

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HENRI ALVES ISHIBA

**PROCESSOS EROSIVOS: ESTUDO DE CASO NA ESTRADA DA AVIAÇÃO NO
MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL – RS**

**CAÇAPAVA DO SUL
2024**

HENRI ALVES ISHIBA

**PROCESSOS EROSIVOS: ESTUDO DE CASO NA ESTRADA DA AVIAÇÃO NO
MUNICÍPIO DE 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. Dr. José Pedro Rebes
Lima

**CAÇAPAVA DO SUL
2024**

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).

I79p Ishiba, Henri Alves
PROCESSOS EROSIVOS: ESTUDO DE CASO NA ESTRADA DA AVIAÇÃO NO MUNICÍPIO DE CAÇAPAVA DO SUL - RS / Henri Alves Ishiba.
106 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2024.
"Orientação: José Pedro Rebes Lima".

1. Geotecnia. 2. Erosão. 3. Voçoroca. I. Título.

HENRI ALVES ISHIBA

PROCESSOS EROSIVOS: ESTUDO DE CASO NA ESTRADA DA AVIAÇÃO NO MUNICÍPIO DE 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.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 19 de julho de 2024.

Banca examinadora:

Professor Dr. José Pedro Rebés Lima
Orientador
Universidade Federal do Pampa

Professor Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen
Universidade Federal do Pampa

Professora Dr. José Waldomiro Jimenez Rojas
Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **JOSE WALDOMIRO JIMENEZ ROJAS, Diretor(a) Campus Caçapava do Sul**, em 19/07/2024, às 15:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JOSE PEDRO REBES LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2024, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCO ANTONIO FONTOURA HANSEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2024, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1497037** e o código CRC **DCFD1361**.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus pela vida que me tem dado e, por mais esta chance de poder realizar mais um sonho oferecido pela Universidade Federal do Pampa.

Os meus agradecimentos em especial aos professores: Marco Antonio Fontoura Hansen, José Rojas, Luiz Delfino, José Pedro Rebes e entre outros que tiveram grandes importância na minha formação Acadêmica. Também quero deixar as minhas mais sinceras gratidões aos meus pais que já não se fazem presentes, mas, que suas crenças passadas ficaram sedimentadas na minha vida e que tenho o dever e a honra de passá-las adiante. Um agradecimento em especial a minha esposa, irmãos e amigos que tiveram presente ao longo de toda esta jornada, obrigado!

Haviam-me dado ocasião de imaginar que todas as coisas possíveis de cair sob o conhecimento dos homens seguem-se umas às outras da mesma maneira e que, contanto que nos abstenhamos somente de aceitar por verdadeira qualquer que não o seja, e que guardemos sempre a ordem necessária para deduzi-las umas das outras, não pode haver qualquer tão afastadas a que não se chegue por fim, nem tão ocultas que não se deslumbram.

René Descartes

RESUMO

Esta pesquisa apresenta uma análise dos processos erosivos ocorrentes na Estrada da Aviação, localizada no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. O objetivo principal deste estudo é identificar e analisar os processos erosivos na Estrada da Aviação, determinando as causas e os impactos ambientais associados. Para isso, foram estabelecidos objetivos específicos: caracterizar as propriedades físicas e químicas do solo da área estudada, avaliar o impacto das condições climáticas e do relevo sobre a erosão, identificar os principais agentes e mecanismos de erosão atuantes e propor medidas de mitigação e controle da erosão para a área de estudo. A metodologia inclui a coleta de amostras de solo, análise laboratorial e a observação in situ. Os resultados obtidos indicam que a combinação de fatores como a composição do solo, inclinação do terreno e eventos climáticos extremos contribuem significativamente para os processos erosivos na área estudada. As análises laboratoriais mostraram que o solo da região é predominantemente arenoso, com baixa coesão, o que facilita a erosão.

Palavras-Chave: Geotecnia; Erosão e Voçoroca.

ABSTRACT

This research presents an analysis of the erosive processes occurring on Estrada da Aviação, located in the municipality of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. The main objective of this study is to identify and analyze the erosive processes on Estrada da Aviação, determining the causes and associated environmental impacts. To achieve this, specific objectives were established: to characterize the physical and chemical properties of the soil in the studied area, to assess the impact of climatic conditions and topography on erosion, to identify the main agents and mechanisms of erosion in action, and to propose mitigation and erosion control measures for the study area. The methodology includes soil sampling, laboratory analysis, and in situ observation. The obtained results indicate that the combination of factors such as soil composition, terrain slope, and extreme climatic events significantly contribute to the erosive processes in the studied area. Laboratory analyses showed that the soil in the region is predominantly sandy, with low cohesion, which facilitates erosion.

Keywords: Geotechnics; Erosion and Gullies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bloco de gnaisses sobre ação da água e do gelo.....	24
Figura 2 - Processos de intemperismo de maciço rochoso, processos físicos (por fragmentação mecânica) ou por processos químico (por dissolução e alteração química).....	25
Figura 3 - Analogia com coador de café; A água ao ser derramada no coador (com rocha fisicamente fragmentada no papel de café moído), dissolve o que é mais solúvel, deixando um resíduo (borra de café/saprólito) constituído de novos minerais com a caulinita e minerais primários mais resistentes (quartzo, magnetita).	26
Figura 4 - Algumas das reações comuns do intemperismo químico sob condições de clima quente e úmido: (a) dissolução da calcita formando íons de bicarbonato e de cálcio; (b) hidrólise de feldspato potássico (ortoclásio) formando a caulinita e liberando íons de potássio e ácido silícico [Si (OH) ₄].	27
Figura 5 - Esquema de alteração do mineral piroxênio, rico em oxigênio, ferro, sílica e cálcio. Com a hidrólise, seus cátions são liberados. O ferro ferroso (Fe ²⁺) é oxidado para formar o mineral secundário goethita enquanto a sílica e a alumina se recombina para formar o argilomineral caulinita.....	28
Figura 6 - Ilustração da hidrólise do feldspato potássico formando argila caulinita, sílica e sais que são lixiviados em direção aos rios e mares.	29
Figura 7 - Agentes biológico, ação por diversos organismos vivos contribuem para a quebra e alteração das estruturas rochosas e do solo.....	30
Figura 8 - Representação visual das cores organizadas por matiz, valor e croma, facilitando a identificação e a comunicação precisa das cores em diversas áreas ...	31
Figura 9 - Triângulo textural para classificação do solo.	34
Figura 10 - Exemplos de tipos de estruturas do solo.	36
Figura 11- Nomenclatura sistêmica para classificação dos solos.	38
Figura 12 - Processos interligados de degradação, erosão, transporte e sedimentação, que são fundamentais para a formação e modificação das paisagens terrestres.	41
Figura 13 - Espiral descendente da degradação do solo é resultado das interações negativas solo/vegetação.....	42
Figura 14 - Processos de erosão hídrica, ação dos impactos das gotículas da chuva causando o desprendimento do solo, transporte e a deposição.	43

Figura 15 - Esquema mostrando mecanismos de escoamento pluvial por infiltração de excesso de escoamento superficial.....	44
Figura 16 - Esquema dos mecanismos de escoamento pluvial por excesso de saturação de escoamento superficial (A) e escoamento tubular (B).	47
Figura 17 - Mapa de localