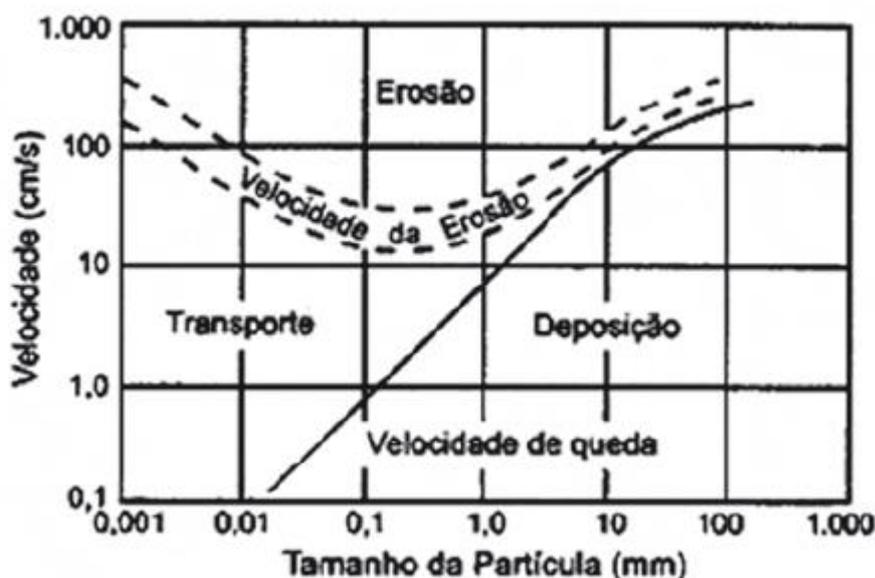
---

<sup>1</sup> Processo de degradação física do solo que aumenta a sua porosidade, e surge em consequência do transporte de partículas ou de compostos ou de elementos químicos solubilizados. O aumento da porosidade do solo gera instabilidade dos taludes de erosão, sendo parte essencial na evolução das ravinas e voçorocas. Pode também ser processo desencadeador de erosões em áreas de instabilidade de encostas e/ou submetidas à uso inadequado (Camapum de Oliveira et al, 2006, p.55).

Portanto, a erosão hídrica, ocorre quando o solo superficial fica saturado, devido a processos como: volume, duração, velocidade, frequência, intensidade da energia cinética da água das precipitações. Além disso, leva-se em consideração o tipo de solo e suas propriedades físicas e químicas, vegetação, geologia, declividade das encostas e intensidade da interferência da ação antrópica. A erosão, então, se resume à soma de um conjunto de fatores que vão resultar na erodibilidade do solo (PITTELKOW, 2013).

Partículas de solos desprendidas, principalmente as de argilas, quando não carregadas pelo fluxo superficial, atuam selando a superfície do terreno e dificulta a infiltração, resultando no aumento do escoamento superficial e age diretamente no processo erosivo (CAMAPUM et al., 2006). A erosão e a deposição em função da velocidade de escoamento e tamanho de partículas podem ser representadas através de um gráfico, mostrando desta forma a existência de um ponto crítico combinando menor velocidade com tamanho de partículas (Figura 1).

Figura 1 – Erosão, transporte e deposição do solo em relação ao tamanho das partículas.



Fonte: Hjulstrom, 1935 apud Camapum et al., 2006.

O gráfico de erosão reflete o equilíbrio ótimo entre tamanho de partícula e coesão. Camapum et al. (2006), abordam o mecanismo de erosão do solo como consequência da precipitação da chuva nas seguintes fases:

1. Precipitação – gera, na fase inicial, o desprendimento de partículas e infiltração da água no solo;
2. Infiltração – depende do grau de saturação inicial;
3. Desprendimento por impacto das gotas de chuva – inicialmente aumenta com a precipitação, e diminui com a formação da lâmina d'água do escoamento superficial;
4. Desprendimento devido ao fluxo superficial – aumenta inicialmente, posteriormente diminui com a redução da capacidade de transporte de sedimento; e,
5. Término do desprendimento – ocorre quando o solo apresenta resistência quanto a sua remoção, e o fluido satura a sua capacidade de transportar o sedimento.

Cessada a chuva, tem-se a redução da velocidade de escoamento, conseqüentemente até interromper a deposição do sedimento. A capacidade de transporte e a velocidade de deposição dependem do tamanho e densidade das partículas.

### **3.2 Classificação dos processos erosivos**

A erosão é classificada em quatro grandes grupos, sendo eles: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica. O presente trabalho tratará da erosão hídrica, que geralmente é classificada em três tipos principais: erosão superficial ou laminar; erosão interna e erosão linear (sulco, ravina, voçoroca), com relação ao seu estágio de evolução. Esses processos naturais são muitas vezes acelerados, devido ao tipo de uso e ocupação dos solos e vertentes, ocasionando diversas alterações nas propriedades dos solos e paisagísticas.

Nos processos erosivos provocados pela ação das chuvas desenvolvem-se primeiramente a erosão dita superficial ou laminar, evoluindo para a formação de sulcos, que por sua vez transformam-se em ravinas para no fim atingir um estado impactante, as voçorocas, estas, no geral, atingem o lençol freático (PITTELKOW, 2013).

### **3.2.1 Erosão superficial ou laminar**

Conforme IPT (1991), a erosão laminar é originada pelo escoamento difuso das águas das chuvas, resultando na remoção progressiva e uniforme dos horizontes superficiais do solo.

Esse tipo de erosão depende de fatores externos (cobertura do solo, declividade do terreno e clima) e fatores internos (tipo de solo, estrutura e umidade), que no geral são aspetos naturais, porém, a ação antrópica modifica o estado do solo, intensificando o processo erosivo (CAMAPUM et al. 2006).

Segundo Magalhães (2001), a erosão superficial ou laminar é caracterizada pelo desgaste e arraste uniforme em toda a extensão da área sujeita ao processo erosivo. É considerada como um dos tipos mais perigosos de erosões e está relacionada à distribuição do destacamento das partículas do solo, que acontece de maneira suave e uniforme por toda a sua extensão.

Cassetti (2005) considera o fluxo laminar como um processo lento e insidioso, pois ocorre de forma quase imperceptível a curto e médio prazo, mas ocasiona grandes perdas de solo. Por não gerar cicatrizes no terreno, acaba não tendo tanta atenção em relação aos processos lineares e, conseqüentemente ações de recuperação acabam sendo executadas tardiamente.

Segundo Camapum de Carvalho et al. (2006, p.46), “o poder erosivo da água em movimento e sua capacidade de transporte dependem da densidade e da velocidade de escoamento, bem como da espessura de lâmina d’água e, principalmente, da inclinação da vertente do relevo”. Desta forma, a formação de filetes no fluxo superficial interfere no potencial de desprendimento e arraste das partículas de solo, por consequência, dando origem aos sulcos que evoluem para ravinas e, dependendo da condição, podendo chegar à voçoroca.

### **3.2.2 Erosão em sulcos ou ravinas**

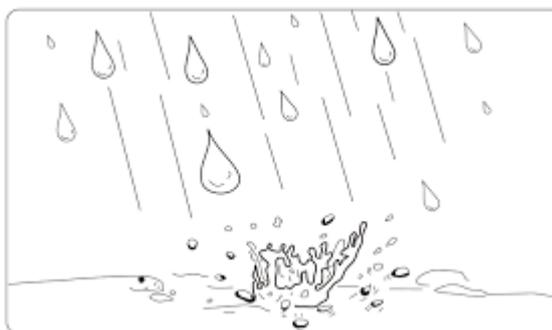
Segundo Camapum de Carvalho et al (2006) e Bigarella (2003), esse tipo de erosão é a primeira fase de desenvolvimento de uma erosão dita linear e desenvolve-se muito rapidamente durante as chuvas intensas devido ao escoamento superficial que se torna concentrado.

Para Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Bigarella (2003), a erosão em sulcos resulta das pequenas irregularidades na declividade do terreno, fazendo com que a enxurrada se concentre em alguns pontos do terreno, geralmente nos mais baixos, e atinja velocidade e volume suficientes para formar marcas nos solos mais ou menos profundas.

Os mecanismos de destacamento e transporte das partículas de solo ocorrem de formas diferentes nas regiões dos sulcos e nas intersulcos. Nos sulcos, o desprendimento e transporte das partículas ocorrem em função do fluxo superficial. Porém, na região intersulcos, o processo é desencadeado pelo fenômeno *splash* ou salpicamento, ou seja, quando a queda d'água provoca o destacamento das partículas dos solos (TOMASI, 2015).

A energia acumulada em uma gota de chuva que cai sobre a superfície de um solo desprotegido pela vegetação é muito elevada. O impacto da gota da chuva ao chocar com o solo causa o seu desprendimento e forma uma cratera no ponto onde a gota tocou o solo. Esse efeito da gota da chuva chocando sobre o solo recebe o nome de efeito *splash* ou salpicamento (FERNANDES, 2015) (Figura 2).

Figura 2 – Erosão por salpicamento ou splash



Fonte: IPT, 1991.

Segundo Heede (1970, apud OLIVEIRA, 1990), as ravinas são as incisões que atingem até 50 centímetros de profundidade e largura. Para Bigarella (2003), a terminologia utilizada é em função da profundidade, sendo: ranhura (até 5 cm); sulco (5 a 30 cm); vala (30 a 100 cm); e ravina (maior que 100 cm). Além disto, este autor afirma que os sulcos, com o aumento do seu tamanho, evoluem para valas de erosão, conhecidas como “gully” e, posteriormente, em ravinas de maiores dimensões.

Imenson & Kwaad (1980 apud BIGARELLA, 2003) estabelecem o valor de 50 cm como profundidade mínima de uma ravina. De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2006), sulcos são os canais de até 10 cm de profundidade, formados pela concentração do escoamento superficial; e as ravinas são canais com profundidade entre 10 e 50 cm, em que começa a ocorrer a instabilidade dos taludes, sendo que o aumento de concentração de água em determinados sulcos interfere para que eles evoluam para voçorocas.

### 3.2.3 Voçorocas

Segundo Bastos (1999), o termo voçoroca é originado do termo Tupi-guarani "*mboso'roka*", que designa romper ou rasgar, sendo considerada uma ravina de grandes dimensões provocada pela ação antrópica devido a grande concentração do fluxo superficial, combinada com a ação do fluxo subsuperficial e subterrâneo.

Galeti (1986) aborda voçorocas como sendo sulcos profundos em resposta do efeito da água no solo, tanto em decorrência de águas superficiais quanto de águas profundas, que se infiltram no solo até que atinjam uma camada menos permeável ou impermeável onde se acumulam e deslocam horizontalmente, gerando o arraste de partículas, deslizamento e desmoronamento.

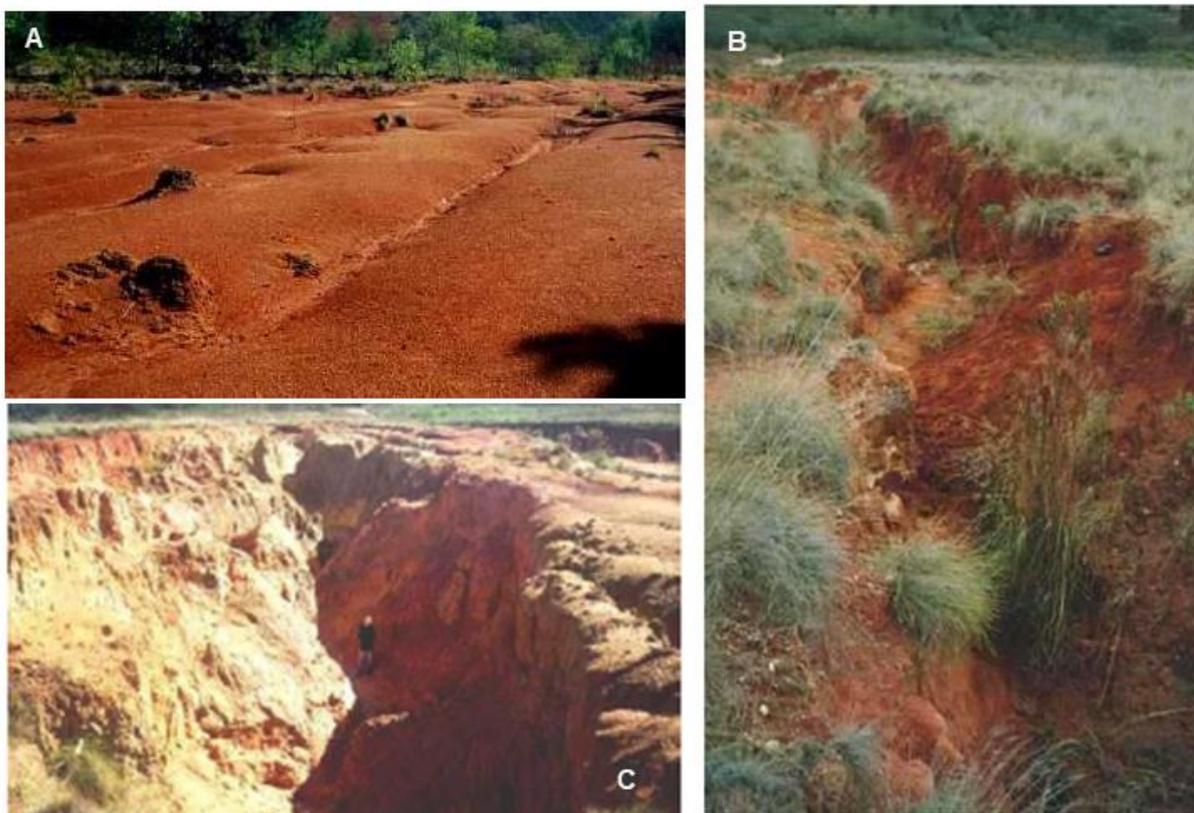
A voçoroca é palco de diversos fenômenos: erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que se conjugam e conferem a este tipo de erosão rápida evolução e elevado poder destrutivo (BASTOS, 1999).

Conforme Camapum et al. (2006), na voçoroca atuam, separado ou conjuntamente, vários processos erosivos, sendo palco de erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos, escorregamentos e taludes e quedas de blocos. Segundo este mesmo autor, esses processos se conjugam tornando o estágio da erosão ainda mais complexo, com elevado poder destrutivo, rápida evolução e que se desenvolvem na maioria das vezes remontando de jusante para montante.

Para Guerra (2003), voçoroca é uma incisão com largura maior que 30 cm e profundidade maior que 60 cm. E, segundo o glossário de Ciências dos Solos dos Estados Unidos de 1987, as voçorocas são classificadas como as feições erosivas que resultam mais de 50 cm de largura e profundidade.

Desta forma, pode-se concluir que a evolução do processo erosivo se dá a partir de sulcos, ravinas e voçorocas, como está representado na Figura 3.

Figura 3 – Evolução do processo erosivo (a) sulcos; (b) ravinas e (c) voçorocas, Loteamento Algarve em Porto Alegre-RS



Fonte: Bastos, 1999.

### 3.3 Mecanismos dos processos erosivos

Para que a erosão se desenvolva em uma determinada superfície, é necessária a atuação de diversos fatores conjuntamente e em diferentes escalas (espaciais e temporais). Bertoni (1999) e Guerra (2007) denominam esses conjuntos de fatores de “mecanismos de erosão”.

O processo erosivo se divide em três momentos: desagregação do solo, transporte e deposição do material. A desagregação do solo ou da rocha é a primeira etapa do processo erosivo. De acordo com Galetti (1973), ocorre devido ao choque, impacto independente da intensidade e agente, desde que seja capaz de

desprender alguma quantidade de material. Geralmente, o impacto ocorre devido ação da gota da água (chuva), que se choca com a superfície aonde cai e projeta partículas de solo para fora da zona de impacto, fornecendo o material que passa a erodir a superfície.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), a natureza do solo (estrutura, textura, entre outras) e a cobertura (quantidade e tipo) influenciam na intensidade da desagregação. Além disso, o fator antrópico interfere diretamente na desagregação das partículas de solo.

Galeti (1973), afirma que as partículas menores, como argilas finas, são carregadas em solução; as partículas médias, como argilas médias e areia fina, são levadas em suspensão, pois não se dissolvem na água; e as partículas mais grossas, como areias grossas, cascalho, seixos e pedras, são empurradas/roladas pela enxurrada.

Segundo Guerra (2007), o transporte pelo escoamento superficial pode ser compreendido como o resultado de tensões cisalhantes que superam a resistência estática das partículas individuais. A energia de escoamento superficial está relacionada diretamente com o declive do terreno e o comprimento de rampa a ser percorrido pelo fluxo, ou seja, quanto maior o declive e a rampa, maior será o poder de desagregação e, principalmente, transporte. Além disso, estão mais susceptíveis a formar sulcos e ravinas e, conseqüentemente, causar maiores perdas de solo do que em áreas de menor declividade e nas quais o fluxo percorre menores distâncias.

Por fim, tem-se a deposição dos materiais. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1985), o movimento das águas causa a separação das partículas do solo de acordo com o seu tamanho e peso. A deposição das partículas de solo ocorre quando o agente erosivo (fluxo superficial) perde sua força, com a diminuição da sua velocidade ou volume. Obstáculos pelo caminho interferem no fluxo, fazendo com que o mesmo mude de direção, ou até diminua a sua velocidade.

A deposição de sedimento é muito presente em rios, lagos ou reservatórios, porém, é um grande problema, pois interfere na diminuição da profundidade dos corpos d'água, curso dos rios e até em enchentes nas partes mais baixas das cidades (TOMASI, 2015).

### 3.4 Fatores que interveem no processo erosivo

Autores como Bertoni e Lombardini Neto (1985), Galetti (1985), Guerra e Mendonça (2004), entre outros, indicam que os principais fatores que condicionam o processo erosivo são: o clima, o relevo, a cobertura vegetal, a ação antrópica e a natureza do solo. Estas variáveis são significativas para explicar o processo erosivo, mas, não devem ser observadas de forma isolada, pois é devido à inter-relação entre elas que resultará o processo erosivo.

O fator clima é considerado o mais importante no processo erosivo, pois atua diretamente na desagregação da rocha e formação do solo. Assim, os aspectos climáticos mais importantes no desenvolvimento pedogenético se resumem na precipitação pluviométrica e na temperatura (SALOMÃO e ANTUNES, 1998). A principal influência da precipitação no processo erosivo não é considerada apenas pela quantidade anual de chuva, mas principalmente pela distribuição dela no decorrer do ano. Bertoni e Lombardi Neto (1985) abordam que a velocidade e o volume da enxurrada dependem da frequência, duração e intensidade da chuva. Além disso, Guerra e Mendonça (2004) apontam que fatores como a intensidade, duração, frequência, particularidade das gotas de chuva e a energia cinética da chuva, influenciam diretamente no processo erosivo.

Desta forma, em regiões de precipitação abundante e regularmente distribuída há geralmente a formação de solos profundos e permeáveis que apresentam uma boa resistência a erosão. Já em regiões em que as chuvas são mal distribuídas observa-se uma maior incidência de erosão. Além disso, a cobertura vegetal é de grande importância na determinação do grau de erosão a que um solo está sujeito (AYRES, 1960).

Os diferentes tipos de vegetação que recobrem o solo podem ser floresta, mata, cerrado, campo, etc. A água das chuvas encontra a primeira barreira na copa das árvores, caindo com menos força sobre o solo, onde uma parte da água se infiltra facilmente. Assim, terrenos com pouca vegetação estão mais sujeitos a erosão, já que apresentam menor proteção contra o impacto das chuvas (TEIXEIRA & MISRA, 1997).

A topografia é outro fator a ser considerado, sendo levado em consideração a declividade dos terrenos, suas formas, regularidade e extensão do declive. A

declividade apresenta influência decisiva na intensidade da erosão. No caso da erosão hídrica, quanto mais declivoso o terreno mais facilmente erodível se torna. A forma das encostas influi principalmente no tipo de erosão que se processará. Numa encosta de forma plana ou levemente convexa tenderá, de modo geral, a se processar erosão em lençol; já em encosta com a superfície côncava, a erosão, que terá início a princípio, poderá evoluir para a erosão em voçorocas devido à convergência das águas para a parte mais baixa do terreno. A extensão do comprimento de rampa influi na quantidade de água que corre pela superfície do solo com as precipitações e, conseqüentemente, influi na velocidade que é atingida pelo deflúvio, sendo assim um fator que condiciona a intensidade da erosão (BRAUN, 1961).

Com relação às variáveis físicas do solo que interferem na sua erodibilidade, pode-se considerar a profundidade, a textura, a permeabilidade e a estrutura. A profundidade do solo tem grande influência no processamento da infiltração. Em solos pouco profundos, embora a infiltração ocorra de maneira mais lenta, de acordo com a permeabilidade do solo considerado, ela encontra uma barreira intransponível na rocha matriz que ocorre à pequena profundidade e que, sendo impermeável, fará com que a água se acumule no perfil, saturando-o rapidamente (BRAUN, 1961).

Quanto à textura, solos profundos que apresentam uma uniformidade em todo o seu perfil, possuem boa permeabilidade, e sua saturação não ocorrerá tão facilmente, mesmo em locais de precipitações intensas, sendo, portanto, solos menos sujeitos à erosão. Porém, alguns solos apresentam uma variação muito intensa na textura das diferentes camadas de seus perfis, acarretando em velocidades diferentes de infiltração a diversas profundidades, o que poderá torna-lo facilmente erosivo (BRAUN, 1961).

### **3.5 Erosão em estrada de terra**

Segundo Griebeler et al. (2005), estradas são faixas do terreno com características adequadas que permitem o deslocamento de pessoas e veículos sendo necessário estar em condições favoráveis ao tráfego sob as mais variadas condições climáticas para que possam cumprir de forma satisfatória a sua função.

Segundo Nunes (2003), as condições físicas em que as estradas de terras se encontram, dependem de inúmeros fatores específicos de cada região do globo

(clima, solo, topografia) e da ação antrópica exercida nela (tráfego, forma e frequência da manutenção).

Para Carvalho (1992), as propriedades geométricas das vias de circulação são resultantes do aproveitamento de trilhas e caminhos existentes e assim, é comum apresentarem curvas fechadas (raio reduzido) e rampas declivosas.

Conforme Nori et al. (2005), o leito das estradas deve apresentar características adequadas para suportar a carga a qual será submetido sem que ocorra deformação capaz de modificar a configuração original do projeto. A degradação das estradas de terra é um grande problema em questão ambiental, visto que a dinâmica dessa desagregação afeta áreas mais amplas do que a área da estrada em si.

A erosão é considerada como o principal processo que causa a degradação das estradas não pavimentadas afetando diretamente sua trafegabilidade. Sendo assim, o dilema com relação ao desenvolvimento de processos erosivos em estradas de terra, deve-se ao fato de a maioria desse tipo de acesso ser construído sem projeto de engenharia, na maioria das vezes atendendo de forma precária as necessidades do local (MACIEL FILHO e NUMMER, 2011).

Griebeler et al. (2005) remetem à erosão hídrica no leito e nas margens das estradas como sendo responsáveis por mais da metade da perda de material nestes locais. Segundo Mariotoni (1987), é comum às estradas de terra o surgimento de pontos com ondulações, atoleiros, erosões, acúmulos de sedimentos; isso em decorrência de falhas da drenagem, e má dimensão do uso em relação à capacidade de suporte que as camadas que recobrem a estrada possuem. Conforme Maciel Filho e Nummer (2011), a presença de rodeiros (sulcos devido à compactação pelo trânsito), ondulações e atoleiros, devem-se pela falta de suporte do subleito da estrada.

A capacidade de suporte de um solo está relacionada à resistência aos processos superficiais e à degradação decorrente da circulação de veículos. As estradas de terra são no geral, revestidas por solo local, com mistura de material granular, decorrente das práticas de manutenção e conservação (NUNES, 2013).

O leito das estradas é um dos fatores que se deve levar em consideração, além das condições de clima, solo e topografia. O leito deve resultar em características adequadas para suportar a carga na qual será submetido sem que

venha se deformar e alterar a estrutura original. Desta forma, é importante que este apresente uma drenagem adequada, para que a umidade não altere as características de resistência e a erosão não comprometa a sua finalidade. De acordo com Nogami e Villibor (1995) a erodibilidade é um dos fatores mais importantes para a escolha do projeto mais apropriado para controlar a erosão ao longo das rodovias.

A localização do eixo da estrada em relação ao nível natural do terreno, ou seja, a direção do corte da estrada em relação às linhas de fluxo do terreno, contribui para o desencadeamento de processos erosivos em estradas de terras. Segundo Da Cruz (2005), existem três formas de corte transversal das estradas:

Seção transversal em corte: correspondente à situação em que o leito da estrada encontra-se implantada abaixo da superfície natural do terreno.

Seção transversal em aterro: corresponde à situação onde a rodovia situa-se acima do terreno natural.

Seção transversal mista: ocorre quando, na mesma seção, a rodovia resulta de um lado, abaixo do terreno natural, e do outro, acima do terreno natural.

(DA CRUZ, 2005, p.28-29).

Conforme Demarchi et al. (2003), a drenagem da estrada deve ser projetada por meio do abaulamento transversal do seu leito e da condução apropriada das águas retiradas, através de segmentos de terraços embutidos e canais de drenagem. Sendo assim, é de grande importância o conhecimento da capacidade resistiva do solo ao escoamento superficial que será submetido bem como, as características do escoamento, além da adoção de práticas mecânicas de contenção.

Estradas de terra com o surgimento de pontos com ondulações, atoleiros, erosões e acúmulos de sedimento são em decorrência de falhas da drenagem, má dimensão do uso em relação à capacidade de suporte que as camadas que recobrem a estrada possuem (MARIOTANI, 1987).

Além disso, segundo Griebeler et al., (2005), a falta de vegetação rasteira nos lugares onde formam os trilhos por onde passam os rodados, intensifica a presença de processos erosivos. Nesses lugares tem-se uma sobrecarga que pode originar os sulcos ao longo da estrada. Desta forma, à falta de vegetação que proteja a superfície das estradas, interfere na evolução de feições erosivas de forma mais intensa, originando bacias de sedimentação devido ao depósito de sedimentos oriundos dos ciclos erosivos nas regiões mais baixas.

Griebler et al., (2005) aborda que estradas construídas em cortes profundos provocam a exposição de horizontes que no geral são menos estáveis. A presença de material de transição entre solo e rocha ou diferentes tipos de solo resulta numa zona de instabilidade que facilita o processo erosivo.

Griebeler et al., (2005), levanta a questão do custo para a construção e manutenção das estradas serem bastante elevado, razão pela qual sua construção deve ser realizada de maneira a se considerar todos os fatores passíveis de prejudicar a sua estrutura.

Sendo assim, uma boa estrada de terra resulta nas seguintes características: largura de rolamento suficiente para acomodar o tráfego; apresentar resistência suficiente para suportar as cargas das rodas sem que ocorram deformações excessivas; ter uma boa capacidade de suporte, que depende das características do material da superfície e da resistência do solo, à medida que o teor de umidade varia, e; possuir um bom sistema de drenagem para evitar que a ação erosiva da água prejudique o subleito e a superfície de rolamento (FERNANDES, 2015).

### **3.6 Erodibilidade dos solos**

A erodibilidade do solo está relacionada com sua resistência ou fragilidade em ser erodido, conforme Guerra (2007). Alguns solos são mais susceptíveis aos fenômenos erosivos do que outros, mesmo que eles apresentem a mesma declividade de terreno, chuva atuante e cobertura vegetal.

Segundo Silva et al. (2000), a erosão hídrica deve ser estudada considerando-se a erodibilidade do solo, que representa o efeito integrado dos processos que regulam a infiltração de água e a resistência do solo à desagregação e transporte de partículas, ou seja, sua predisposição a erosão. Desta forma, a erodibilidade pode ser entendida como a maior ou menor facilidade com que as partículas do solo são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1985), solos de caráter arenoso são mais vulneráveis ao processo erosivo, mesmo sendo normalmente porosos, permitindo rápida infiltração das águas e retardando o escoamento superficial. Desta forma, pode-se dizer que solos arenosos apresentam uma maior velocidade e

capacidade de infiltração de água devido aos grandes espaços porosos existentes nos mesmos, diferente do que ocorre com solos mais argilosos.

Segundo Fendrich et al. (1991), a espessura do solo e o contato com o substrato rochoso interferem na rapidez de saturação e no início do escoamento superficial. Além disso, vários autores abordam a textura (tamanho dos grãos) como sendo um dos fatores mais relevantes na magnitude dos efeitos erosivos sobre um determinado tipo de solo. Llopis Trillo (1999) propôs um sistema hierárquico com relação ao efeito erosivo em função da textura dos solos (Tabela 1), segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Tabela 1 – Suscetibilidade à erosão pela textura dos solos

| Símbolo | Descrição do Solo - Classificação Unificada  | Erodibilidade  |
|---------|--|----------------|
| GW      | Pedregulho e mistura de pedregulho e areia bem graduados, com poucos ou sem <u>finos</u> .   | Menos Erodível |
| GP      | Pedregulho e mistura de pedregulho e areia mal graduados, com poucos e sem finos.  | ↓              |
| SW      | Areias e areis pedregulhos bem graduados, com pouco ou sem finos.  |                |
| GM      | Cascalho <u>siltoso</u> , mistura de cascalho e areia e <u>silte</u> .   |                |
| CH      | Argilas inorgânicas de plasticidade elevada, argilas gordas.   |                |
| CL      | Argilas inorgânicas de plasticidade baixa ou média, argilas <u>pedregulhosas</u> , argilas arenosas, argilas <u>siltosas</u> , argilas magras.     |                |
| OL      | <u>Siltos</u> orgânicos, <u>siltos</u> e argilas orgânicas de plasticidade baixa.  |                |
| MH      | <u>Siltos</u> inorgânicos, <u>solos arenosas finos</u> ou <u>siltos micáceos</u> e diatomáceos, solos elásticos.                                   |                |
| SC      | Areias argilosas   |                |
| SM      | Areias <u>siltosas</u>   |                |
| ML      | <u>Siltos</u> inorgânicos e areias muito finas, pó-de-pedra, areias finas <u>siltosas</u> ou argilosas e <u>siltos argilosas pouco plásticos</u> . |                |

Fonte: Llopis Trillo, 1999.

### 3.7 Métodos de avaliação da erodibilidade

A erodibilidade de um solo pode ser avaliada, principalmente através das suas características físicas e químicas e de condicionantes externos. Para isto, é necessário determinar a sua granulometria, plasticidade, teor de matéria orgânica,

estrutura, permeabilidade e porosidade (BASTOS, 1999; AVILA, 2009; FERNANDES, 2011).

A avaliação da erodibilidade de um solo pode ser feita através de métodos diretos e indiretos. Para a avaliação indireta da erodibilidade usam-se ensaios de caracterização física, ensaios de infiltrabilidade e de perda de massa através da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) de Nogami e Vilibor (1979) e ensaio de cone de laboratório. A avaliação direta consiste do ensaio de Inderbitzen.

### 3.7.1 Ensaio de Caracterização Física

Através da curva granulométrica de um solo é possível determinar o seu potencial de erodibilidade. Meireles (1967) infere que:

- solos fortemente erosíveis → % passante na peneira 200 for  $\leq 20\%$ ;
- solos passíveis de forte erosão →  $20\% < \%$  passante na peneira 200  $< 40\%$ ;
- solos pouco erodíveis → % passante na peneira 200  $> 40\%$ .

Bastos (1999), classifica os solos como potencialmente erodíveis quando menos que 55% das suas partículas passam pela peneira 200 (abertura igual a 0,074 mm).

Já Eltz et al. (2001), classificam os solos como erodíveis quando a parcela de argila encontrada na curva granulométrica for superior a 35%.

Solos granulares erodíveis, são aqueles que apresentam na maioria partículas do tamanho de areia fina ou silte e pouca quantidade de argila (FRAGASSI, 2001). Esse mesmo autor propôs a equação (1):

$$E = 0,0002 e^{5,644X}$$

E = erodibilidade (g/cm<sup>2</sup>);

X = (% Silte + % Areia Fina)/ (% Argila + % Areia Grossa).

Através dessa relação é possível inferir que as argilas e as areias grossas são mais resistentes à desagregação do que as areias finas e siltes, correlacionado à

erodibilidade com o quociente da porcentagem de solos erodíveis com solos não erodíveis.

Também é possível correlacionar a erodibilidade de um solo com seus índices de plasticidade: limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP).

Meireles (1967) relaciona solos fortemente erodíveis aqueles que apresentam baixa plasticidade, representada por  $LL \leq 21\%$  e  $IP \leq 8\%$ .

Para Santos e Castro (1967),  $LL < 50\%$  e  $IP$  aproximadamente 20%, são solo classificados como de baixa plasticidade e, portanto, altamente erodíveis. Já Bastos (1999), classifica os solos como potencialmente erodíveis quando apresentam  $IP < 10\%$ .

Fragassi (2001) e Mendes (2006) seguem o proposto pelo DNER (1979), sendo solos com limite de plasticidade  $LP \leq 32\%$  e  $IP \leq 17\%$ , apresenta comportamento de bom a regular referente à resistência a erosão.

### **3.7.2 Ensaio de desagregação**

O ensaio de desagregação trata-se de uma avaliação qualitativa e visual da desagregação de uma amostra de solo indeformada, não confinada, quando submetida à ascensão do nível de água destilada, até estar totalmente submersa, totalizando 24 horas de ensaio. Para a realização deste ensaio, foi adotada a metodologia proposta por Santos (1997 apud BASTOS, 1999). Segundo Bastos (1999), esse ensaio não pode verificar uma relação com níveis intermediários e baixos de erodibilidade, visto que somente solos de alta erodibilidade irão desagregar completamente durante o ensaio. Este ensaio é considerado como um dos critérios preliminares na avaliação qualitativa da erodibilidade pelo fato de ser um ensaio simples e com bons resultados, servindo de auxílio para outros ensaios de erosão. (SANTOS, 1997).

De acordo com Camapum de Carvalho (2006) e Santos (1997), na descrição qualitativa da amostra, pode-se observar as seguintes dinâmicas na amostra: (i) abatimento; (ii) faturamento no topo; (iii) ruptura nas bordas; (iv) velocidade de desagregação; (v) grau de dispersão das partículas de solo; (vi) velocidade de ascensão capilar; e (vii) inchamento.

Lima (1999) realizou o ensaio de desagregação com amostras de solo em erosões da cidade de Manaus, coletadas entre 5,0 e 8,5 m de profundidade, sendo submersas totalmente durante sete dias, não mostrando nenhuma desagregação, tendo como resultados a associação da estrutura geológica ao processo de evolução da erosão.

### **3.7.3 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT**

A metodologia MCT desenvolve um conjunto de ensaios para solos tropicais e subtropicais, utilizado para estudos em rodovias e estradas vicinais. Tendo como objetivo quantificar e classificar os solos em relação ao grau de erodibilidade, baseada no parâmetro do coeficiente de sorção ( $s$ ), obtido no ensaio de infiltrabilidade, e o coeficiente de perda de massa ( $\pi$ ) por imersão modificada.

Através da relação entre os parâmetros  $\pi/s$ , é determinada a classificação dos solos, quanto ao seu grau de erodibilidade. Solos erodíveis são aqueles que apresentam valor superior à 52, segundo Nogami e Villibor (1979). Para Pejon (1992), os solos podem ser classificados como erodíveis, quando essa relação ( $\pi/s$ ) for maior que 40.

Os critérios de erodibilidade, baseado na metodologia MCT, foram confirmados por Bastos (1999) ao estudar os solos residuais não saturados na região metropolitana de Porto Alegre.

### **3.7.4 Ensaio de Cone de laboratório**

O ensaios de penetração de cone foi proposto por Alcântara (1997) com o objetivo de determinar a erodibilidade dos solos. Segundo o autor, a diferença de penetração em amostras saturadas e não saturadas apresenta boa relação com a erodibilidade.

O ensaio mede em cada teste a altura de penetração alcançada pela ponta do equipamento em nove pontos diferentes na superfície de cada amostra.

Este ensaio se destaca pela simplicidade e reprodutibilidade na execução dos testes e também prova que a condição de penetração na situação saturada reflete a perda de resistência exibida pelo solo em contato com a água.

Morais et al., (2004) adotaram este ensaio na análise de erodibilidade de saprólitos de gnaiss no centro sul do estado de Minas Gerais e concluíram que existe uma tendência de os solos mais erodíveis serem mais expansíveis e menos resistentes á penetração saturada.

### **3.7.5 Ensaio de Inderbitzen**

Em 1961, Inderbitzen idealizou um equipamento cuja finalidade era monitorar o volume de perdas de solos em decorrência dos processos erosivos provocados pela água. O modelo original consiste em uma rampa hidráulica com inclinação conhecida, onde se coloca um orifício no qual se insere a amostra de solo, simulando condições de escoamento superficial com vazão controlada. Este ensaio, não leva em consideração o efeito splash (desagregação de partículas provocada pelo impacto das gotas de chuva). Em razão disso, o teor de sedimentos obtidos com o ensaio é menor do que o real.

Bastos (1999), Fragassi (2001), Santos (2001), Ramidan (2003), Paiva (2004), Menezes et al. (2006) e Mendes (2006), vem a anos propondo modificações afim de aprimorar a qualidade dos resultados obtidos com este ensaio.

Com o objetivo de estudar os graves problemas de erosão hídrica na Região Metropolitana de Porto Alegre – RS, com foco nos loteamentos de baixa renda, taludes de corte de rodovias, loteamentos com deficiência no sistema de drenagem e encostas de morros, Bastos (1999), construiu o equipamento para realizar o ensaio. O equipamento de Inderbitzen tem uma rampa hidráulica em chapa metálica (base = 25 cm e comprimento = 60 cm), articulada, permitindo uma variação na sua inclinação de 0° a 54° e com um orifício central, onde foi instalada a amostra de solo indeformada, com diâmetro de 9,76 cm e altura de 5,0 cm, confinada em anel de PVC biselado.

No trabalho, utilizaram-se as seguintes variáveis uma vazão de 3,0 l/min e 6,0 l/min; as amostras em três diferentes condições de umidade, seca ao ar (mínimo de 72 horas), natural e pré-umedecidas (por ascensão capilar por no mínimo 24 horas); e declividades de 10°, 26°, 45° e 54°. O tempo de ensaio foi de 20 minutos e com medições em 1, 5, 10 e 20 minutos.

As declividades adotadas buscou simular os taludes envolvidos na pesquisa e as vazões em função da capacidade de escoamento da rampa e da sensibilidade dos valores de perda de solos medidos.

Todo material carregado foi reconhecido em balde e submetido ao peneiramento úmido, em um conjunto de peneiras (# 4, 10, 40 e 200), e em seguida levado à estufa para quantificar o peso seco retido em cada peneira.

Os resultados foram registrados em gráficos, em que apresentou a variação com o tempo do peso seco acumulado de solo erodido por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Os resultados apontados por Bastos (1999), confirmam o comportamento erodível verificado in situ dos solos saprófitos independentes da condição de umidade. Os solos lateríticos indicaram baixa erodibilidade na condição de umidade natural e pré-umedecidos; à medida que os corpos de prova eram levados a baixos valores de umidade, a taxa de erodibilidade aumentava.

Fragassi (2001), estudou o grau de erodibilidade dos solos da Serra de São Geraldo, entre as cidades de São Geraldo e Viçosa (Minas Gerais), e um talude de solo gnáissico situado no campus universitário da Universidade Federal de Viçosa. Esse autor desenvolveu, nesta universidade uma nova versão do aparelho de Inderbitzen com o propósito de estudar o potencial de erosão dos dois solos.

Utilizou-se PVC para a construção do equipamento. A rampa hidráulica foi construída com uma base de 15,0 cm e comprimento de 120,0 cm, articulada de modo que sua inclinação variasse de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ . A amostra inserida no orifício central com diâmetro de 15,20 cm e altura de 4,0 cm, em anel metálico biselado.

Todas os ensaios foram realizados com as amostras próxima a saturação e adotou-se uma vazão de 1,5 l/min, com o tempo de ensaio de 30 min (com medições em 5, 10, 15 e 30 min) e uma declividade de  $10^\circ$ .

O material carregado foi recolhido na peneira 200, inserida num reservatório de água de 500 ml, e em seguida levado a estufa e, posteriormente, pesado nos tempo adotado.

Os resultados foram apresentados por meio de gráficos, que expressam o tempo de ensaio (min) x perda de solo seco acumulado por unidade de área da amostra ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Os critérios de erodibilidade proposto por Fragassi (2001) está apresentados na Tabela X, fez-se o uso da proposta do DNER (1979) para vazão igual a 1,5 l/min.

Tabela 2 – Critérios de erodibilidade proposto por Fragassi (2001)

| Velocidade de erosão                  | Classificação                               |
|---------------------------------------|---|
| 0,0 a 0,8 g/cm <sup>2</sup> /hora     | Resistente à erosão                         |
| 0,8 a 25 g/cm <sup>2</sup> /hora      | Comportamento regular a mau frente à erosão |
| Acima de 25,0 g/cm <sup>2</sup> /hora | Mau comportamento frente à erosão           |

Analisando os resultados, Fragassi (2001), observou que para os solos da Serra de São Geraldo ocorreu variação considerável, decorrente da anisotropia nas amostras ou devido a problemas relacionados à geometria do corpo de prova. Além disso, verificou-se que os solos residuais jovens foram mais suscetíveis à erosão; dentre eles, o residual jovem do campus da UFV era o mais erodível. E os residuais maduros tiveram valores bem próximos de erodibilidade, podendo ser considerados iguais.

### 3.7.6 Caminhamento elétrico - CE

Através dos levantamentos geofísicos é possível obter informações consistentes da subsuperfície através de medidas indiretas, que correspondem a uma determinada propriedade física do meio investigado. Conforme Kearey et al. (2009), a investigação através dos métodos geofísicos permite detectar e delinear características locais de potencial de interesse que muitas vezes não é possível obter através das sondagens diretas. Desta forma, a geofísica, através do Método da Eletroresistividade (Caminhamento Elétrico – CE ou Sondagem Elétrica Vertical – SEV), possibilita determinar as camadas de cobertura, presença de blocos, posição da rocha, planos preferenciais para escorregamentos, nível do lençol freático e sentido preferencial de fluxo.

Segundo Gandolfo (2007), os métodos geofísicos consistem na investigação do subsolo através de técnicas de medidas indiretas, em grande parte realizadas sobre a superfície do terreno. O método da eletroresistividade induz uma corrente elétrica no solo através de dois eletrodos (denominados A e B), com objetivo de

medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo mensurar a resistividade da subsuperfície (ELIS, 2002), determinado através da Equação 1:

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

No geral, a propagação de corrente elétrica em solos e rochas se dá devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, sendo afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e quantidade e natureza dos sais dissolvidos (APPARAO, 1991).

O resultado da resistividade (aparente) é o produto de uma resistência elétrica ao longo de um corpo. Ou seja, pode ser compreendida como sendo a dificuldade de propagação de uma corrente elétrica em um determinado material. Desta forma, o CE consiste na obtenção de medidas de resistividade elétrica aparente, ao longo de uma seção, com informações que ajudam na investigação em níveis de profundidade e em continuidade lateral (Tabela 2).

Tabela 3 – Resistividade de algumas rochas e solos

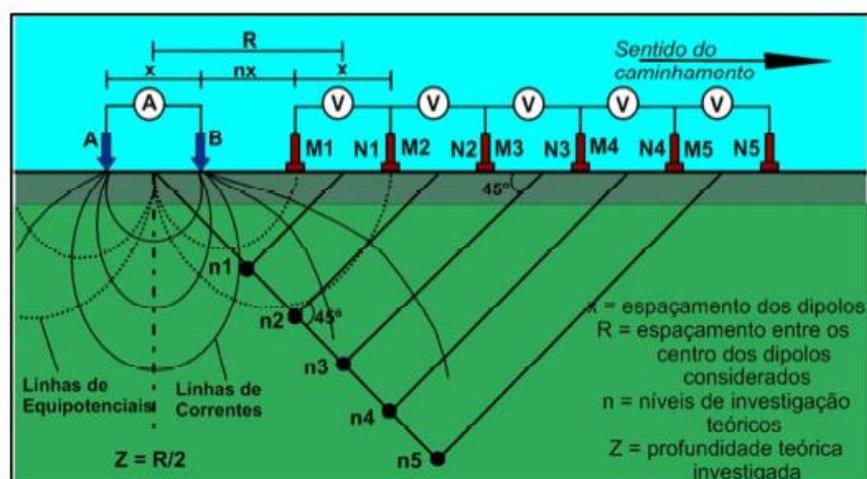
| Material                     | Resistividade (ohm.m)                     |
|------------------------------|---|
| Rochas Ígneas e metamórficas |   |
| Granito                      | 5,0x10 <sup>2</sup> a 1,0x10 <sup>6</sup> |
| Basalto                      | 1,0x10 <sup>3</sup> a 1,0x10 <sup>6</sup> |
| Ardósia                      | 6,0x10 <sup>2</sup> a 4,0x10 <sup>7</sup> |
| Mármore                      | 1,0x10 <sup>2</sup> a 2,5x10 <sup>8</sup> |
| Quartzito                    | 1,0x10 <sup>2</sup> a 2,0x10 <sup>8</sup> |
| Rochas sedimentares          |   |
| Arenito                      | 8,0x10 <sup>1</sup> a 1,0x10 <sup>3</sup> |
| Folhelho                     | 2,0x10 <sup>1</sup> a 2,0x10 <sup>3</sup> |
| Calcário                     | 5,0x10 <sup>1</sup> a 4x10 <sup>2</sup>   |
| Solos e água                 |   |
| Argila                       | 1,0x10 <sup>1</sup> a 1,0x10 <sup>2</sup> |
| Aluvião                      | 1,0x10 <sup>1</sup> a 8x10 <sup>2</sup>   |
| Água fresca                  | 1,0x10 <sup>1</sup> a 1,0x10 <sup>2</sup> |
| Água do mar                  | 2x10 <sup>-1</sup>                        |

Fonte: Modificado de Loke, 1999.

Existem diversos tipos de arranjos que podem ser utilizados para essa técnica, desde polo-dipolo, gradiente, schumberger, wenner e dipolo-dipolo (BRAGA, 1999).

O arranjo/ dipolo-dipolo consiste em um espaçamento igual entre os eletrodos de detecção/ MN e de injeção AB, com deslocamento da corrente elétrica e detecção da resistividade aparente, a partir do centro de ambos os dipolos (Figura 4). A profundidade de investigação não depende unicamente da configuração geométrica do sistema de medidas, mas também dos contrastes das resistividades nas litologias em subsuperfície (GALLAS, 2000). No geral a profundidade de investigação/  $qz'$  apresenta uma relação com o espaçamento entre os eletrodos, ou seja, à medida que o espaçamento aumenta, a profundidade aumenta numa proporção igual a  $R/2$ , sendo R o espaçamento entre os centros dos dipolos. Por fim, os dados adquiridos com esse método sofrem o que se chama inversão geofísica, e são interpretados através do software RES2DINV.

Figura 4 – Esquema de Caminhamento Elétrico para o arranjo Dipolo-Dipolo

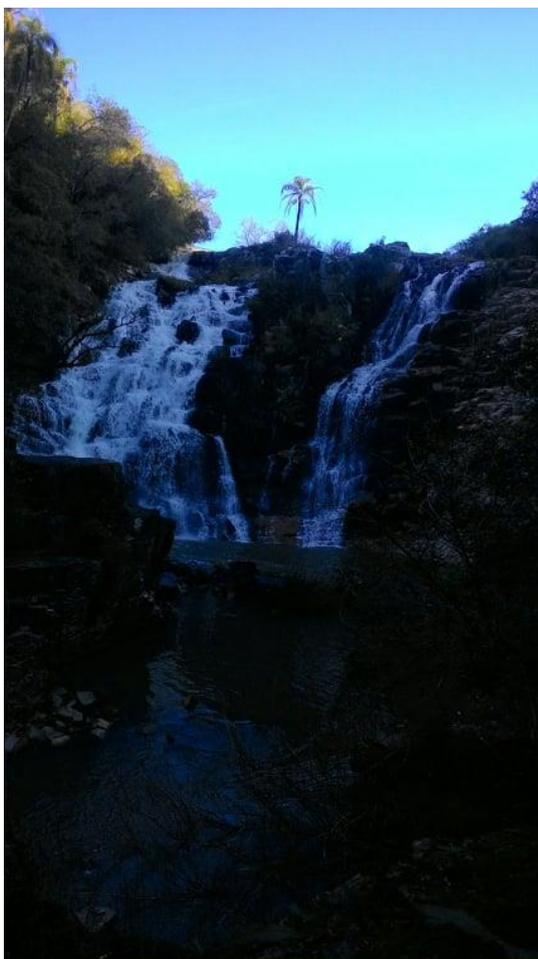


Fonte: Braga, 1999.

#### 4 ÁREA DE ESTUDO

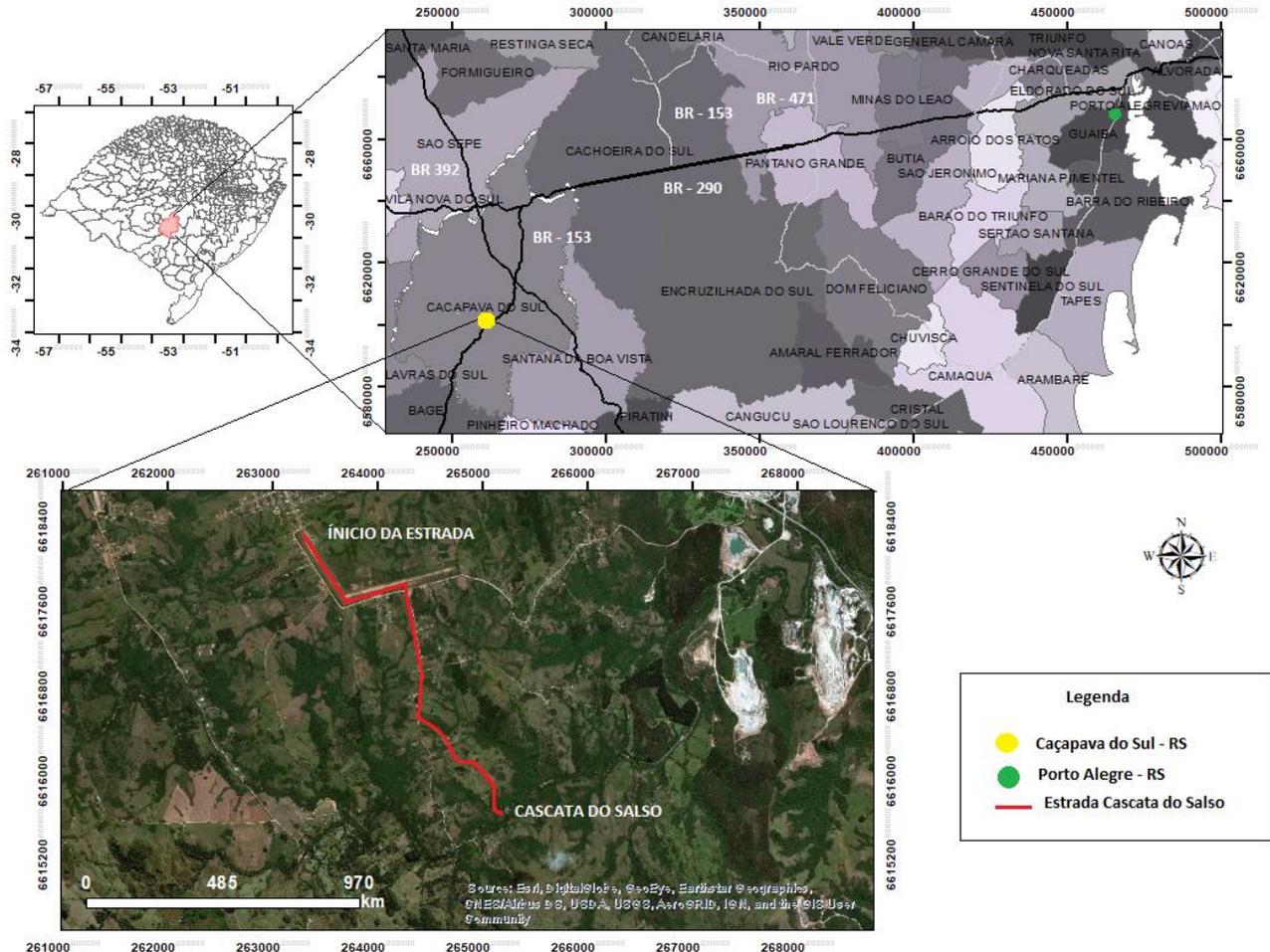
A área de estudo está localizada dentro do Município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Trata-se de uma estrada de terra de acesso a Cascata do Salso, um dos 46 geossítios presentes no município de Caçapava do Sul (BORBA, et al. 2013) (Figura 6). Geograficamente, a área fica localizada entre as coordenadas 53°26'55.58" de longitude oeste e 30°34'10.18" de latitude sul. A cascata do Salso apresenta uma belíssima queda d'água de mais de 20 metros de altura (Figura 5), local que abriga a antiga Barragem do Salso, que no passado forneceu energia elétrica para o município de Caçapava do Sul (Figura 7 e Figura 8). Está situada em área de preservação permanente e localizada a aproximadamente oito quilômetros da sede do município. Seu acesso é realizado através da estrada da Aviação e da Estrada do Salso.

Figura 5 – Vista Geral da Cascata do Salso.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6 - Mapa de Localização da Área de Estudo



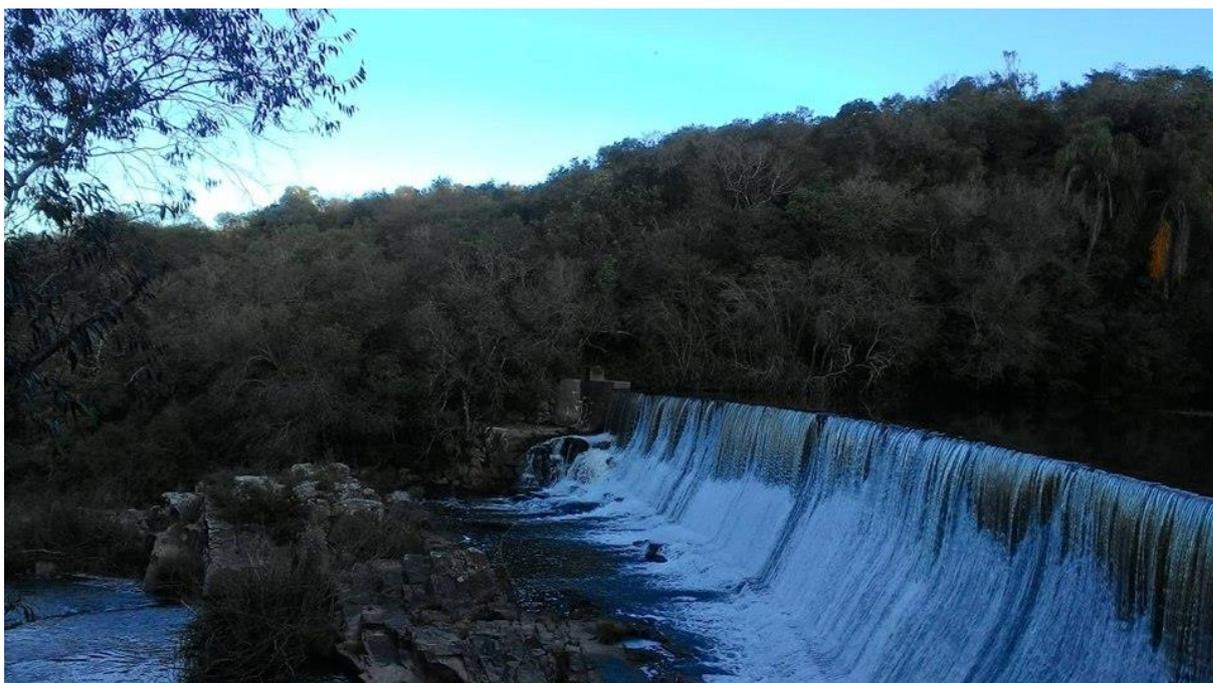
Fonte: autoria própria, base da CPRM.

Figura 7- Vista da precariedade da estrada que dá acesso a Cascata do Salso.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Vista Geral da Barragem do Salso



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1 Geologia regional

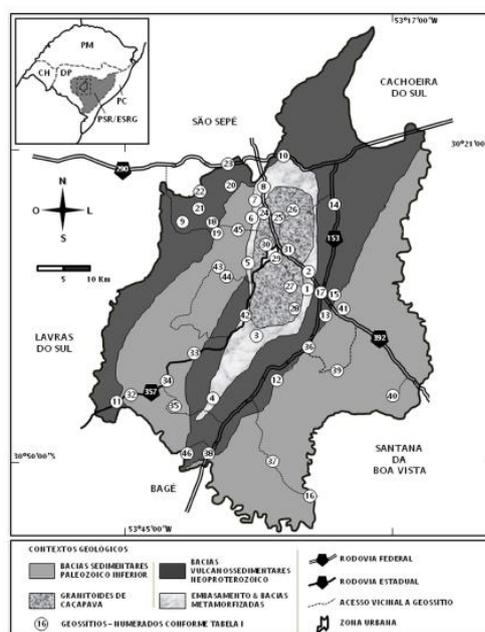
O município de Caçapava do Sul está inserido na porção centro-norte do Escudo Sul Rio Grandense (ESRG), na parte sul da Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1977). A porção na qual o município está inserido abrange uma área marcada por processos magmáticos, metamórficos, sedimentares e metalogênicos variados, com idades registradas desde o Paleoproterozóico (2.48 Ga, Hartmann et al., 2000) até o Paleozóico inferior (Paim et al., 2000; Borba, 2006; Borba et al., 2008; Maraschinh et al., 2010). Segundo Costa et al., (1995), o território do município é limitado na direção NE-SW por uma estrutura tectônica de escala crustal, sendo os terrenos separados entre o Paleoproterozoico, com cobertura supracrustal mais jovem, a leste sobre o domínio Santana da Boa Vista, unidades Encantadas e Porongos, de associações ígneas e metamórficas juvenis do Neoproterozoico e a oeste demarcado pelo domínio São Gabriel, unidades Cambaí e Vacacaí (CHEMALE JR., 2000). Além disso, os registros do embasamento apresentam-se recobertos por unidades sedimentares e vulcanogênicas espessas, depositadas na transição do Neoproterozoico ao Paleozóico inferior associadas aos domínios da “Bacia do Camaquã” (PAIM et al., 2000; BORBA, 2006).

Segundo Borba 2013, a evolução geológica presente no município de Caçapava do Sul pode ser representada em sete fases, sendo elas (Figura 9):

- (1) A primeira fase é marcada por um embasamento antigo do Paleoproterozoico (Hartmann et al., 2000), com uma sedimentação química, marinha, de carbonatos da mesma faixa de idade (NEIS et al., 2012);
- (2) Nesta fase, tem o desenvolvimento de bacias vulcanossedimentares proterozoicas, com metamorfismo variados, presente nas rochas do complexo Passo Feio (BITENCOURT, 1983; HARTMANN et al., 2000);
- (3) A terceira fase é explícita pelo desenvolvimento de bacias vulcanossedimentares neoproterozoicas, registradas nas unidades Maricá, Bom Jardim e Acampamento Velho, com idades entre 630 e 549 Ma (ALMEIDA et al., 2005; BORBA et al., 2007; BORBA et al., 2008; ALMEIDA et al., 2012; JANIQUIAN et al., 2012);

- (4) Posicionamento e cristalização do complexo granítico Caçapava do Sul, ao longo de zona de cisalhamento, em torno de 550 Ma (SARTONI e KAWASHITA, 1985; LEITE et al., 1995);
- (5) Sedimentação dos sistemas aluviais, fluviais, lacustres e eólicos, em ambientes semidesérticos, com presença de vulcanismos basáltico presentes nas unidades Santa Bárbara, Guaritas e Rodeio Velho, no Paleozoico Inferior
- (6) Esta fase ocorreu durante o Paleozoico e Mesozoico, representada pelo soerguimento dos blocos tectônicos da região, reativação de estruturas preexistentes, tornando-se o embasamento da Bacia do Paraná (BORBA et al., 2002; BORBA et al., 2003; SILVA et al., 2006);
- (7) A última fase é marcada pela evolução geomorfológica do Quaternário, com condições mais áridas que as atuais (SUERTERGARAY e SILVA, 2009), desenvolvimento das formas de relevo, como as feições ruiformes presentes nas áreas das Pedras das Guaritas (PAIM et al., 2010) e Serra do Segredo (BORBA et al., 2011).

Figura 9 - Mapa esquemático do Município de Caçapava do Sul, ilustrando seus principais contextos geológicos e a localização dos 46 geossítios inventariados, sendo a área de estudo, a Cascata do Salso demarcada no número 27.



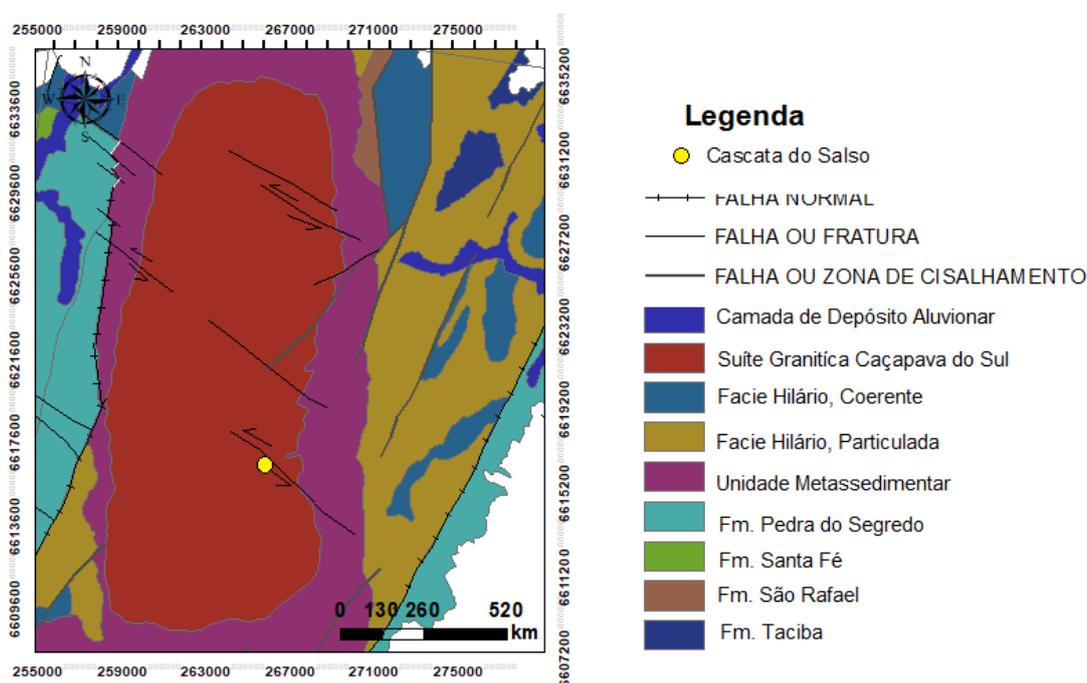
Fonte: Borba et al., 2013.

Com relação à geomorfologia o município de Caçapava do Sul se insere na região geomorfológica do Planalto Sul-rio-grandense, contendo as unidades de relevo ‘Planaltos Rebaixados Canguçu-Caçapava’ e ‘Planaltos Marginais Rebaixados’, marcados por um relevo dissecado em colinas, áreas de topo plano, interflúvios tabulares, encostas íngremes, cornijas e cristas (JUSTUS et al., 1986). Sendo que, na porção norte do município, predomina serra e morros alongados, com solos rasos e afloramentos de granitos e riolitos, enquanto que na porção sul, é demarcada por cerros ruiformes designados pelo termo regional “guaritas” (CPRM, 2009).

## 4.2 Geologia local

A área de estudo está inserida no Complexo Granítico Caçapava do Sul, que segundo Bitencourt (1983), trata-se de um corpo com dimensões de 25 km x 12 km, com uma forma ovalada e orientado segundo a direção N-S (Figura 10). Com idade magmática de aproximadamente 550 Ma, de acordo com datação isocrômica Rb/Sr (SARTORI e KAWASHITA, 1985).

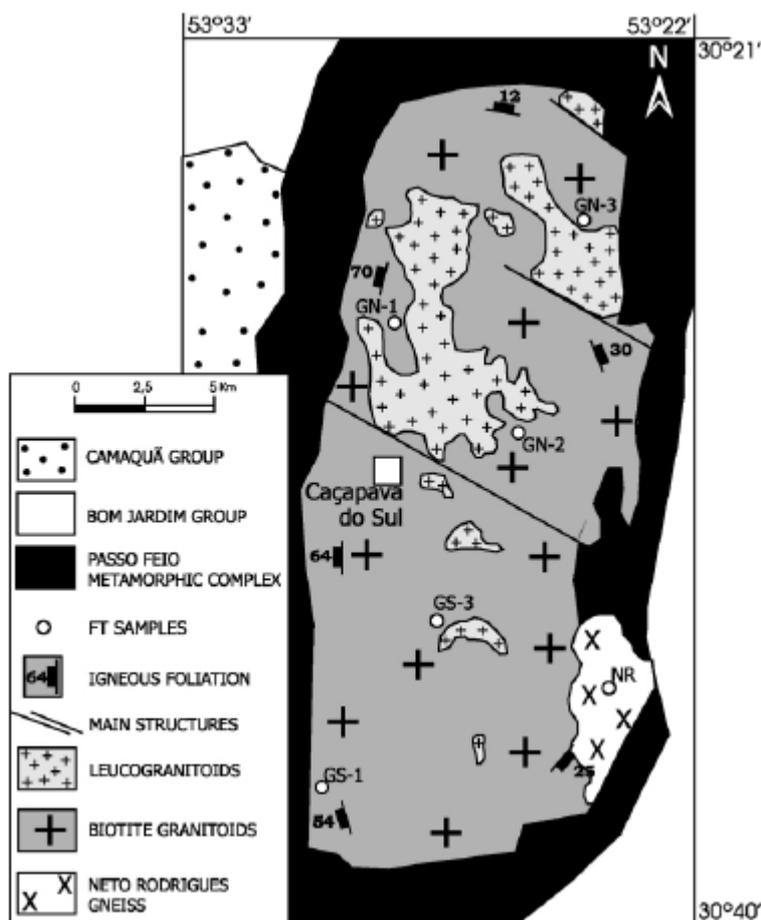
Figura 10 - Mapa Geológico do Município de Caçapava do Sul – RS



Fonte: Modificado da CPRM.

Segundo Bitencourt et al. (1998), esta unidade apresenta dois contrastantes blocos delimitados por estruturas tendendo a NW (Figura 11). Ao norte desta estrutura, leucogranitos são bastante evidentes, particularmente sobre as altas topografias. Enquanto que, ao sul das falhas, tem-se ausência de leucogranitos, porém, com presença de biotita granitoides (monzogranitos, granodioritos e porções dioríticas) bastante evidentes. Nardi e Bitencourt (1989) propuseram que o bloco sul representa uma parte mais profunda da intrusão.

Figura 11 - Mapa Geológico da região de Caçapava do Sul – Fácies do Complexo Granítico Caçapava do Sul, com as estruturas que tendem a NW e que controlam a subdivisão do corpo intrusivo.



Fonte: Borba et al. (2013).

Conforme proposto por Nardi e Bitencourt (1989), os diversos tipos petrográficos podem ser divididos em três facies principais, sendo elas biotita granitoides, leucogranitoides e granitoides transicionais. Segundo esses mesmos

autores, os biotita-granitoides são rocha que apresentam coloração cinza que quando intemperizada apresentam tonalidade rosada, contém alto teor de biotita e allanita como mineral acessório, além disso, predominam nas porções sul, sudoeste e oeste do complexo. Já os leucogranitóides são rochas de pigmentação rósea, com baixa significância de minerais máficos, marcada por granada e ou muscovita e, predominando na região norte-nordeste do corpo. Por fim, os granitoides transicionais apresentam características intermediárias entre as duas fácies descritas acima e, está localizado preferencialmente na porção central e leste do complexo.

A constituição mineralógica principal está representada por porções variadas de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio, com presença de biotita. Os minerais acessórios estão representados por zircão, apatita e minerais opacos. Esses granitoides têm coloração cinza claro a castanho avermelhado, em decorrência do alto grau de feldspato. Em algumas porções se observa diques de pegmatitos intrudindo o granito.

### **4.3 Pedologia**

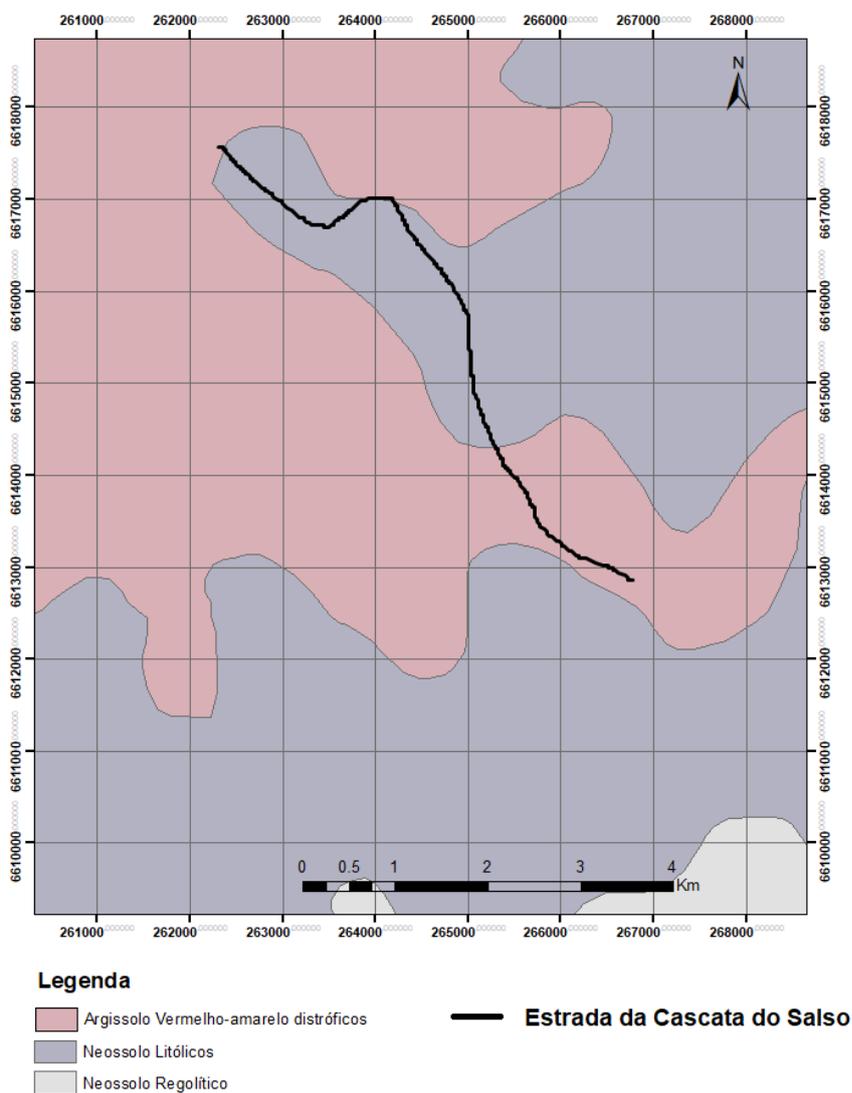
Conforme proposto por Streck et al. (2008), a província do Escudo Sul-Riograndense apresenta uma ampla diversidade geológica, predominando uma litologia pré-cambriana. Além disso, o município encontra-se na província pedogenética da Serras do Sudeste, marcada por Neossolo Regolítico e Litólico e em porções menores, Luvissolo, Planosolo, Chernossolo e Argissolo (Figura 12).

De acordo com Embrapa (2013), os Neossolos são solos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso (menos de 20 cm de espessura), que apresenta insuficiência de atributos para caracterizar a formação do solo, o qual resulta uma evolução limitada em resposta a maior resistência do material de origem aos agentes intempéricos (clima, relevo e tempo).

O Neossolo Litólico é um solo raso, com espessura total dos horizontes sobre a rocha, não é superior a 50 cm, associado aos relevos declivosos (EMBRAPA, 2013). Já o Neossolo Regolítico, é um solo pouco desenvolvido, não hidromórfico e com textura arenosa, propício a processos erosivos, principalmente em porções de alta declividade (EMBRAPA, 2013). E o Argilossolo Vermelho-amarelo apresenta um

horizonte diagnóstico B textural, a presença de argila decresce com a profundidade, podendo ser distrófico (baixa saturação de bases) ou eutrófico (alta saturação de bases), apresentando um caráter ácido (EMBRAPA, 2013).

Figura 12 - Mapa Pedológico do Município de Caçapava do Sul – RS



Fonte: Modificado Embrapa (2013).

#### 4.4 Clima

Köppen et al. (1953) enquadra o Estado do Rio Grande do Sul, como sendo uma zona temperada ou “C” e tipo “Cf” ou temperado úmido. O município de

Caçapava do Sul é classificado como Cfa- II 1c – Vale do Rio Camaquã (MORENO, 1961).

Segundo Moreno (1961), o município apresenta uma média de temperatura anual inferior a 18°C, sendo que o mês mais quente é superior a 22°C e o mês mais frio varia entre 3°C e 18°C. O mesmo autor aborda que a distribuição da chuva nesta região é uniforme, e seu relevo mais suave não influencia muito na distribuição das chuvas. As chuvas são bem distribuídas durante os meses do ano, sendo que a diferença de máxima e mínima não é tão expressiva para classificar o clima em período seco e úmido (MOTA et al. 1968). Caçapava do Sul apresenta uma elevada precipitação pluvial (1588 mm) em função do efeito da altitude, especialmente nas áreas mais elevadas da Serra do Sudeste (EMBRAPA, 1999).

## **5 METODOLOGIA**

A metodologia desenvolvida neste trabalho constituiu em três etapas, sendo elas: (a) etapa de gabinete, onde foi realizado o levantamento dos materiais disponíveis (mapas, teses, dissertações, artigos sobre erosão, entre outros); (b) etapa de campo, na qual foi realizado o estudo dos processos erosivos atuantes na área de estudo, a partir de um levantamento geológico-geotécnico e com coletas de amostras deformadas e indeformadas, para posterior realização dos ensaios geotécnicos; e (c) etapa de laboratório, na qual foram realizados os ensaios de caracterização física e ensaios para avaliação direta e indireta da erodibilidade.

### **5.1 Etapa de gabinete**

Esta etapa se resume no levantamento bibliográfico, em livros, artigos, teses, dissertações e materiais publicados em eventos das áreas de geotécnica, engenharia civil e geologia, para elaboração do referencial teórico-metodológico. As pesquisas foram realizadas abrangendo os processos erosivos em relação a seus conceitos, dinâmicas, classificação, fatores de influência e sua atuação. Além disso, pesquisou-se assuntos referentes aos ensaios de caracterização geotécnica e avaliação da erodibilidade mais comumente usados no meio geotécnico.

### **5.2 Etapa de campo**

Foram realizadas quatro saídas de trabalho de campo, nas quais foram avaliados os solos, litologia e relevo, identificando os principais processos erosivos que ocorrem nesta região. O caminhamento elétrico (CE) também foi realizado nesta etapa e, posteriormente foi processado e interpretado em laboratório.

Foram coletadas amostras de solo deformadas de cada horizonte (HzA, HzB, HzC) do perfil para a determinação da análise granulométrica dos solos e dos limites de Atterberg (liquidez e plasticidade). Para a coleta, as amostras deformadas foram retiradas com o auxílio de pá e espátulas, após a limpeza superficial do perfil, e dispostas em sacos plásticos (LEMOS e SANTOS, 1982).

Além disso, foram coletadas as amostras de solos indeformadas do apenas do horizonte em que a estrada está situada, neste caso, o horizonte C, com a finalidade de realizar os ensaios de caracterização física segundo a norma ABNT NBR 6457/86 (Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização). Para a coleta, fez-se uma pequena bancada na área de amostragem e foram moldadas as amostras indeformadas em anéis de PVC que foram utilizados nos ensaios de avaliação indireta e direta da erodibilidade. A Figura 13, mostra como foram realizada a coleta das amostras indeformadas.

Figura 13 - Realização da coleta de amostras indeformadas envolvidas pelo anel de PVC.



Fonte: Autoria própria.

As amostras indeformadas foram coletadas em dois tipos de anéis de PVC: (a) anéis de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizados para o ensaio de Inderbtzen, desagregação e cone de laboratório; e (b) anéis de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizados para os ensaios da metodologia MCT (Infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificada). As amostras foram parafinadas (Figura 14) para manter a sua umidade natural para posterior uso na realização dos ensaios em laboratório.

Figura 14 - (a) Amostra sendo parafinada para manter a sua umidade natural do dia do campo; (b) Amostra protegida por camada de parafina.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 3 apresenta a quantidade de amostras indeformadas coletadas e seus respectivos ensaios.

Tabela 4 - Número de amostras indeformadas coletadas e ensaios

| Dimensão dos anéis (cm) ( $\Phi$ = diâmetro, h= altura ) | Ensaio                     | Nº amostras |
|--|----------------------------|-------------|
| $\Phi = 10, h = 5$                                       | Inderbtzen                 | 6           |
|  | Desagregação               | 2           |
|  | Cone de laboratório        | 4           |
| $\Phi = 5, h = 5$  | Perda de massa por imersão | 9           |
|  | Infiltrabilidade           | 9           |

### 5.3 Etapa de laboratório

Nesta etapa foram realizados os ensaios geotécnicos para caracterização física e ensaios para a avaliação indireta (ensaios de desagregação, metodologia MCT e conte de laboratório) e direta (ensaio de Inderbtzen) da erodibilidade das amostras coletadas, e análises macroscópicas das frações granulométricas maiores.

Os ensaios foram realizados adotando-se a mesma metodologia de Tatto (2007), Fernandes (2011), e Pittelkow (2013) baseado no trabalho de Bastos (1999). Os ensaios foram realizados em três condições de umidade: natural, seca ao ar (mínimo 72 horas) e pré-umedecidas (24 horas).

#### 5.3.1 Ensaio de caracterização física

Ensaio de caracterização física são de extrema importância tanto para a avaliação da erodibilidade quanto para a determinação de qualquer propriedade que envolva solos e rochas sedimentares. A caracterização física compreende uma série de características inerentes aos solos que auxiliam na avaliação da erodibilidade. Estes ensaios são regidos pelas normas ABNT 6502/95, 7181/16 e Suguio (1980) remetendo a análise granulométrica por peneiramento e sedimentação; ABNT NBR 6459/16, para determinação do limite de liquidez (Figura 15) e, por fim, a ABNT NBR 7180/16, para a determinação do limite de plasticidade (Figura 16).

Figura 15- Ensaio do Limite de Liquidez, com o equipamento Casagrande.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Ensaio do Limite de Plasticidade



Fonte: Autoria própria.

Para a realização da curva granulométrica, no laboratório de Sedimentologia da UFSM, as amostras foram secas em temperatura ambiente por uma semana, posteriormente foi destoroadado em um gral utilizando um pistilo de borracha. Após este processo, o material foi passado em uma peneira de 2 mm, recolhendo o material passante para o ensaio. Uma parte deste material, em torno de 50g, foi colocada em um béquer de peso conhecido, deixando secar na estufa por 24 horas, e entre 70 a 120 gramas foi colocada em uma solução com 47,9 gramas de hexametáfosfato de sódio e 125 ml de água destilada, deixado em imersão por 24 horas. A amostra de 50 gramas que estava na estufa foi pesada, definindo assim sua umidade higroscópica por diferença entre peso inicial e final. O material em imersão foi transferido para um agitador por 15 minutos, posteriormente essa solução foi colocada em uma proveta de vidro, colocando-se água destilada até completar 1 litro. A solução foi agitada de forma manual por 40 segundos, iniciando a fase de pipetagem, utilizando uma pipeta de 20 ml. Para cada pipetagem realizada, foi novamente agitada a solução. Foram feitas 7 pipetagens de tempo e profundidade estabelecidas (Figura 17). Os materiais pipetados foram colocados em béqueres de 50 ml, de peso conhecido, e então colocados na estufa e deixados tempo suficiente para sua secagem completa. O restante do material que ficou na proveta foi passado por um conjunto de peneira e o material retido em cada uma foi transferido para béquer e seco em estufa (Figura 18). Desta forma, com os pesos de cada material retido nos béqueres, junto à umidade higroscópica, foi utilizado a equação fundamentada na lei de Stokes para definir as frequências simples e acumuladas de cada fração granulométrica.

Figura 17 – Execução do ensaio da análise granulométrica



Fonte: Autoria própria.

Figura 18- Conjunto de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria



Fonte: Autoria própria.

A análise macroscópica foi realizada com uma lupa binocular, para as frações das amostras significantes (Figura 19). A amostra coletada em campo teve sua separação granulométrica através das peneiras, e foi pesada cada parcela que ficou retida nelas. Posteriormente, estas amostras foram analisadas através da lupa binocular com o objetivo de buscar informações referentes à forma dos grãos, podendo assim inferir em relação à maior ou menor erodibilidade dos materiais ensaiados.

Figura 19 - Lupa de mesa utilizada para a análise mineralógica



Fonte: Autoria própria.

### 5.3.2 Ensaio de desagregação

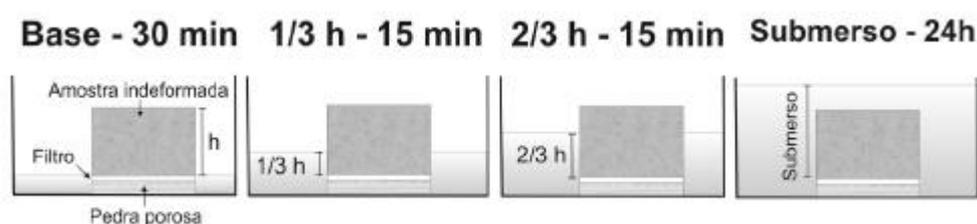
As amostras de solo indeformadas foram coletadas com anéis cilíndricos de PVC, biselados, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Para este ensaio faz-se o uso de amostras em condição de umidade natural e seca ao ar (por no mínimo 72 horas).

Para retirada das amostras de seus respectivos anéis utilizou-se um soquete de acrílico e posteriormente foram postas sobre um papel filtro e uma pedra porosa, permanecendo sob quatro condições de submersão: 30 minutos com o nível d'água na base da amostra; 15 minutos com o nível d'água a 1/3 da amostra; 15 minutos

com o nível d'água a 2/3 da amostra; e, por fim, as amostras ficaram totalmente submersas por 24 horas (Figura 20).

Como este ensaio é qualitativo, foi registrado o comportamento de cada amostra por fotografias e a descrição de sua condição em cada etapa. Para isso, levou-se em consideração o abatimento e inchamento da amostra, raio de influência das partículas de solo desagregadas, velocidade de desagregação, formação de fissuras no topo e ruptura nas bordas da amostra.

Figura 20 - Esquema representando as etapas de desagregação



Fonte: Tatto, 2007.

### 5.3.3 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT

A metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) foi desenvolvida por Nogami e Villibor (1979), constando com ensaios para solos tropicais.

A avaliação da erodibilidade dos solos através deste método fundamenta-se em dois parâmetros adquiridos dos ensaios de infiltrabilidade (coeficiente de sorção -  $s$ ) e do ensaio de perda de massa por imersão (ensaio de erodibilidade específica - coeficiente  $\pi$ ). Através da divisão do parâmetro  $\pi$  pelo coeficiente de sorção, é possível determinar o grau de erodibilidade dos solos. Desta forma, são considerados solos erodíveis quando a relação apresentar um valor superior a 52 (Nogami e Villibar) ou 40 (Pejon, 1992).

- **Ensaio de perda de massa por imersão modificada ( $\pi$ ) ou erodibilidade específica**

O objetivo deste ensaio foi à avaliação quantitativa do potencial de desagregação de uma amostra indeformada de solo quando submersa em água. Foram utilizadas amostras de solo indeformadas nas três condições de umidade: natural, seca ao ar

(por no mínimo 72 horas) e pré-umida (24 horas), confinadas em anéis cilíndricos de PVC de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. As amostras foram reduzidas para 2.5 cm de altura, sendo colocado um papel filtro e posteriormente, uma pedra porosa na parte interna do anel, para condicionar apenas uma direção em que pode haver desprendimento de solo.

O ensaio consiste de um berço metálico que suporta a amostra confinada, sendo esta colocada na horizontal sobre o berço. Abaixo do berço foi colocada uma cápsula para recolher o material desagregado do anel, durante o período de 20 horas, no qual consiste o ensaio. A Figura 21 apresenta o equipamento utilizado para a realização do ensaio de perda de imersão modificado ( $\pi$ ).

Figura 21 – Esquema do Ensaio de Perda por Imersão



Fonte: Autoria própria.

Após o término do ensaio, a água do berço é esgotada cuidadosamente. O solo desprendido e o solo remanescente do anel são recolhidos, levados à estufa, e posteriormente, pesados para a determinação do parâmetro " $\pi$ " (%), através da Equação 2:

$$\pi (\%) = \frac{P_{seco^d}}{P_{seco^t}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

$p_i$  = perda de massa;

$P_{seco\ d}$  = peso de solo seco desagregado; e,

$P_{seco\ t}$  = peso de solo seco total da amostra.

- Ensaio de infiltrabilidade

Através deste ensaio é possível quantificar a velocidade de ascensão capilar nas amostras de solo. Para a realização deste ensaio foram utilizadas amostras de solo indeformadas, confinadas em anéis cilíndricos de PVC, com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, nas três condições de umidade: natural, seca ao ar (por no mínimo 72 horas) e pré-umedecida (24 horas).

O equipamento consiste de um plano de madeira com uma régua graduada acoplada e um tubo capilar de vidro com 6 mm de diâmetro. O tubo capilar fica ligado a um reservatório com topo livre, sobre ao qual se encontra uma pedra porosa. O tubo capilar é preenchido com água até que a mesma transborde no topo do reservatório, após é colocado o papel filtro sobre a pedra porosa e posteriormente, a amostra confinada em seu anel de PVC (Figura 22).

Figura 22 - Equipamento utilizado para a realização do ensaio de infiltrabilidade.



Fonte: Autoria própria.

Para obter os parâmetros de quantidade e velocidade de infiltração as leituras foram realizadas obedecendo a uma escala de tempo (15", 30", 45", 1', 1'15", 1'30", 1'45", 2', 4', 9', 16', 25', 49', 64', 81', 100', 121', 144' e 24 horas). Desta forma, com os dados referentes ao deslocamento do menisco (cm) e o tempo ( $\text{min}^{1/2}$ ), foi elaborado um gráfico de curva típica onde seu trecho inicial retilíneo fornece o coeficiente de sorção "s" ( $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ ), determinado através da Equação 3:

$$s = \frac{(L_f - L_i) \cdot S}{10 \cdot (t_f - t_i) \cdot A} \quad (3)$$

Onde:

s= coeficiente de sorção ( $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$ );

S= área da seção do tubo capilar (cm);

A= área da seção da amostra ( $\text{cm}^2$ );

$L_i$  = Leitura no tempo  $t_i$  (mm); e,

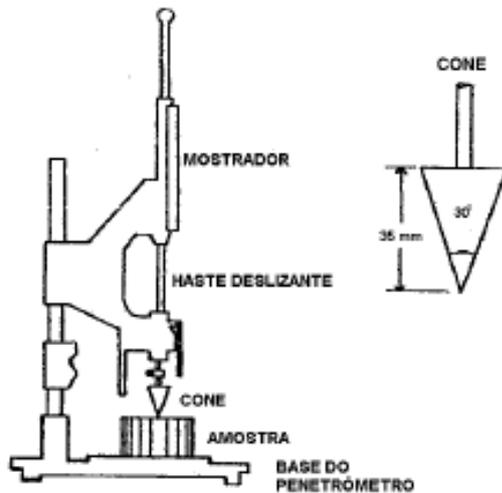
$L_f$ = leitura no tempo  $t_f$  (mm).

#### 5.3.4 Ensaio de cone de laboratório

Alcântara (1997) propôs este ensaio com o objetivo de determinar a erodibilidade dos solos. O ensaio é realizado em amostras indeformadas com altura de 50 mm e diâmetro de 100 mm, através da penetração de um cone com ângulo de abertura de  $30^\circ$  e altura de 35 mm, em amostras de solo nas condições natural e saturada, o qual é obtido por capilaridade pelo período de uma hora. O ensaio consiste na leitura da altura de penetração alcançada pela ponta do equipamento (Figura 23) em nove pontos diferentes na superfície da cada amostra.

Os valores finais de penetração natural ou saturada são obtidos pela média dos valores alcançados em três repetições, exceto daqueles que apresentarem valores de dispersão em relação à média acima e abaixo de de 5%. Portanto, através dos valores de penetração média nas condições de umidade natural (Pnat) e saturada (Psat), são definidos os parâmetros de variação da penetração DP e DPA, que estão correlacionados com a erodibilidade dos solos, segundo Equações 4 e 5.

Figura 23 – Ilustração do equipamento do ensaio de penetração de cone proposto por Alcântara (1997) e equipamento utilizado no ensaio.



Fonte: Alcântara, 1997.



Fonte: Autoria própria.

$$DP = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{nat}} \quad (4)$$

$$DPA = \frac{P_{sat} - P_{nat}}{P_{sat}} \quad (5)$$

Onde:

$P_{sat}$  = umidade saturado; e,

$P_{nat}$  = umidade natural.

Segundo Alcântara (1997), podemos separar as amostras erodíveis daquelas não erodíveis através da relação:

- Se  $DP > 4.5 P_{nat}$  – solos com erodibilidade alta; e,
- Se  $DP < 4.5 P_{nat}$  – solos com baixa ou nenhuma erodibilidade.

Além disso, segundo este mesmo autor, ao combinar os valores de DP ou DPA com o coeficiente de sorção ( $s$ ), obtém-se uma melhor distinção a respeito dos solos quanto à erodibilidade, através dos seguintes critérios:

- Se  $DP > 46.4 s + 25$  ou  $DPA > 21.4 s + 20$  – solo com alta erodibilidade; e,
- Se  $DP < 4.6 s + 25$  ou  $DPA < 21.4 s + 20$  – solos com baixa a nenhuma erodibilidade.

Este ensaio se destaca pela simplicidade e reprodutibilidade na execução de seus testes, além disto, realça que a condição de penetração na situação saturada reflete a perda de resistência pelo solo em contato com a água.

### **5.3.5 Ensaio de Inderbitzen**

O ensaio de Inderbitzen é um dos mais utilizados no meio geotécnico, conhecido também como erosômetro ou ensaio de erosão. É um método empírico, de fácil execução e baixo custo de implantação.

Inderbitzen (1961), num primeiro momento idealizou um equipamento que pudesse monitorar o volume da perda dos solos em virtude dos processos erosivos gerados pela ação da água. Desta forma, desenvolveu um equipamento com a função de simular o comportamento de um solo, frente à erosão, quando submetida a um fluxo de água superficial, condições próximas às encontradas em campo. Além disso, possibilitou a verificação da influência de fatores externos, como a declividade de rampa, compactação do solo e vazão e duração do fluxo de água. Porém, este aparelho não consegue simular o efeito de desagregação das partículas do solo ocasionado pelo impacto das gotas de chuva em uma precipitação. Assim, o volume de solo erodido e coletado neste ensaio é inferior ao de uma situação real.

Rego (1978) foi, no Brasil, um dos pioneiros na introdução deste ensaio no meio geotécnico, ao utilizá-lo no estudo da erosão superficial em taludes de solo residual de gnaiss, no estado do Rio de Janeiro. Diversos pesquisadores tais como Bastos (1999), Fragassi (2001), Santos (1998), Fácio (1991), entre outros, propuseram modificações no ensaio visando obter resultados satisfatórios. Desta

forma, Bastos (1999), adaptou o equipamento, compreendido por uma rampa hidráulica de 25 cm de largura e 60 cm de comprimento (Figura 24).

Figura 24 – Execução do Ensaio de Inderbitzen



Fonte: Autoria própria.

A simulação de escoamento é realizada sobre esta rampa, permitindo observar e comparar o processo erosivo em uma amostra de solo (LEMOS, 2007). A rampa apresenta um orifício central de 10 cm de diâmetro, projetada para que as amostras indeformadas de solo sejam acopladas no mesmo, de modo a sofrer a ação do fluxo de água que escoar pela rampa. Este equipamento permite a verificação do comportamento erosivo diante da variação na declividade da rampa. Isso é possível através de ajustes na base da rampa, podendo variar a sua inclinação em diversos ângulos, sendo os mais usuais 10°, 26°, 45° e 54°. São utilizadas vazões de escoamento de 3 l/min e 6 l/min, simulando escoamentos provocados por precipitações de menor e maior volume e num tempo total de ensaio de 20 minutos.

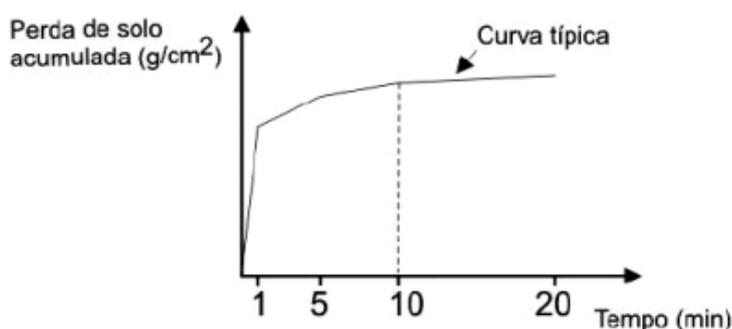
Para a realização deste ensaio, faz-se uso de amostras indeformadas, de modo a preservar a estrutura e as características originais do solo. Além disso, é

procedido com amostras em três condições de umidade diferentes: umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida. As amostras no estado natural de umidade são conservadas de maneira a apresentarem, quando o ensaio for realizado, as mesmas características de umidade da data em que foram coletadas. Isto é possível através de invólucro constituído por uma camada de parafina aplicada nas faces de solo exposto da amostra e por uma proteção plástica que envolve a amostra após a mesma ser parafinada. Com relação à condição seca, retira-se a proteção de parafina e deixa-se a amostra exposta ao ambiente secando ao ar por no mínimo 72 horas antes de ser realizado o ensaio. Por fim, para a condição pré-umedecida, a amostra é retirada do invólucro protetor e posta por no mínimo 24 horas sobre uma pedra porosa que é assentada sobre uma lâmina d'água, com a finalidade de saturar a amostra por capilaridade (FERNANDES, 2015).

O material erodido é coletado por baldes plásticos de 60 litros, posicionados na extremidade final da rampa para receber o fluxo de água contendo sedimentos. Posteriormente, o material é selecionado através de um conjunto de peneiras (malha de 4.8 mm; 2.0 mm; 0.42 mm; 0.074 mm), sendo levados à estufa e pesado, obtendo o peso seco. O solo que fica no anel amostrador é retirado e colocado em cápsulas adequadas para determinação do peso seco correspondente.

Os resultados obtidos através do ensaio são, então, plotados em um gráfico que representa a relação entre a perda de solo acumulado por unidade de área das amostras ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) e o tempo total de ensaio (minutos), como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Curva típica da perda acumulada de solo por área de amostra versus tempo



Fonte: Adaptado de Bastos, 1999.

Bastos (1999) infere a tensão hidráulica atuante no ensaio  $\tau_h$  (Pa), com os dados da perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ), através da relação da Equação 6:

$$\tau h = \gamma \cdot h \cdot d \quad (6)$$

Onde:

$\tau h$  = tensão hidráulica (Pa);

$\gamma$  = peso específico da água ( $\text{N/cm}^3$ );

$h$  = altura da lâmina d'água de fluxo (cm); e,

$d$  = declividade da rampa.

A altura da lâmina d'água ( $h$ ) será estimada a partir dos valores da velocidade de escoamento (medida pela técnica do corante), da vazão e da largura da rampa através da relação da Equação 7:

$$h = \frac{Q}{v \cdot L} \quad (7)$$

Onde:

$h$  = altura da lâmina d' água (cm);

$Q$  = vazão do fluxo ( $\text{cm}^3/\text{s}$ );

$v$  = velocidade do escoamento ( $\text{cm/s}$ ); e,

$L$  = largura da rampa (cm).

Os valores de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ), combinados com a vazão ( $Q$ ) e a inclinação de rampa ( $i$ ), são apresentadas na Tabela 4, conforme Bastos (1999):

Tabela 5 - Valores de velocidade de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ) para a relação de vazão ( $Q$ ) e inclinação de rampa ( $i$ )

| <b>i</b>                   | <b>10°</b> |       | <b>26°</b> |       | <b>45°</b> |        | <b>54°</b> |       |
|----------------------------|------------|-------|------------|-------|------------|--------|------------|-------|
| <b>Q (l/min)</b>           | 3          | 6     | 3          | 6     | 3          | 6      | 3          | 6     |
| <b>v (cm/s)</b>            | 31.05      | 50.64 | 57.05      | 96.65 | 77.36      | 145.86 | 83.5       | 170   |
| <b>h (cm)</b>              | 0.064      | 0.079 | 0.035      | 0.041 | 0.026      | 0.027  | 0.024      | 0.024 |
| <b><math>\tau_h</math></b> | 1.136      | 1.393 | 1.71       | 2.018 | 2.585      | 2.742  | 3.297      | 0.239 |

Fonte: Bastos, 1999.

No estudo optou-se por usar uma declividade de 12°, correspondente à própria declividade da estrada em estudo. Desta forma, foi necessário refazer os cálculos de escoamento ( $v$ ), altura da lâmina d'água ( $h$ ) e tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ). Para obter a velocidade de escoamento e posteriormente a altura da lâmina d'água, utilizou-se a seguinte metodologia (Figura 26):

- Delimitou-se certa distância em relação ao comprimento total da rampa;
- Posteriormente, foi vedado o orifício presente na rampa de ensaio, e deixou-se percorrer água sobre a mesma, até que a vazão fosse estabilizada, sendo elas de 3l/min e 6l/min.
- Após a vazão estabilizada, utilizou-se uma bolinha de isopor e cronometrado o tempo com que a mesma demorava para percorrer a distância delimitada. Realizou-se esse procedimento 5 vezes.
- Com a Equação (8), foi possível obter a velocidade de escoamento:

$$V = \frac{D}{t} \quad (8)$$

Onde:

D = distância (m);

t= tempo (min).

- Posteriormente, aplicou-se as equações (7) e (6), para obter a tensão cisalhante hidráulica ( $\tau_h$ ), referente a declividade de 12°.

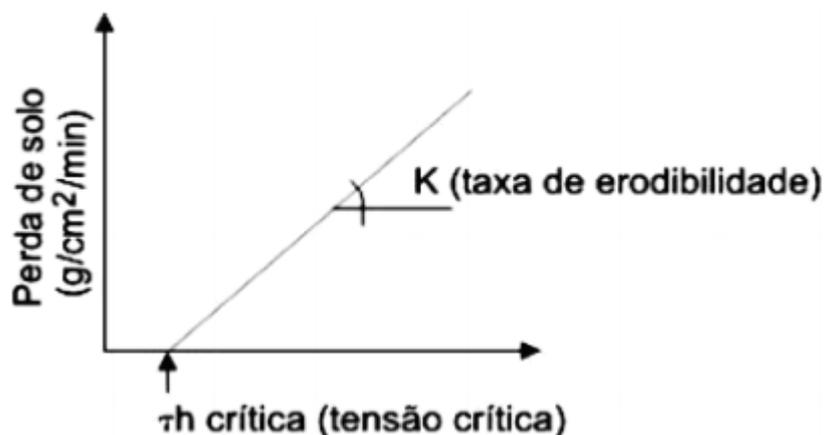
Figura 26- Representação da metodologia utilizada para descobrir a velocidade de escoamento para uma declividade de 12°.



Fonte: Aatoria própria.

O gráfico formado pelos dados da tensão hidráulica atuante  $\tau_h$  e a perda de solo ( $\text{g/cm}^2/\text{min}$ ) resulta no ajuste de uma reta (Figura 27). Deste gráfico é possível obter dois parâmetros fundamentais, sendo eles: a taxa de erodibilidade  $K$  ( $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ), que consiste no gradiente da perda de solo em relação às tensões hidráulicas aplicadas; e a tensão cisalhante hidráulica crítica  $\tau_{h\text{cri}}$  (Pa), que representa a mínima tensão hidráulica gerada pela lâmina d'água sobre o solo, a partir da qual o processo de perda de solo se inicia. Os valores de taxa de erodibilidade  $K$  permitem uma avaliação comparativa dos solos estudados quanto à susceptibilidade à erosão.

Figura 27 – Ajuste da reta e na qual são estimadas a taxa de erodibilidade ( $k$ ) e tensão de cisalhante hidráulica crítica ( $\tau_{h\text{cri}}$ ).



Fonte: Bastos, 1999.

## 5.4 Análises geofísicas

### 5.4.1 Caminhamento elétrico – CE

O método de caminhamento elétrico foi utilizado para obter uma maior compreensão da camada de solo, contato rocha e solo, e dimensão da zona saturada. No levantamento de eletrorresistividade foi realizada a técnica de caminhamento elétrico (CE) e arranjo do tipo dipolo-dipolo com espaçamento entre os eletrodos de corrente (A-B) e de potencial (M-N) de 1 metro e uma investigação vertical de aproximadamente 4 metros. Foi utilizado o resistivímetro da Iris Instrumento, de fabricação francesa, modelo Syscal Pro, com operação em 10 canais de saída e potência de 250 watts. Foram realizados perfis de forma a abranger toda a área de estudo. O processamento dos perfis foi realizado através do software RES2DINV.

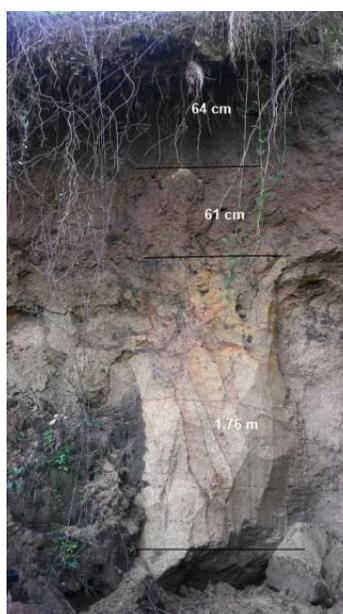
## 6 RESULTADOS

### 6.1 Caracterização da estrada de terra

Desde o ano de 2016, a estrada que dá acesso a Cascata do Salso encontra-se sem condições para tráfego de carros, e seu acesso é feito a pé. Além disso, a estrada situa-se num alto topográfico tendo a um baixo topográfico (320 m para 260 m). A estrada corre na direção N-S, tem 700 metros de extensão e aproximadamente 7 metros de largura (porção pouco afetada pela erosão). A declividade de sua vertente é de 12% e está depositada sobre o Granito Caçapava do Sul.

Foi descrito um perfil de Argissolo de dentro da voçoroca a fim de compreender o processo erosivo presentes nesta área de estudo. A Figura 28 mostra um perfil de solo com cerca de 2 metros de espessura, onde se podem identificar três horizontes. O horizonte A apresenta coloração mais escura, em tom amarronzado de aproximadamente 64 cm de espessura; abaixo o horizonte B, de coloração um pouco mais clara, tendendo ainda a um marrom, de 61 cm e logo abaixo, o horizonte C, de coloração bem clara de 1.76 metros de espessura.

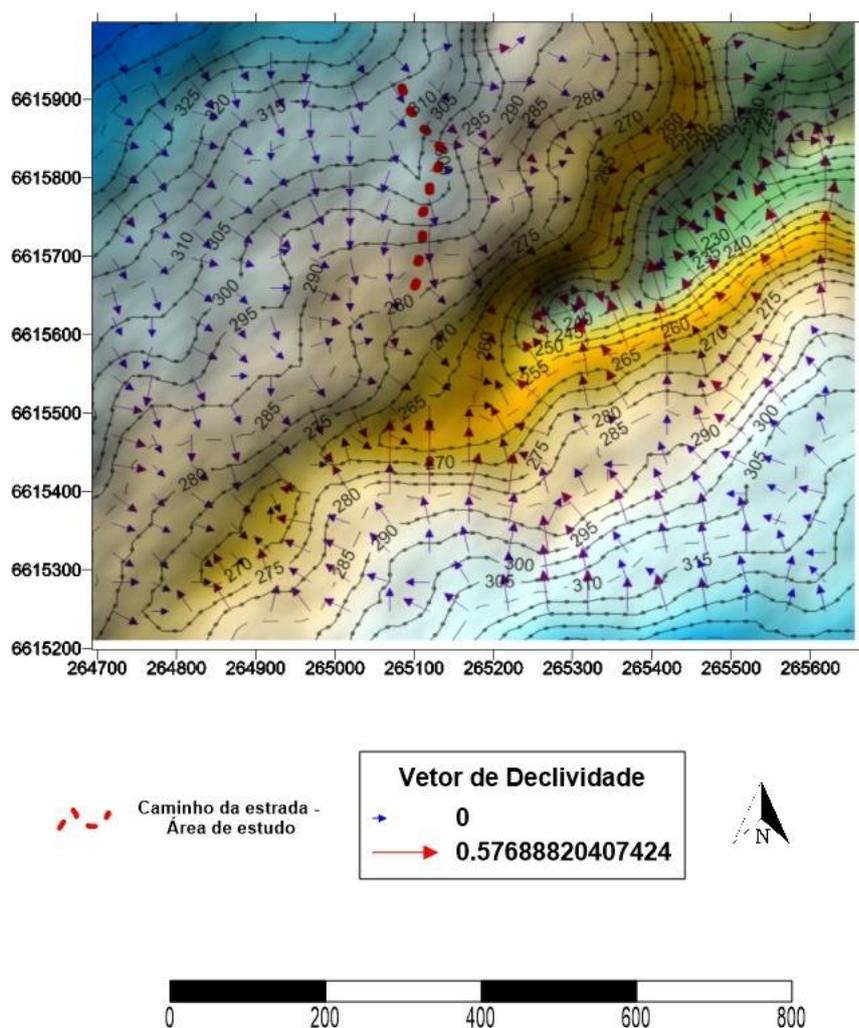
Figura 28 – Perfil de solo dentro da voçoroca



Fonte: Autorial própria.

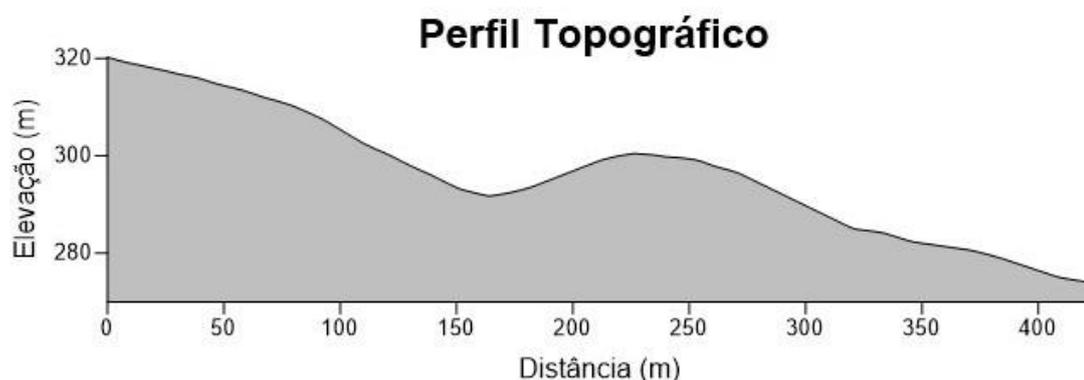
De acordo com o Relatório Técnico de Elaboração do Plano Ambiental do Município de Caçapava do Sul – RS (2010), a estrada está inserida numa área íngreme e, também corta as curvas de nível, o que favorece o processo erosivo, aumentando a velocidade com que a água escoar sobre ela (Figura 29). Diante dessas condições e a falta de drenagem, conduzem o fluxo de águas pluviais, para o leito da estrada, que devido a uma estrutura frágil do material, tende a apresentar sulcos, ravinas e até voçorocas.

Figura 29- Mapa de Fluxo.



O perfil topográfico de uma porção da estrada (elaborado ao longo de seu traçado) está representado na Figura 30. O trecho inicial apresenta-se na cota mais elevada, onde apresenta incisões de sulcos e ravinas com profundidade de aproximadamente 30 cm (Figura 31).

Figura 30 – Perfil Topográfico ao longo da estrada



Fonte: Autoria própria.

Referente aos processos erosivos tem-se o desenvolvimento de sulcos ou ravinas vinculadas às condições de fragilidade natural da área ao escoamento superficial (Figura 31). Essas incisões apresentam pouca profundidade, porém, com comprimento significativo, com tendência a aumentarem em duas dimensões. Camapum de Carvalho et al (2066) e Bigarella (2003), apontam que esse tipo de erosão é a primeira fase de desenvolvimento de uma erosão dita linear e desenvolve-se muito rapidamente durante as chuvas intensas devido ao escoamento superficial que se torna concentrado. Esse tipo de erosão está relacionado a pequenas irregularidades do terreno, geralmente nos mais baixos, que atinge velocidade e volumes suficientes para formar marcas nos solos mais ou menos profundas (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1985; BIGARELLA, 2003).

Figura 31 – Incisões de sulcos ou ravinas no trecho inicial da estrada na topografia 320 metros



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 32, podemos observar o ponto mais crítico da estrada. Diversos autores divergem em relação a tratar-se de feições em sulcos, ravinas ou voçorocas. Seus conceitos diferem com relação às dimensões da incisão. Conforme IPT (1991), as erosões por voçorocas constituem-se no estágio mais avançado da erosão, sendo caracterizado pelo avanço em profundidade das ravinas até que atingem o nível freático ou o nível de água do terreno. Desta forma, ao percorrer por essa feição, não foi possível identificar a presença de esta ter atingindo nível freático ou o nível de água do terreno, sendo assim, podendo não ser classificada como voçoroca, mas sim, como ravina. Porém, para Guerra (2003), voçoroca é uma incisão com largura maior que 30 cm e profundidade maior que 60 cm. Sendo assim, neste trabalho optou-se por trabalhar com a classificação proposta por Guerra.

Ao longo desta estrada e também, dentro das ravinas ou voçorocas, nota-se a presença de erosão em pináculo, que são caracterizadas como feições mais elevadas encontradas no interior das voçorocas, sendo que essas formas estão associadas com diferenças de erodibilidade de solo e/ou rocha.

Figura 32 – Feições erosivas encontradas no interior da voçoroca



Fonte: Autoria própria.

Desta forma, todas as análises e suposições realizadas em relação aos processos erosivos observados necessitam de comprovações quantitativas para um

embasamento concreto para as informações realizadas, sendo assim, realizaram-se os ensaios geotécnicos, em laboratório.

## 6.2 Análise geotécnica

Os ensaios realizados são considerados de extrema importância para a compreensão do comportamento dos solos e rochas frente ao processo erosivo. Sendo assim, neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios de: (a) caracterização física, (b) análise mineralógica; (c) ensaio de desagregação; (d) ensaio pelo critério de erodibilidade MCT; (e) ensaio de cone de laboratório; e (f) ensaio de Inderbitzen.

### 6.2.1 Caracterização física

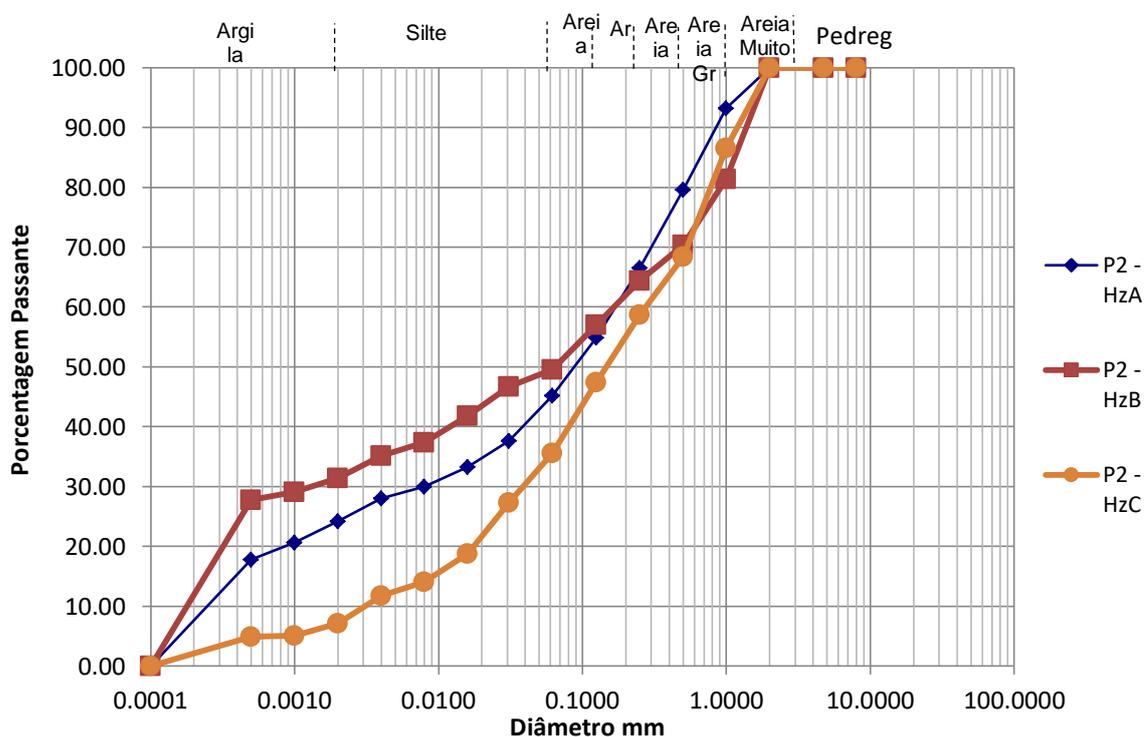
Os ensaios de caracterização física foram: determinação de consistência e análise granulométrica (ABNT NBR, 1984 e SUGUIO, 1980). Os resultados dos ensaios granulométricos com o uso de Defloculante (hexametáfosfato de sódio) estão apresentados na Tabela 5 e a Figura 33 mostra as curvas granulométricas dos materiais presentes ao longo dessa estrada.

Tabela 6 – Frações Granulométricas

| Identificação | Frações Granulométricas (%) |            |           |          |       |        | Classificação Goetécnica |      |
|---------------|-----------------------------|------------|-----------|----------|-------|--------|--------------------------|------|
|               | Pedregulho                  | Ar. Grossa | Ar. Média | Ar. Fina | Silte | Argila | HRB                      | SUCS |
| Horizonte A   | 0                           | 20.39      | 13.07     | 21.33    | 17.2  | 28.02  | A-2-6                    | SC   |
| Horizonte B   | 0                           | 29.67      | 5.9       | 14.89    | 14.38 | 35.15  | A-2-7                    | SC   |
| Horizonte C   | 0                           | 31.57      | 9.71      | 23.12    | 23.85 | 11.74  | A-3                      | SM   |

SUCS = Sistema Unificado de Classificação de Solo, onde SC: Solo Grosso com argila e SM: Solo Grosso com areia siltosa; HBR = Highway Research Board em que se utiliza também o Limite de Liquidez e o Índice de Plasticidade.

Figura 33 - Gráfico de Curva Granulométrica dos materiais da estrada.



Observa-se que o perfil de solo estudado não apresentou partículas do tamanho pedregulho, predominando a fração areia entre 51 e 72%. Ao analisar a porcentagem de areia fina e silte (material mais fácil de ser transportado) nas amostras vê-se que as porcentagens maiores estão no horizonte C, assim como a estrada, além de as amostras deste local possuírem a menor porcentagem de argila.

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios para determinação dos limites de consistência das amostras dos horizontes A, B e C.

Tabela 7 - Índices Físicos

| Horizonte   | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
|-------------|--------|--------|--------|
| Horizonte A | 30     | 19     | 11     |
| Horizonte B | 49     | 25     | 24     |
| Horizonte C | NP     | NP     | NP     |

Todas as amostras apresentaram baixa a média plasticidade com um limite de liquidez inferior a 50% e um índice de plasticidade entre 11 e 24% para os horizontes A e B, respectivamente. O baixo índice de plasticidade do horizonte A

está relacionado com a baixa porcentagem de argila. O horizonte C do perfil e do ponto de coleta das amostras indeformadas apresentou-se não plástico.

Adotando-se o Sistema Unificado de Classificação de Solos, os horizontes A e B são classificados como areia argilosa (SC) e o horizonte C como areia siltosa (SM). Utilizando a classificação de Highway Research Board estes horizontes se enquadram como solos granulares com finos (A-2-6, finos argilosos de média plasticidade; A-2-7, finos argilosos de alta plasticidade) e areia fina (A-3).

Foram descritos a mineralogia e propriedades de forma, como: esfericidade, angulosidade e arredondado, para todas as classes de tamanhos de grãos visíveis macroscopicamente para o perfil de solo. Esta análise é de extrema importância devido à relação de forma e mineralogia dos grãos poderem influenciar no atrito entre eles e, conseqüentemente, na erodibilidade.

A Tabela 7 apresenta a mineralogia e propriedade de forma presente nos horizontes.

Tabela 8 - Análise Mineralógica presente nos horizontes de solo

| Horizonte                                      | Peneira | Mineral   | Características   |
|--|---------|---|---|
| A  | 1.00 mm | Quartzo   | Anguloso a subanguloso e de baixa esfericidade, varia de incolor a branco leitoso.                |
|  |         | Óxido de Ferro  | Baixa esfericidade e anguloso.  |
|  |         | Feldspato   | Alta esferecidade e varia de angular a subangular.  |
|  | 0.5 mm  | Quartzo   | Apresenta média a alta esferecidade, subarredondado a arredondado e no geral, bastante fraturado. |
| Película de óxido de ferro em grãos de quartzo |         | Baixa esfericidade e muito anguloso, apresentam superfície polidas, e também pequenas fraturas de corrosão. |   |

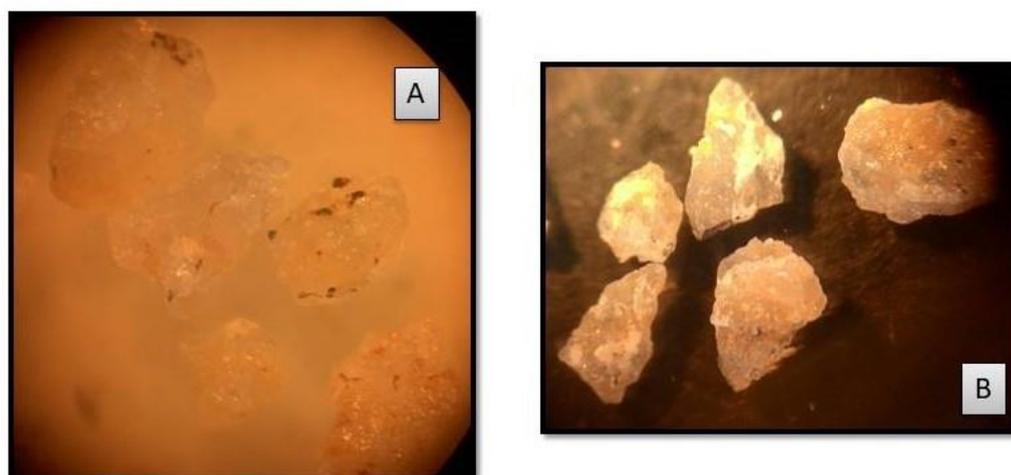
|          |  |  |  |
|----------|--|--|--|
|          |  |  |  |
| 0.25 mm  | Quartzo  | Média a alta esfericidade, subangular a subarredondado. Varia de incolor a branco leitoso. |  |
|          | Película de óxido de ferro em grãos de quartzo | Baixa esfericidade e anguloso.   |  |
|          | Manganês                                       | Com alta esfericidade e arredondado.   |  |
| 0.125 mm | Quartzo  | média a alta esfericidade e é angular a subangular. Variando de incolor a branco leitoso   |  |
|          | Manganês                                       | Com média a alta esfericidade, subangular a subarredondado                                 |  |
|          | Óxido de ferro                                 | Alta esfericidade e subarredondado a arredondado   |  |
| 0.062 mm | Quartzo  | Alta esfericidade e subarredondado a arredondado, incolor e com brilho leitoso.            |  |
|          | Óxido de ferro                                 | Baixa esfericidade, anguloso a subangular.   |  |
|          | Manganês                                       | Baixa esfericidade e subangular a subarredondado.  |  |
| B        | 1.00 mm  | Quartzo  | Anguloso a subanguloso e de baixa esfericidade, varia de incolor a branco leitoso. |
|          |  | Óxido de Ferro   | Baixa esfericidade e anguloso.   |
|          | 0.5 mm   | Quartzo  | Alta esfericidade e subangular a   |

|          |                |         |   |
|----------|----------------|---------|---|
|          |                |         | subarredondado. Com óxido de ferro em alguns grãos de quartzo   |
| 0.25 mm  | Quartzo        |         | Baixa esfericidade, angular a subangular  |
|          | Mica           |         | Alta esfericidade e arredondamento  |
|          | Óxido de Ferro |         | Alta esfericidade e arredondado.  |
|          | Manganês       |         | Com alta esfericidade e arredondado.  |
| 0.125 mm | Quartzo        |         | Média a baixa esfericidade, angular a subangular  |
|          | Manganês       |         | Alta esfericidade e subarredondado a arredondado  |
|          | Óxido de ferro |         | Alta esfericidade e subarredondado a arredondado  |
| 0.062 mm | Quartzo        |         | Média a alta esfericidade, angular a subangular.  |
|          | Mica           |         | Alta esfericidade e com angular a subangular.   |
| C        | 1.00 mm        | Quartzo | Média a baixa esfericidade e angular a subangular. Com presença de óxido de ferro intrudido no mineral.   |
|          | 0.5 mm         | Quartzo | Média a baixa esfericidade, subangular a arredondado; incolor a branco leitoso. Alguns com presença de película de óxido de ferro, sendo este com baixa esfericidade e subangular a subarredondado. |
|          | 0.25 mm        | Quartzo | Baixa esfericidade e subangular a arredondado, incolor a branco leitoso.  |

|          |         |  |
|----------|---------|--|
|          | Mica    | Alta esfericidade e subangular a subarredondado.                                   |
| 0.125 mm | Quartzo | Aédua a baixa esfericidade, subangular a subarredondado. Incolor a branco leitoso. |
|          | Mica    | Alta esfericidade, subangular a subarredondo.                                      |
| 0.062 mm | Quartzo | Baixa a média esfericidade, angular a subangulçar. Incolor a branco.               |
|          | Mica    | Alta esfericidade, subangular e subarredondado.                                    |

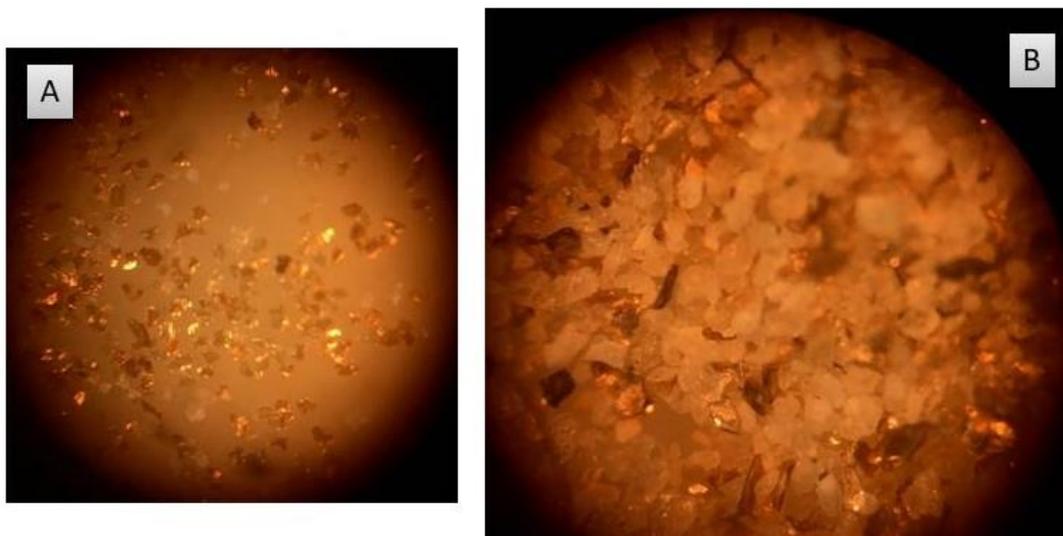
Conforme Tabela 7 e Figuras 34 e 35, de forma geral o perfil de solo, apresentou praticamente minerais como quartzo, óxido de ferro, películas de óxido de ferro em grãos de quartzo e manganês. Os minerais apresentaram certa angulosidade e são subarredondado e arredondado, ou seja, menor embriçamento e maior erodibilidade, além disso, pode-se inferir que provavelmente seja um material proveniente de regiões próxima de sua origem, pois apresentam características de materiais menos trabalhados, ou seja, com várias arestas e ângulos, provavelmente associados à rocha da Suíte Granítica,

Figura 34 – Mascroscopia dos minerais de quartzo. (a) quartzo com presença de óxido de ferro; (b) quartzo incolor a branco.



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Mascroscopia dos minerais de mica. (a) mica; (b) quartzo com mica.



Fonte: Autoria própria.

Ainda nota-se a presença de alguns minerais como quartzo e mica com alta esfericidade e arredondamento, com brilho, que provavelmente, sejam provenientes de regiões mais distantes, visto que estão bastante retrabalhados, ou seja, com esfericidade alta. Além disso, quanto menor for a fração mineralógica, os minerais de quartzo se apresentaram mais arredondados e com alta esfericidade.

### 6.2.2 Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação permite uma análise qualitativa em vez de quantitativa da erodibilidade dos solos. Neste ensaio foram utilizadas amostras indeformadas do horizonte C na unidade natural e seca ao ar (no mínimo de 72 horas).

A Tabela 8 apresenta a descrição do comportamento das amostras nas duas condições de umidade e o resultado final do ensaio.

Tabela 9 - Descrição do comportamento das amostras durante o ensaio de desagregação para o Horizonte C.

| Tempo    | Condição inicial | Comportamento apresentado durante o ensaio  | Comportamento Final    |
|----------|------------------|---|------------------------|
| 30 min   | Natural          | Rápida ascensão capilar com pouca desagregação.   | -                      |
|          | Seca ao ar       | Rápida ascensão capilar, porém, se desprende pouco material   | -                      |
| 15 min   | Natural          | Rápida ascensão capilar, com ruptura de toda a borda e fissura no topo. Rápida velocidade de desagregação. Inchamento da base.  | .-                     |
|          | Seca ao ar       | Rápida ascensão capilar, com ruptura de toda a borda, a amostra reduziu para um diâmetro de 6 cm.   | -                      |
| 15 min   | Natural          | Rápida ascensão capilar, com inchamento na base, fissuração e ruptura nas bordas. Boa parte da amostra foi desagregada. Raio de dispersão das partículas de solo próximo ao CP. | -                      |
|          | Seca ao ar       | Rápida ascensão capilar, fissuração e ruptura nas bordas. Raio de dispersão das partículas de solo próximo ao CP.   | -                      |
| 24 horas | Natural          | Amostra completamente desagregada. Raio de dispersão das partículas de solo próximo ao CP.  | Totalmente desagregada |
|          | Seca ao ar       | Amostra completamente desagregada. Raio de dispersão das partículas de solo próximo ao CP.  | Totalmente desagregada |

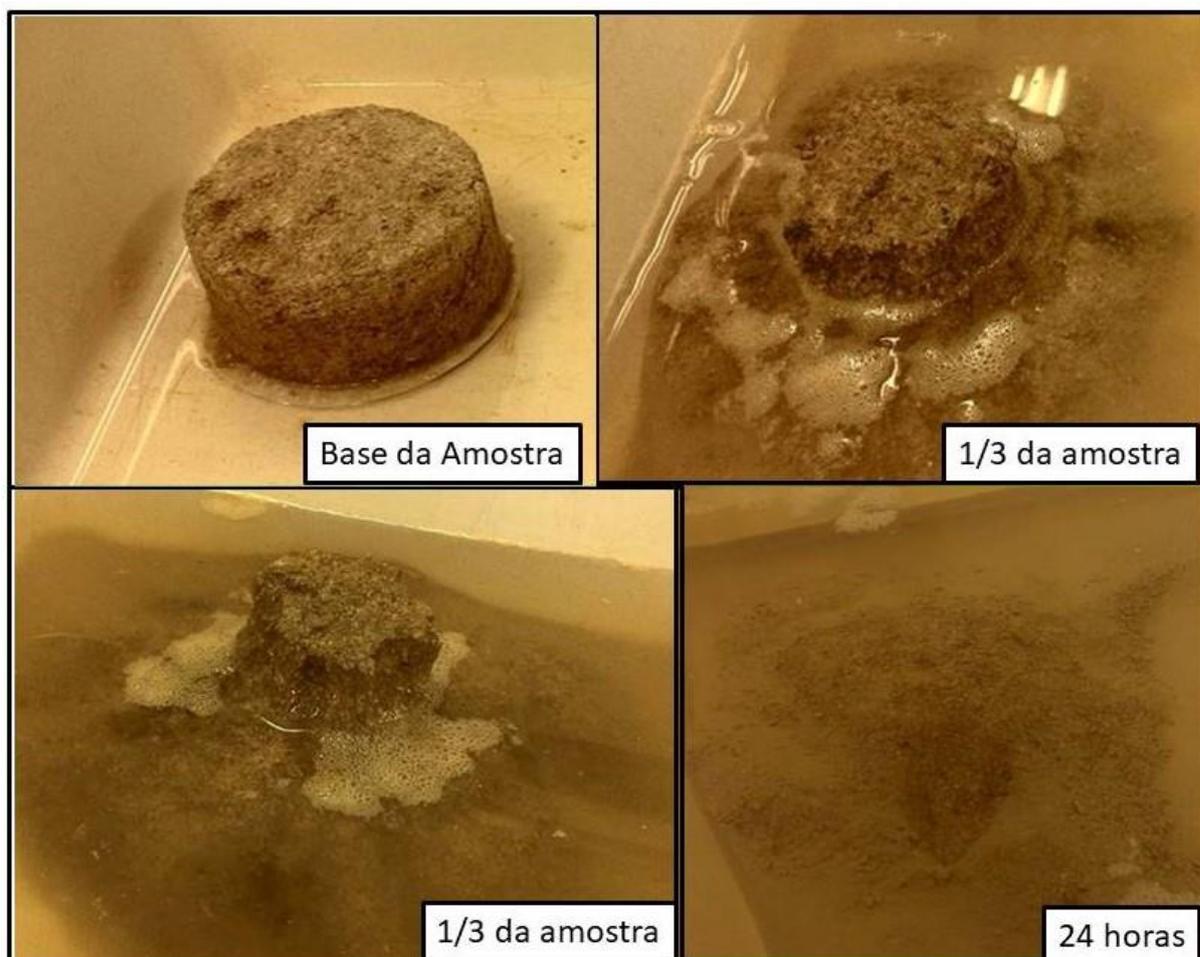
Conforme Tabela 8, devido ao solo ser bastante arenoso e com alta capacidade de infiltração, foram necessários poucos minutos para saturar. O horizonte C apresentou alto poder de desagregação, não resistindo à inundação completa (24 horas). Desta forma, observa-se que as condições nas quais se encontram as amostras, natural ou seca ao ar, não foram um fator de influência no teste para as amostras, pois em ambas as condições, elas apresentaram uma completa desagregação, formando uma pilha de material desestruturado (Figura 36 e 37).

Figura 36 - Comportamento da amostra em condição natural quando submetidas à inundação



Fonte: Autoria própria.

Figura 37 - Comportamento da amostra em condição seca ao ar quando submetidas à inundação



Fonte: Autoria própria.

### 6.2.3 Ensaio pelo critério de erodibilidade MCT

Foram realizados ensaios de infiltrabilidade e perda por imersão nas três condições de umidade seca ao ar (72 horas), pré-umida (24 horas) e natural. O valor de  $\pi/s$  das amostras consideradas comprovou que o horizonte C é facilmente erodível.

A Tabela 9, apresenta os resultados dos ensaios de infiltrabilidade e erodibilidade específica, através do coeficiente de sorção ( $s$ ) e da perda por imersão ( $\pi$ ), respectivamente.

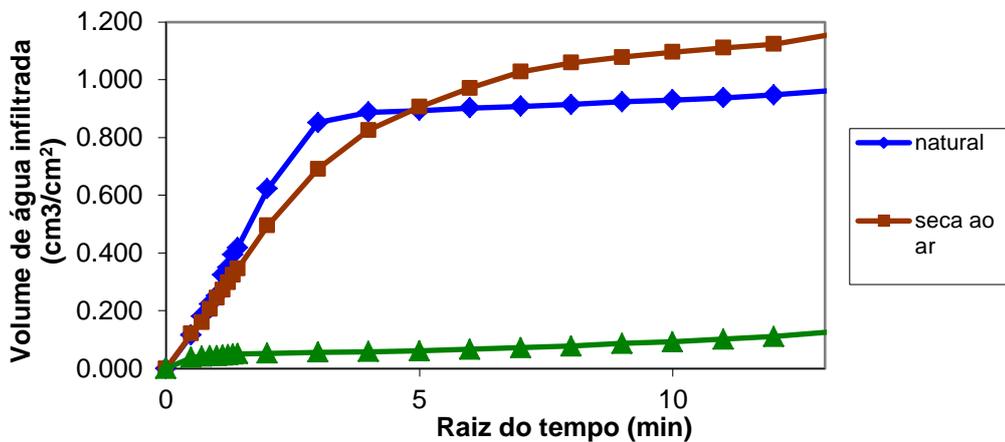
Tabela 10- Valores do coeficiente de sorção (s) e perda por imersão (pi) para diferentes condições de umidade das amostras do horizonte C – critério de erodibilidade da metodologia MCT

| Horizonte | Condição de Umidade           |         |         |                               |         |         |                               |          |          |
|-----------|-------------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|-------------------------------|----------|----------|
|           | Natural (nat)                 |         |         | Seca ao ar (sa)               |         |         | Pré-umedecida (pu)            |          |          |
|           | s<br>(cm/min <sup>1/2</sup> ) | pi (%)  | pi/s    | s<br>(cm/min <sup>1/2</sup> ) | pi (%)  | pi/s    | s<br>(cm/min <sup>1/2</sup> ) | pi (%)   | pi/s     |
| C         | 0.033                         | 63.732  | 1931.27 | 0.046                         | 73.513  | 1598.11 | 0.00486                       | 66.998   | 13785.6  |
|           | 0.039                         | 80.195  | 2056.28 | 0.091                         | 76.724  | 843.121 | 0.0038                        | 33.48    | 8810.53  |
|           | 0.033                         | 83.61   | 2533.64 | 0.091                         | 78.154  | 803.703 | 0.0033                        | 74.004   | 22425.45 |
| Média     | 0.035                         | 75.8457 | 2173.73 | 0.076                         | 76.1303 | 1100.02 | 0.00399                       | 58.16067 | 15007.19 |

Verifica-se que para condição de umidade das amostras seca ao ar, os coeficientes de sorção (s) e perda por imersão (pi) foram mais elevados quando comparado com as demais condições. Para as três condições de umidade a relação pi/s foram extremamente elevadas, sendo superior a 40 e 52 (Pejon, X, respectivamente, classificando esse solo como erodível.

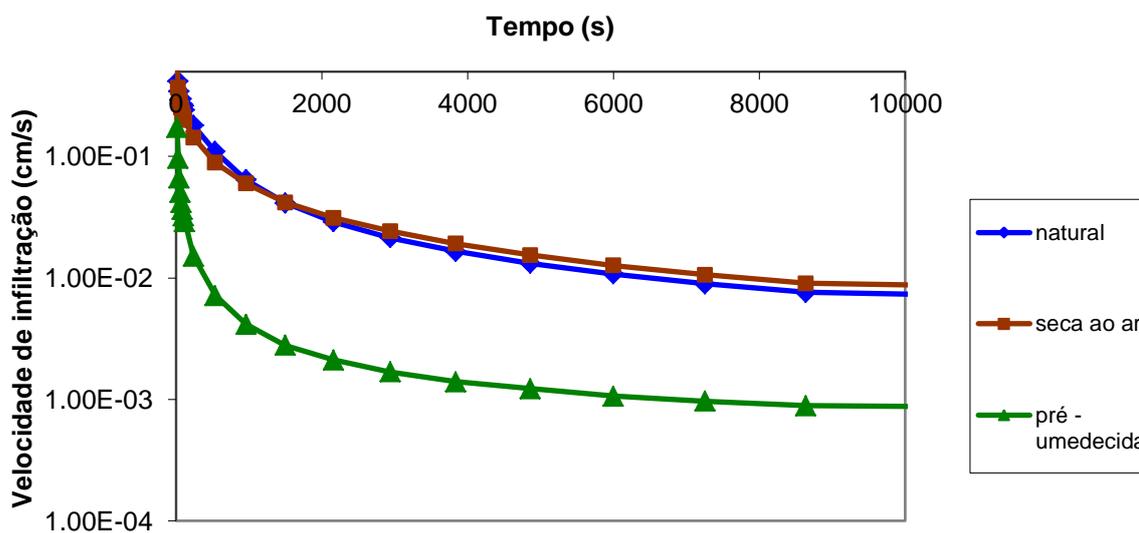
As Figuras 38 e 39 apresentam as curvas médias do volume de água infiltrada (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>) pela raiz quadrada do tempo e a velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s). Segundo Burgos e Vilar (2005), as curvas velocidade de infiltração pelo tempo podem fornecer uma estimativa da permeabilidade saturada dos solos.

Figura 38 - Volume de água infiltrada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ) pela raiz quadrada do tempo (min) para as amostras do horizonte C.



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 - Velocidade de infiltração (cm/s) pelo tempo (s) para as amostras do horizonte C.



Fonte: Autoria própria.

A metodologia utilizada acima mostrou uma boa relação e correspondência entre os resultados dos ensaios e o comportamento dos solos nos locais dos

estudos, e pode-se dizer que o ensaio de desagregação comprovou sua aplicabilidade a estes materiais.

#### 6.2.4 Ensaio de cone de laboratório

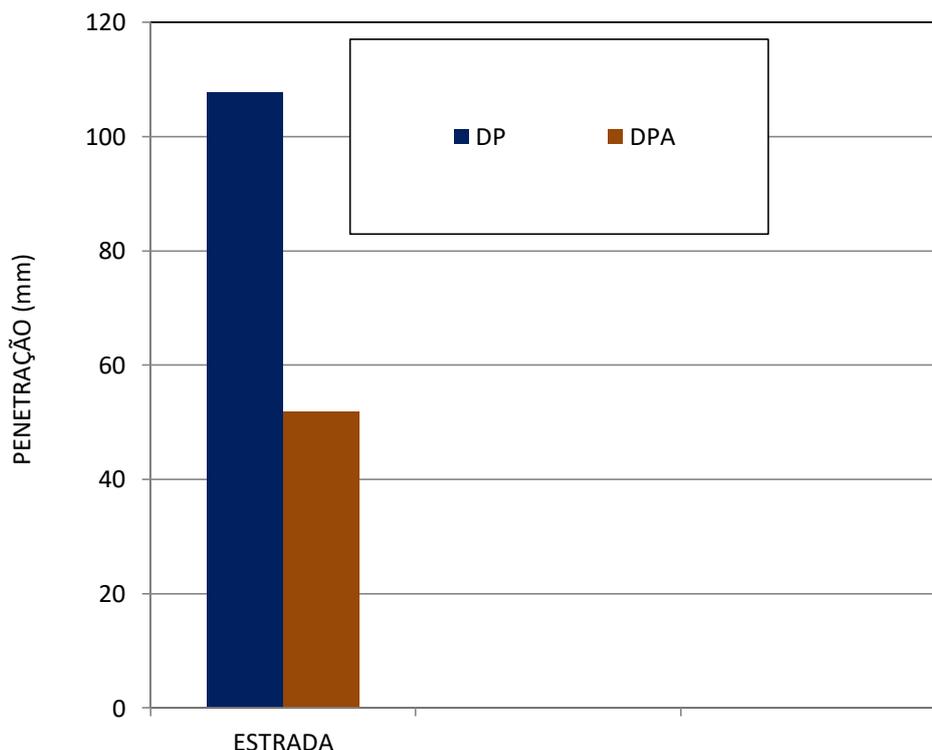
Os resultados encontrados estão expressos em função das profundidades de penetração do cone, medida em amostras nas condições natural (Pnat) e saturada (Psat). Os parâmetros obtidos com relação à variação de penetração DP e DPA foram definidos por Alcântara (1997). A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos, ilustrados na Figura 40 em função dos valores de penetração (P em mm).

| Horizonte     | Valores de Penetração       |      | Variação de Penetração      |     |
|---------------|-----------------------------|------|-----------------------------|-----|
|               | (mm)                        | (%)  |                             |     |
|               | Pnat                        | Psat | DP                          | DPA |
| C             | 1.3                         | 2.7  | 107.6                       | 9   |
| Classificação | Solo com Alta Erodibilidade |      | Solo com Alta Erodibilidade |     |

De acordo com Bastos (1999), a resistência oferecida à penetração do cone de laboratório está relacionada à coesão superficial dos solos, além disso, a variação desta penetração com o umedecimento representa a perda desta coesão com a variação da sucção matricial e com o processo de desagregação do solo com a água. Esta relação entre o aumento na penetração do cone, perda de coesão e desagregação do solo com a inundação é evidente para o solo do horizonte C, em estudo.

Neste caso, conforme a Figura 40, se analisar o DP e o DPA o horizonte C é classificado como de alta erodibilidade, segundo classificação de Alcântara, (1997).

Figura 40- Representação Gráfica do ensaio de penetração



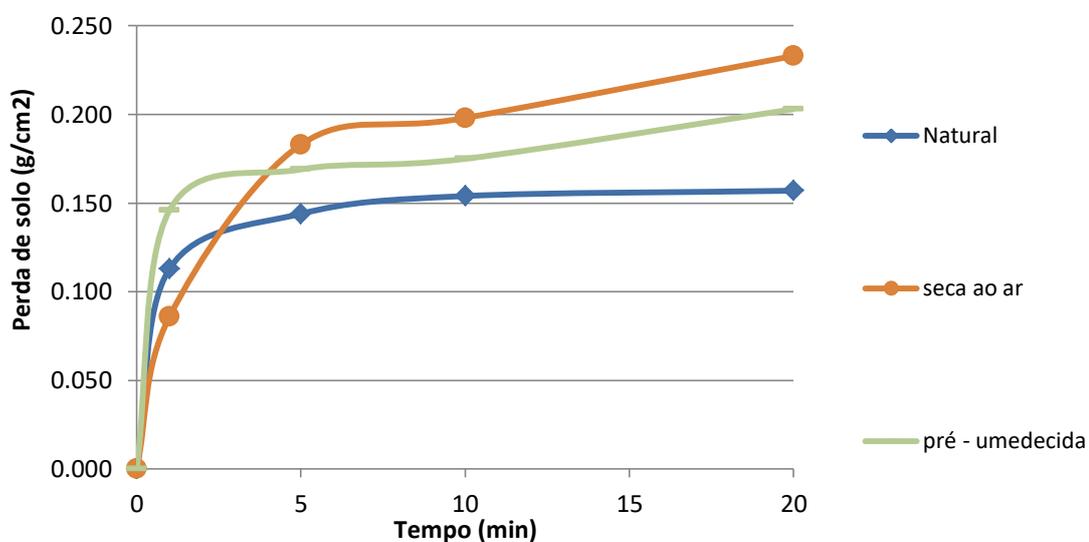
Fonte: Autoria própria.

### 6.2.5 Ensaio de Inderbitzen

Para este ensaio, optou-se por usar a declividade na qual a estrada da Cascata do Salso está sujeita, igual a 12°. Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados em função de perda de solo (desagregação) por unidade de área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) pelo tempo de ensaio (min). Para a condição específica de escoamento de água e inclinação de rampa, determinou-se a tensão hidráulica aplicada no ensaio (th). Além disso, com os resultados de perda de solo por unidade de área da amostra, pelo tempo de ensaio plotados versus tensão hidráulica aplicada, foram determinadas a tensão cisalhante hidráulica crítica ( $th_{\text{crit}}$ ) e a taxa de erodibilidade (K).

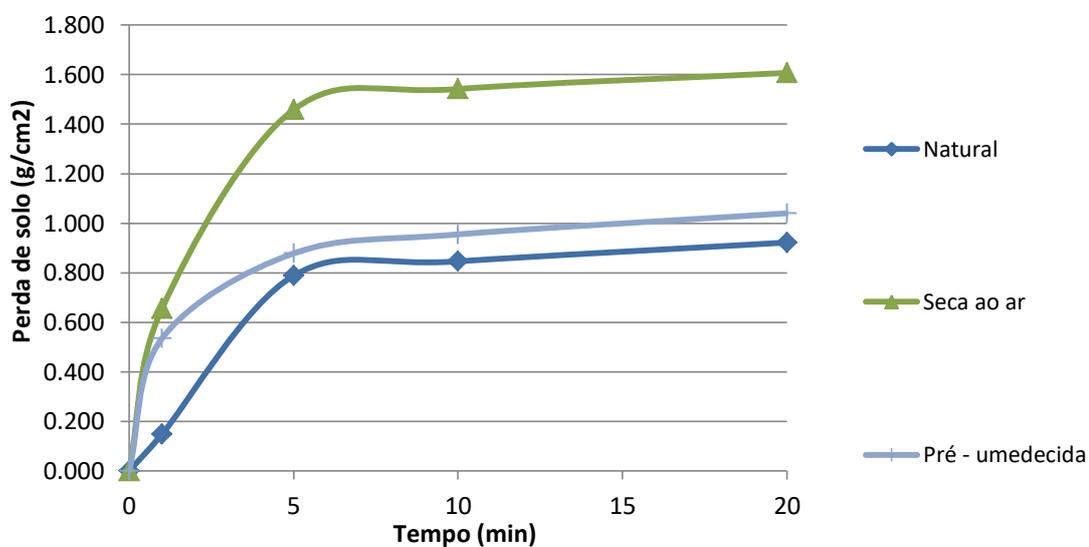
As Figuras 41 e 42 apresentam a relação entre a perda de solo por unidade de área da amostra pelo tempo de ensaio para as amostras do horizonte C, para as condições de umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida, nas vazões de 3 e 6 l/min.

Figura 41 – Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras do horizonte C em diferentes condições de umidade para vazão de 3l/min.



Fonte: Autoria própria.

Figura 42 - Curva típica obtida do ensaio de Inderbitzen para amostras do horizonte C em diferentes condições de umidade para vazão de 6 l/min.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 11 resume os resultados obtidos para o horizonte C para as três condições de umidade inicial das amostras: umidade natural, seca ao ar e pré-umedecida.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de Interbitzen – Perda de Solo ( $10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>/min), para diferentes condições de fluxo (Q = vazão e i = inclinação da rampa) e teor de umidade das amostras, e parâmetros  $th_{crit}$  (Pa) e K ( $10^{-2}$  g/cm<sup>2</sup>/min/Pa)

| Condição | Q = 3 l/min | Q = 6 l/min | $th_{crit}$ (Pa) | k (g/cm <sup>2</sup> /min/Pa) |
|----------|-------------|-------------|------------------|-------------------------------|
|          | i = 12°     | i = 12°     |                  |                               |
| th (Pa)  | 1.775       | 0.067       |                  |                               |
| nat      | 0.154       | 1.789       | 1.346            | 191.11                        |
| sa       | 0.198       | 1.542       | 1.3458           | 371.17                        |
| pu       | 0.175       | 0.955       | 1.3737           | 215.41                        |

Nota-se que para as três condições de umidade os valores para o coeficiente de erodibilidade (k) foram extremamente elevados e diferentes embora os valores de  $Th_{crit}$  sendo bastante semelhantes. Observam-se valores significativos para este horizonte, principalmente para a condição de umidade seca ao ar e natural. Segundo Bastos (1999) os solos mais erodíveis apresentam valores de K na condição natural superior a um valor limite de aproximadamente a 0,01 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa e que os solos mais resistentes a erosão apresentam valores de K inferior a 0,001 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa. Portanto, segundo a sugestão proposta o horizonte C em estudo é classificado como solo erodível.

As figuras 43 mostra o comportamento das amostras de solo indeformadas em sua umidade secar ao ar, após ser submetido ao ensaio.

Figura 43 – Resultado das amostras sob umidade seca ao ar após o ensaio de Inderbitzen, (a) ensaio realizado para uma vazão de 6 l/min e (b) ensaio realizado para uma vazão de 3l/min, em preto tem-se uma estrutura que foi preservada no momento da coleta da amostra.

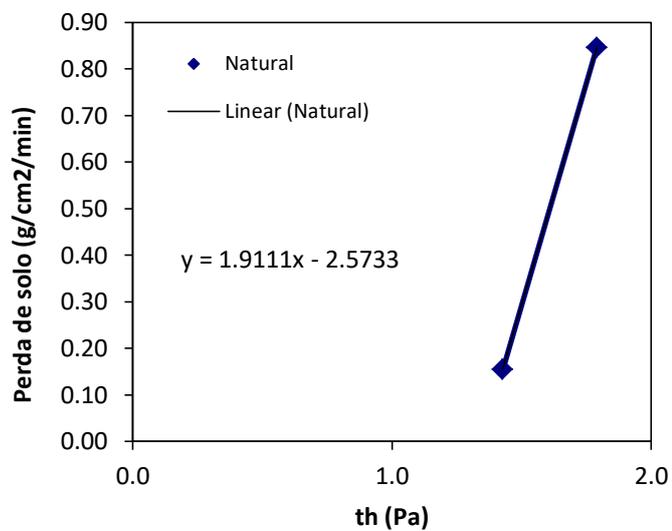


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 43, nota-se que a amostra submetida a uma vazão de 3l/min (a) erodiu pouco material quando comparado com a vazão de 6l/min (b). Esse tipo de diferença no comportamento pode estar relacionada à presença de estrutura preservada nesta amostra (veio), que se tornou uma barreira e impediu que o material fosse desprendido com a velocidade da água. Já, na amostra (a), não havia nenhuma estrutura e o material foi quase totalmente levado com a velocidade da água. Esse tipo de comportamento é o que se observa na estrada, parte dela que ainda está preservada é devido a veio de pegmatitos, que mergulham entre 66 a 81° e com direção de 270 a 182°.

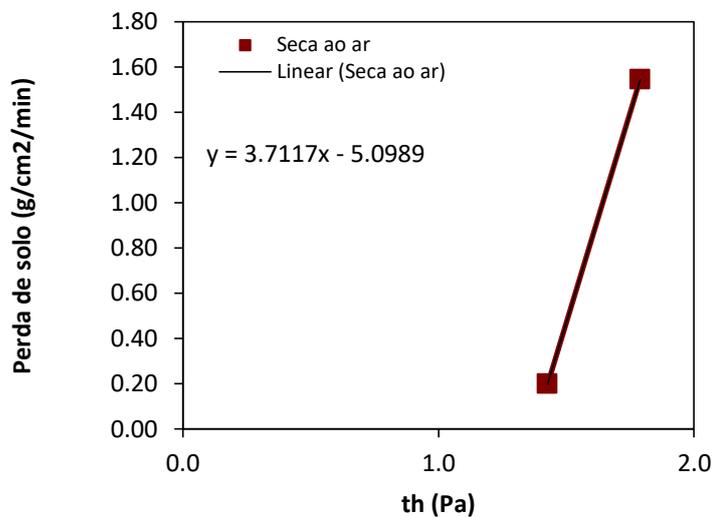
As Figuras 44, 45, 46 e 47, apresentam os resultados obtidos no ensaio de Inderbitzen para a perda de solo ( $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$ ) pela tensão hidráulica para todas as condições de umidades estudadas.

Figura 44- Resultado do ensaio Inderbitzen para a amostra na condição de umidade natural.



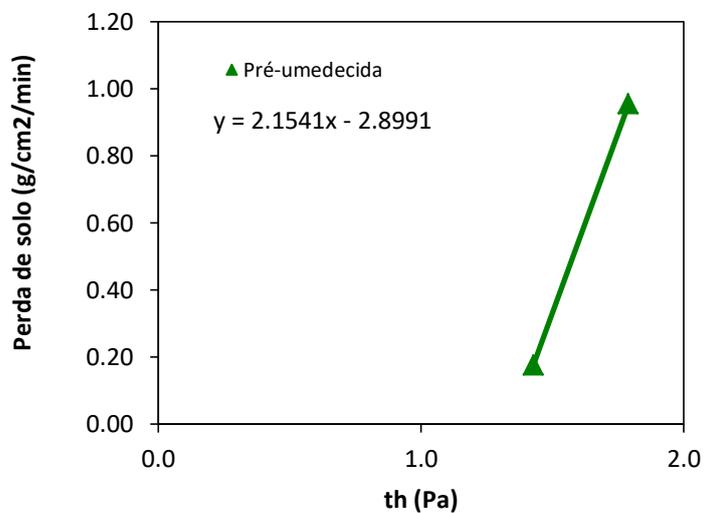
Fonte: Autoria própria.

Figura 45- Resultado do ensaio Inderbitzen para a amostra na condição de umidade seca ao ar.



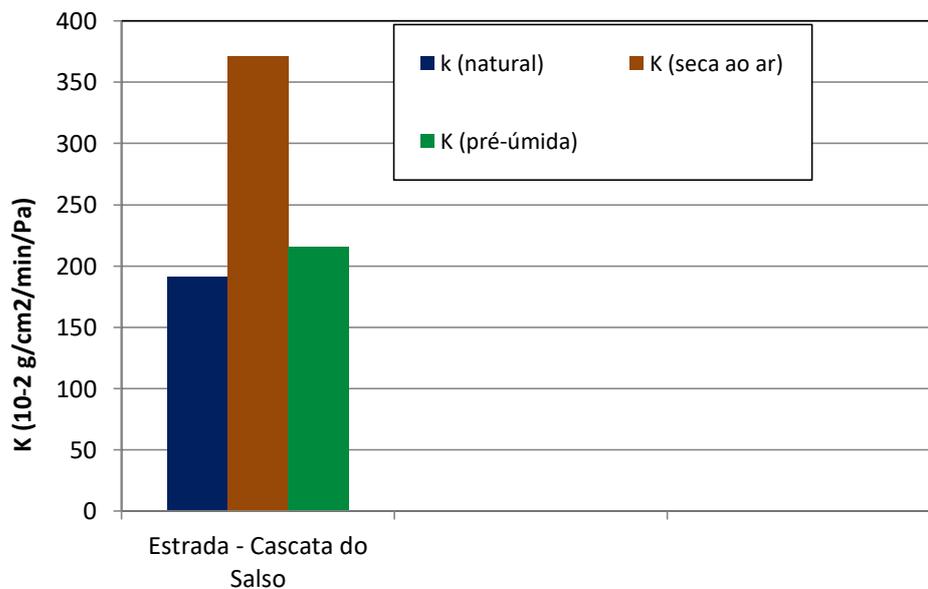
Fonte: Autoria própria.

Figura 46- Resultado do ensaio Inderbitzen para a amostra na condição de umidade pré-umedecida.



Fonte: Autoria própria.

Figura 47- Valores da taxa de erodibilidade (K) obtidos em ensaios de Inderbitzen.



Fonte: Autoria própria.

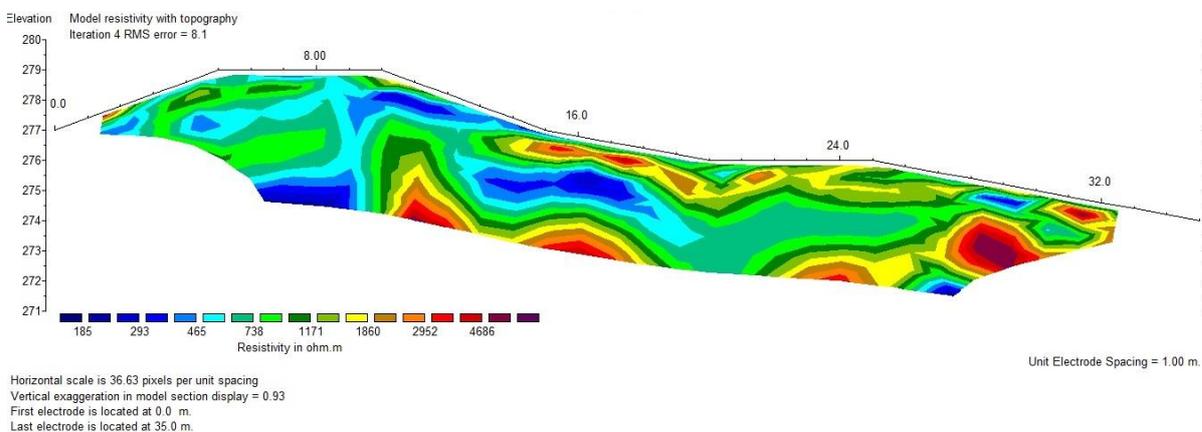
### 6.3 Estudo geofísico eletrorresistividade

Foram realizados cinco caminhamentos, denominados CE1, CE2, CE3, CE4 e CE5, ao longo da estrada de acesso à Cascata do Salso. Produziu-se um perfil de 108 metros posicionados sequencialmente de modo a fornecer uma boa cobertura de toda a área. O arranjo de eletrodos utilizado foi o dipolo-dipolo com espaçamento de 1 m, atingindo uma profundidade em torno de 4 metros. Os dados geofísicos foram processados no software RES2DINV, apresentados sob a forma de seções distância *versus* profundidade, resultando num modelo de inversão em termos de resistividade elétrica (LOKE; BAKER, 1996). Em geral, a baixa resistividade (184 a 600 ohm.m) remete a um solo arenito saturado; entre 600 a 1000 ohm.m refere-se a um saprólito; enquanto que resistividades entre 1000 e 4000 ohm.m são resultado da alteração de uma rocha sã, que, neste caso, pode ser de ocorrência granítica. Por fim, a alta resistividade (4000 a 7000 ohm.m), podendo estar associada aos blocos de granitos que ainda não sofreram processos intempéricos, designa uma rocha granítica.

A linha CE1 está localizada topograficamente acima das demais (cota 277 metros), enquanto que as linhas CE4 e CE5 estão em cotas topográficas menores (entre 267 e 265 metros, respectivamente). Ao longo do CE1, predomina solo saturado a intermediário, e tem-se pouca ocorrência de rocha granítica (Figura 48). No CE2 a rocha granítica e o saprólito encontram-se mais superficialmente, enquanto que o solo saturado se encontra em zonas mais profundas de até 1,70 m (Figura 49). O CE3 apresenta blocos ou matacões em uma zona mais profunda, indo de 0,8 até 4 m; circundando esta rocha temos o saprólito e solo arenito saturado (Figura 50). A linha CE4 refere-se ao ponto mais crítico da estrada de terra, tendo em superfície a ocorrência de um solo saturado, seguido por um saprólito, e a presença de rocha granítica em pequenas porções agrupadas ao longo da direção NE (Figura 51). Por fim, no CE5 (Figura 52), a rocha granítica encontra-se superficialmente e em profundidade ao longo da direção NW, relacionada ao granito presente no CE4. Além disto, esta rocha está zonada por saprólito e, ao longo de NW, a presença de um solo saturado é bastante significativa. Assim, observa-se que a maior parte da estrada que vem sofrendo processo erosivo está relacionada à falta

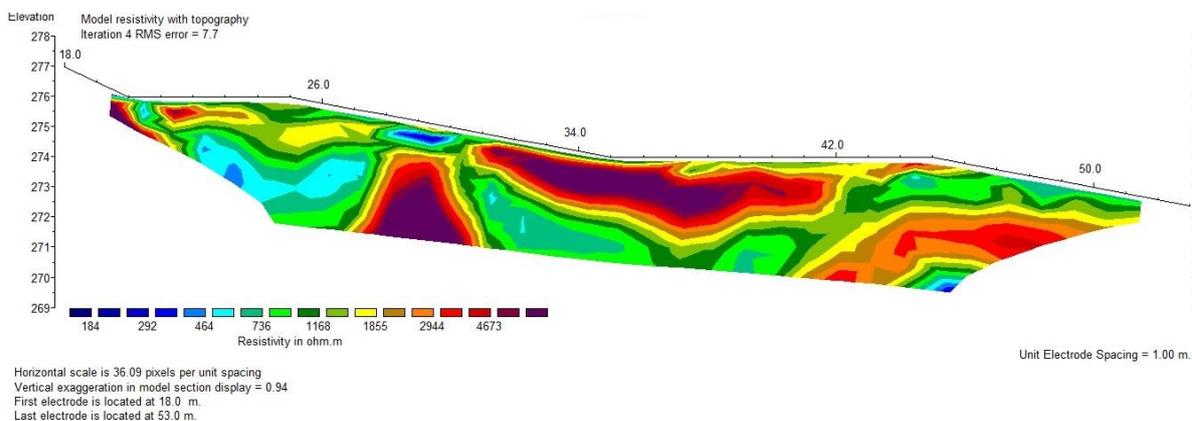
de uma rocha sã, neste caso a rocha granítica, e, nas porções em que há rocha, ela está envolvida por solo saturado ou saprólito.

Figura 48 – Perfil do Caminhamento Elétrico 1 - CE1



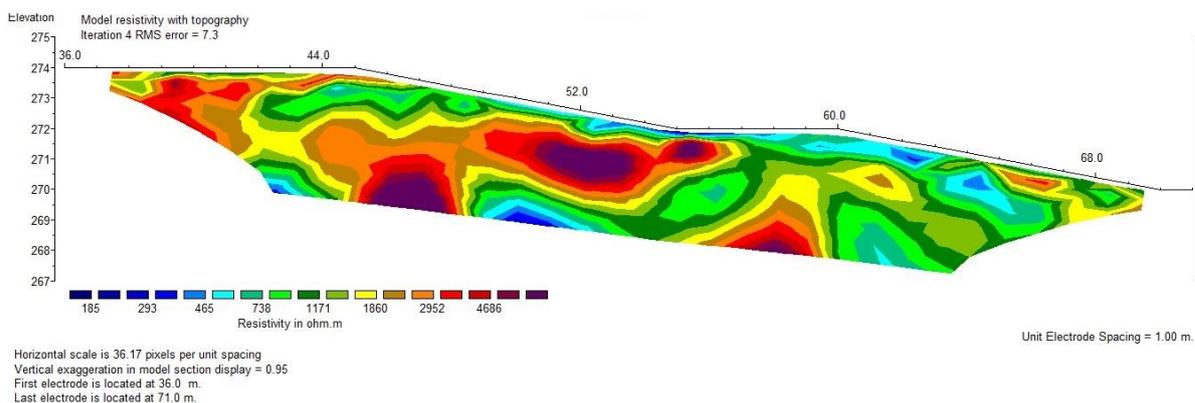
Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Perfil do Caminhamento Elétrico 2 - CE2



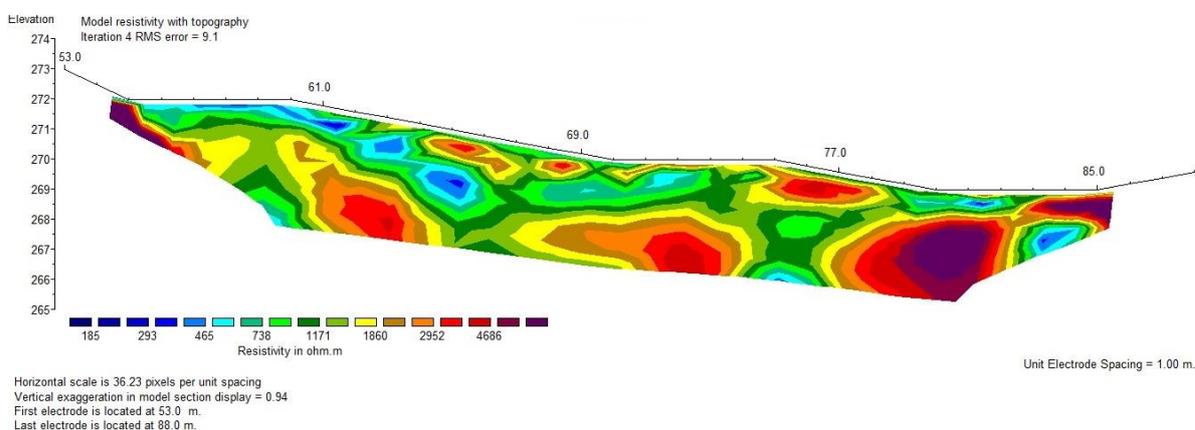
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Perfil do Caminhamento Elétrico 3 - CE3



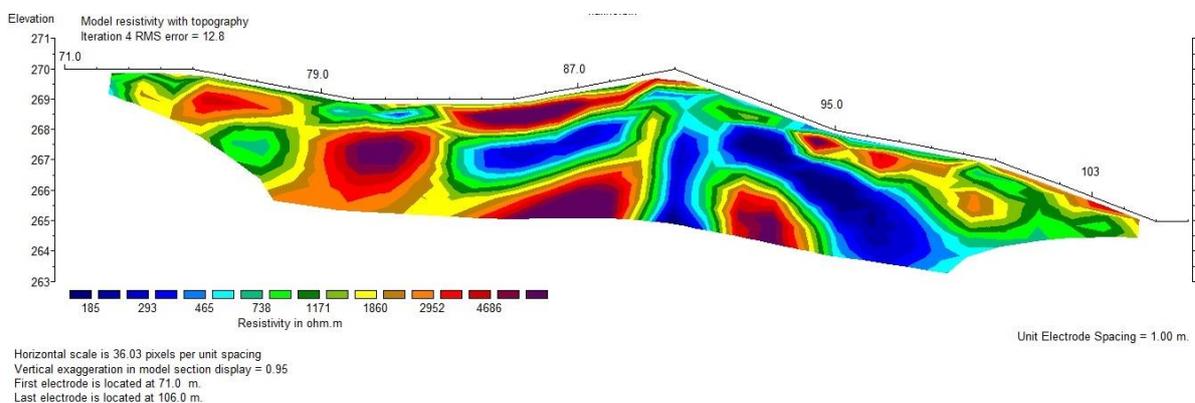
Fonte: Autoria própria.

Figura 51 - Perfil do Caminhamento Elétrico 4 - CE4



Fonte: Autoria própria.

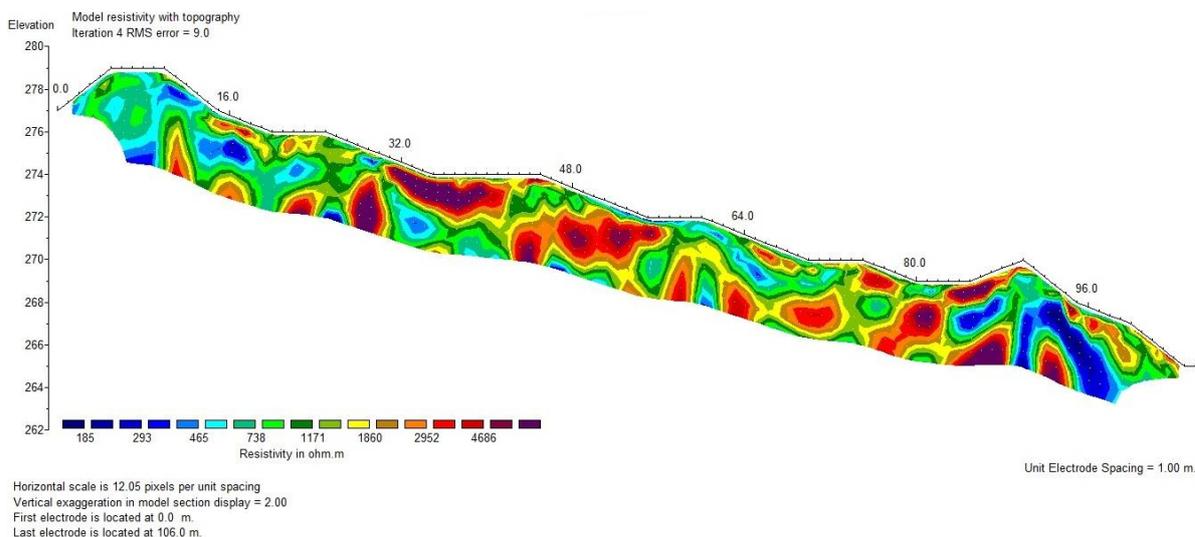
Figura 52– Perfil do Caminhamento Elétrico 5 – CE5



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 53 observa-se a junção dos 5 CE ao longo da estrada, indo de uma cota mais alta para uma mais baixa.

Figura 53 – Perfil do Caminhamento Elétrico – CE



Fonte: Autoria própria.

## 7 CONCLUSÃO

A Estrada de terra que dá acesso a Cascata do Salso, é uma área com evidente fragilidade ambiental, pois a estrada corta as curvas de nível, o que contribui para o processo erosivo, aumentando a velocidade com que a água escoou sobre ela. Além disso, esses fatores associados principalmente à falta de um sistema de drenagem adequada favorecem a aceleração do processo de degradação dos solos, desencadeando o surgimento de diversas feições erosivas ao longo da estrada.

Com base nas feições erosivas analisadas pode-se afirmar que o processo erosivo presente na área estudada é influenciado pelo fluxo superficial concentrado (disposição da estrada em relação às curvas de nível e a falta de sistema de drenagem).

Através dos métodos de avaliação indireta do potencial de desagregação dos solos e dos critérios baseados na Metodologia MCT podemos concluir que:

- No ensaio de desagregação através da análise qualitativa da erodibilidade do solo, verificou-se que tanto a amostra em condição de umidade natural quanto a seca ao ar (no mínimo de 72 horas), desagregaram completamente após as 24

horas de ensaio, sendo que, nas primeiras horas, ambas as amostras perderam uma quantidade significativa de material;

- A razão  $\pi/s$  obtida no critério de erodibilidade MCT, nas três condições de umidade (natural, seca ao ar e pré-umedecida), apresentaram alta erodibilidade. Segundo a proposta de Bastos (1999), os resultados apresentam relação significativa com o parâmetro K. Além disso, esse método é bastante eficiente, pois é o único sistema que classifica solos de clima tropical e retrata de forma real o comportamento dos solos em campo;

- O ensaio de cone de laboratório mostrou que independente da condição de umidade da amostra, o horizonte C, resultou em alta erodibilidade.

A avaliação direta da erodibilidade foi obtida através dos ensaios de Inderbitzen, os quais têm por objetivo quantificar a erodibilidade dos solos, através da taxa de erodibilidade,  $k$ , e a tensão cisalhante hidráulica crítica. Segundo essa avaliação foi possível verificar que:

- O uso da inclinação da rampa tem papel decisivo nas perdas de solos, desta forma, utilizar a declividade da própria estrada, foi de grande relevância para este estudo;

- As amostras sob condição de umidade seca ao ar, apresentaram maior erodibilidade ( $k = 371.17 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ), posteriormente a pré-umedecida ( $k = 215.41 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ ) e por último em condição natural ( $k = 191.1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ );

Segundo a proposta de abordagem geotécnica para solos residuais não saturados de Bastos (1999), fez-se a análise de parâmetros físicos e geomecânicos relacionados com a erodibilidade K do ensaio de Inderbitzen:

- Nas três condições de umidade submetidas, as amostras do horizonte C são classificados como alta erodibilidade ( $k$ ).

Segundo os resultados obtidos na geofísica através do caminhamento elétrico (CE), a falta de rocha são ao longo da estrada, e tendo praticamente em grande maioria um solo saprolito, bastante intemperizado, juntamente com a falta de drenagem, é possível compreender os altos valores encontrados nos outros ensaios para a erodibilidade.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios e também nas análises em campo, conclui-se que a estrada vem sofrendo um processo erosivo bastante intensificado, e a estrada vem sendo sustentada por veios de pegmatito, porém, com

sinais de intemperismo, com isso, não apresentando uma estabilidade. Sendo assim, é de grande importância que medidas sejam feitas para atenuar esse processo, pois devido à fragilidade em que se encontra, a estrada corre grande risco de ser completamente erodida, podendo deixar de existir.

Portanto, pode se concluir que o processo erosivo na estrada da Cascata do Salso foi intensificado devido à intervenção antrópica que alterou o perfil original deste acesso, escavando e rebaixando a mesma até o horizonte C, que apresenta característica de um material saprolito. Além disso, a falta de canaleta de drenagem acelera esse processo. Desta forma, a estrada deveria ter sido projetada com a parte central mais alta, com declividade nas laterais, valetas de drenagem e estrutura de dissipação de energia. Por fim, medidas precisam ser tomadas com urgência, se não para recuperar a estrada, visto que o fator econômico neste caso é extremamente elevado, mas sim, atenuar e controlar esse processo erosivo.

## **8 SUGESTÕES**

Como objetivo deste trabalho, após os resultados apontados, são sugeridas como medida de mitigação para a estrada que dá acesso a Cascata:

- Obra de retaludamento. Segundo DER SP (1991), o retaludamento consiste num processo de terraplanagem, em que se alteram, por cortes ou aterros, o talude originalmente existente. Desta forma, ajuda na estabilização do talude.

- Posteriormente, nas voçorocas é necessária a implantação de estrutura de Paliçada com geotextil, que ajuda a reduzir a velocidade de escoamento da água e retêm parte dos sedimentos por ela transportados, permitindo a estabilização do solo local. Com o tempo, é possível que a vegetação volte a aparecer nessas áreas.

- Não se sugere que simplesmente jogue material de rejeito de mineradora, terraplanando a estrada, pois, mesmo que isso venha a ser feito, é necessário um estudo, para um melhor direcionamento do material a ser utilizado e a forma como este será aplicado.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1968. 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.13p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. Origem: MB- 27

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1968. 6p. Origem: MB-30.

ALCÂNTARA, M. A. T. **Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos**. 1997, 128p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

ALMEIDA, F. F. M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.

APPARAO, A. **Geoelectric Profiling. Geoexploration**. Elsevier Science Publishers B.V. Vol. 27, Amsterdam, p. 351-389, 1991.

ÁVILA, L. O. **Erosão na Microbacia do Arroio Sarandi**: Voçoroca do Buraco Fundo, Santa Maria/RS. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

AYRES, Q. C. **La erosión del suelo y su control**. Barcelon, Omega, 1960.

BARRETO, M. **Planejamento e organização em turismo**. 3. ed. Campinas: Papiros, 1998.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BASTOS, L. et al. **Manual para elaboração de projetos e relatórios de pesquisa, teses, dissertações e monografias**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livrocetes, p. 372, 1985.

BENDER, H. **Erosion: Un probleme de resistance au cisaillement en foction du chemin des contraintes pendant l'infiltration**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE

ON GEOMECHANIS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS. Brasília/DF. Proceedings..., Brasília/DF: ABMS, V.2, p.15-25, 1984.

BIGARELLA, J. J. et al **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Florianópolis – UFSC – volume 3. 2003.

BITENCOURT, M. F. A. S. Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS - Geologia e relações com o corpo granítico. In: **I Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia**. Porto Alegre, 1983.

BITENCOURT, M. F.; PHILIPP, R. P.; DILLENBURG, S.; LISBOA, N. A ; PORCHER, C. C. ; SOMMER, C.A.. **Mapa Geológico 1:25.000 das Folhas Caçapava do Sul, Passo do Salsinho, Durasnal e Arroio Santa Bárbara, RS**. Porto Alegre, 1998. Escala 1:25.000.

BORBA, A. W.; VIGNOL LELARGE, M. L. M.; MIZUSAKI, A. M. P. Uplift and denudation of the Caçapava do Sul granitoids (southern Brazil) during Late Paleozoic and Mesozoic: constraints from apatite fission-track data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 15, n. 2, p. 683–692, 2002.

BORBA, A.W. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozóico e Paleozóico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 110, 2006.

BORBA, A.W., Mizusaki, A.M.P., Santos, J.O.S., McNaughton, N.J. & Hartmann, L.A. **U-Pb zircon and  $40\text{Ar}$ - $39\text{Ar}$  K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil**. Basin Research, 20: p. 359-375, 2008.

BORBA, A.W., SOUZA, L.F., Porto, P.R. & PETRY, A.C. 2011. A paisagem da Serra do Segredo (Caçapava do Sul, RS) como patrimônio geológico brasileiro: características, riscos à integridade e estratégias de conservação. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOLÓGICO**, 1, Rio de Janeiro, Atas..., p. 9.

BORBA, A.W. et al. **Inventário e avaliação quantitativa de geossítios: exemplo de aplicação ao patrimônio geológico do município de Caçapava do Sul (RS, Brasil)**. Pesquisas em Geociências, v. 40 (3), p.275-294, 2013.

BRAGA, A. C. O. **Métodos Geométricos Aplicados. Apostila do Curso de Geologia**. Rio Claro SP: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 1999.

BRAUN, W.A.G. **Contribuição ao estudo da erosão no Brasil e seu controle**. Revista Brasileira de Geografia. nº4. p. 501 – 642, 1961.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. Processos erosivos. 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. 39-91, 2006.

CAROLINO de SÁ, M. A. **Erosão do solo: mecanismos e controle**. Disponível <<http://www.fazendasmt.com.br/artigos/imprimir.php?id=14>> Acesso em 04 de abril de 2018.

CARVALHO, L.D.V. **Avaliação da viabilidade da melhoria do projeto geométrico e da conservação das estradas de terra**. 85f. Dissertação (Mestrado) – Escola de engenharia de São Carlos, USP – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1992

CASAGRANDE, L. **Avaliação parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de Williams (1975) na Bacia do Rio Vacacaí - Mirim com o auxílio de técnicas de Geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

CASSETI, V. 2005. **Geomorfologia**. [S.l.] Disponível: <[www.funape.org.br/geomorfologia](http://www.funape.org.br/geomorfologia)>. Acesso em 18 de abril de 2018.

COSTA, A.F.U., SHUKOWSKY, W., FERNANDES, L.A.D., NARDI, L.V.S. & BITENCOURT, M.F.A.S. 1995. Modelamento gravimétrico 3D do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA,3**, Resumos Expandidos..., Rio de Janeiro, RJ, pp. 753-758.

CHEMALE Jr., F. 2000. **Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense**. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.) Geologia do Rio Grande do Sul, Edições CIGO/UFRGS, pp. 13-52.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2009. **Mapa geodiversidade do Rio Grande do Sul**. SGM/TM, CPRM, Brasília.

CRUZ, V. da. **Estradas vicinais: abordagem pedológica, geotécnica, geométrica e de serventia de dois trechos rodoviários não pavimentados no campus da UFV – MG**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2005.

CUNHA, C. M. L. **Quantificação e mapeamento das perdas de solo por erosão com base na malha fundiária**. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 1997.

DAL CONTE, Francisco Manoel. **Índice de Erodibilidade de um solo Podzólico Vermelho Amarelo, determinado sob condições de chuva simulada**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, 1982.

DENER T. M, et al. Avaliação de técnicas de monitoramento de processos erosivos acelerados em área peri-urbana – São Paulo. **VI Seminário Latino Americano de Geografia Física II Seminário Ibero Americano de Geografia Física**. Universidade de Coimbra, 2010.

DER/SP. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **Manual de Geotecnia – Taludes de Rodovias – Orientação para Diagnóstico e Soluções de seus Problemas**. São Paulo, 1991

DEMARCHI, L. C. Adequação de estradas rurais. **Manual Técnico**. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, p.64, 2003.

ELIS, V. R. **Geofísica aplicada ao estudo de poluição dos solos e águas subterrâneas. Aplicação de métodos geofísicos na caracterização de áreas poluídas**, IAG - Instituto de Astronomia e Geofísica da USP, Curso de Verão, São Paulo, 2002.

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. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA SPI, 2017.

ENRIQUEZ, A. G. **Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de uma estrada não pavimentada situada em um Latossolo Vermelho-Amarelo**. 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

ENRIQUEZ, A. G. et. al. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem de estrada rural não pavimentada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.19, n.2, p.160–165, 2015.

FACIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. 107f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1991.

FACO, R. A.; NEIMAM, Z. A natureza do Ecoturismo: conceitos e segmentação. São Paulo: Manole, 2010. In: NEIMAM, Z.; RABINOVICI, A. (Org.). **Turismo e Meio Ambiente no Brasil**. São Paulo: Manole, (p. 43-62), 2010.

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

FERNANDES, J.A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentin, RS**. 2011. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

FERNANDES, L. P. **Avaliação da erodibilidade de um perfil de solo típico da área do campo de instrução de Santa Maria – RS**. 2015. Dissertação Mestrado. Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

FERREIRA, A. B. H.; 1984. **Novo Dicionário Aurélio**. Editora Nova Fronteira. São Paulo, SP. p.1516.

FRAGASSI, P.F.M. **Estudo da erodibilidade dos solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

GALLAS JDF. **Principais Métodos Geométricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

GALETI, P.A. **Práticas de controle à erosão**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985.

GANDOLFO, O. C. B. **Um estudo do imageamento geométrico na investigação rasa**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação no Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2007.

GRIEBELER, N.P.; PRUSKI, R.R.; SILVA, J.M.A. **Controle da erosão em estradas não pavimentadas**. In: Fernando Falco Pruski. (Org.). Conservação do solo e água: práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, cap 7, p.166-215, 2009.

GUERRA, A.J.T. Encostas e a questão ambiental. In: CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. (Org.). **A questão ambiental-diferentes abordagens**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 191-218, 2003.

GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

GUERRA, A.J.T.; VITTE, A.C. (Org.). **Reflexões sobre a geografia física do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

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

HARTMANN, L.A., PORCHER, C.C. & REMUS, M.V.D. **Evolução das rochas metamórficas do Rio Grande do Sul**. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.) Geologia do Rio Grande do Sul, Edições CIGO/UFRGS, p. 79-118, 2000.

INDERBITZEN, A.L. An erosion tests for soils. **Material reseach and standarts**, Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, July.1961.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 131-152, 1998.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Orientações para o combate à erosão no estado de São Paulo, Bacia do Peixe - Paranapanema. São Paulo: IPT, Relatório 24 739, 1986.

IPT. **Manual de ocupação de encostas**. CUNHA, M. A. (Coord). São Paulo: IPT, n. 1831,p. 216, 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.

JANIKIAN, L., PAES DE ALMEIDA, R., FRAGOSO-CESAR, A.R.S., MARTINS, V.T.S., DANTAS, E.L., TOHVER, E., MCREATH, I. & D'AGRELLA-FILHO, M.S. 2012. **Ages (U–Pb SHRIMP and LA ICPMS) and stratigraphic evolution of the Neoproterozoic volcano-sedimentary successions from the extensional Camaquã Basin**, Southern Brazil. *Gondwana Research*, 21 (2- 3): 466-482.

JUSTUS, J.O., MACHADO, M.L.A. & FRANCO, M.S.M. 1986. **Geomorfologia**. In: Levantamento de Recursos Naturais, v. 33, Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 e SI.22. Rio de Janeiro, SEPLAN - IBGE, pp. 313-404.

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

LEITE, J.A.D., MCNAUGHTON, N.J., HARTMANN, L.A., CHEMALE JR., F. & REMUS, M.V.D.. SHRIMP U/Pb zircon dating applied to the determination of tectonic events: the example of the Caçapava do Sul Batholith, Pedreira Inducal, Caçapava do Sul, Brazil. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS**, 5, Anais..., Gramado, RS, pp. 389- 390, 1995.

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.

MAGALHÃES, R.A. Erosão: Definições, Tipos e Formas de Controle. **VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão Goiânia (GO)**, Goiânia- Pag.1- 7, 2001.

MAINE (Estado). Maine Department of Environmental Protection Bureau of Land and Water Quality). **GRAVEL ROAD MAINTENANCE MANUAL: A Guide for Landowners on Camp and Other Gravel Roads**, 2010. Disponível em: <[http://www.maineroads.org/Resources/Documents/gravel\\_road\\_manual.pdf](http://www.maineroads.org/Resources/Documents/gravel_road_manual.pdf)>. Acesso em: 07 abril. 2018.

MARASCHIN, A.J., MIZUSAKI, A.M.P., ZWINGMANN, H., BORBA, A.W. & SBRISSA, G.F. **Illite authigenesis in sandstones of the Guaritas Allogroup (Early Paleozoic): implications for depositional age, stratigraphy and evolution of the Camaquã Basin (Southern Brazil)**. *Journal of South American Pesquisas em Geociências*, p. 275-294, and *Earth Sciences*, p. 400-411, 2013.

MARIOTONI, M. **Rodovias vicinais: Conceituação e Importância**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica – Universidade de São Paulo- São Paulo, 1987.

MELLO, V. F. B; TEIXEIRA, A. H. **Mecânica de solos**. São Carlos: Escola de Engenharia, 1967.

MEIRELES, J.M.F. Erosão de taludes de estradas. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE ENGENHARIA CIVIL, 2., 1976, Rio de Janeiro/RJ – São Paulo – SP. Anais. Rio de Janeiro/RJ- São Paulo, 1967.p.204-211.

MORENO, J.A. **Clima do Rio grande do Sul - Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://revistas.fee.tche.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/3236>>. Acesso em: 19 de março de 2018.

MOTA, F.S.; GOEDERT, C.O.; LOPES, N.F.; GARCEZ, J.R.B.; GOMES, A. S. **Zoneamento da região do planalto gaúcho para a cultura do trigo**. Pelotas: IPEAS, 1968.

NARDI, L.V.S.; BITENCOURT, M. F. A. S. Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 19, p. 153–169, 1989.

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.

NUNES, T. V. L. **Método de previsão de defeitos em estradas vicinais de terra com base no uso das redes neurais artificiais: trecho de Aquiraz – CE**. Dissertação Mestrado. Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

OLIVA, A **Estudo hidrofaciológico do aquífero Rio Claro no município de Rio Claro – SP**”, Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp- Rio Claro, p.196, 2006.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 587, 1998

PAIM, P.S.G., CHEMALE Jr., F. & LOPES, R.C.. A Bacia do Camaquã. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.) **Geologia do Rio Grande do Sul**, Edições CIGO/UFRGS, pp. 231-274, 2000.

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

PITTELKOW, G.C **Erosão em estrada de terra no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. Dissertação Mestrado. Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2013.

REGO, J.J.V **Erosão superficial em taludes de corte em solo residual de gnaiss**. Dissertação de Mestrado em Ciências, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, p. 125, 1978.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; TOPP, G. C. **A Reexamination of the Constant head well Permeameter Method for Measuring Saturated Hydraulic Conductivity Above the Water** Soil Science, nº 4, Vol. 136, p. 250, 1983.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Em Solos em Pedologia; Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A., eds.; **Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**: São Paulo, 1998.

SANTOS, A. R., PASTORE E. L. JUNIOR F. A. CUNHA, M. A. IPT **Estradas Vicinais de Terra. Manual Técnico para Conservação e Recuperação**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. 2ª edição, São Paulo, 1988.

SANTOS, A. R., PASTORE E. L. JUNIOR F. A. CUNHA, M. A. IPT Estradas Vicinais de Terra. **Manual Técnico para Conservação e Recuperação**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. 2ª edição, São Paulo, 1988.

SANTOS, Maurício Moreira dos. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área selecionada na cidade de Londrina (PR)**, 2005.

SARTORI, P. L. P.; KAWASHITA, K. Petrologia e Geocronologia do Batólito Granítico de Caçapava do Sul, RS. In: II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 1985, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis, 1985, p. 102–107.

SILVA, M.L.N. et al. Avaliação de métodos indiretos e determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.6, p.1207-1220, 2000.

SILVA, D.R.A., MIZUSAKI, A.M.P., ANJOS, S.M.C., KOESTER, E. & BORBA, A.W. Provenance of fine-grained sedimentary rocks derived from Rb-Sr and Sm-Nd analyses: the example of the Santa Maria Formation (Triassic, Paraná Basin, Southern Brazil). **Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis**, 13(2): p. 135-149, 2006.

SUERTEGARAY, D.M.A. & SILVA, L.A.P. Tchê Pampa: histórias da natureza gaúcha. In: Pillar, V.P., Müller, S.C., Castilhos, Z.M.S. & Jacques, A.V.A. (Eds.) **Campos Sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. MMA, Brasília, DF, Cap. 3, p. 42-59, 2009.

SUGUIO, KENTIRO. **Geologia Sedimentar**. São Paulo. Edgard Blücher, 1980. p.498, 1980.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: Emater/RS, p. 222, 2008.

TEIXEIRA, P. C., MISRA, R. K. Erosion and sediment characteristics of cultivated forest soils as affected by the mechanical stability of aggregates. **Catena**. v.30, p. 199-134, 1997.

TOMASI, L.F **ENSAIO DE INDERBITZEN PARA AVALIAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS E ROCHAS: APLICAÇÃO NAS REGIÕES DE**

**SANTA MARIA, SÃO FRANCISCO DE ASSIS E PORTO ALEGRE/RS.** Conclusão de curso. Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

TATOO, J. **Análise dos Parâmetros geológico-geotécnicos que condicionam erosão por voçoroca no município de São Francisco de Assis – RS.** Trabalho de Conclusão de Curso. Santa Maria, RS, Brasil. 2007.

TOY, J.J Acelerated erosion: process, problems and prognosis. **Geology**, p. 524-529, 1982.

VILLELA, S.M; MATOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo: Mcgraw – Hill do Brasil, 1975.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington, DC: USDA, (Agriculture handbook, 537), 1978.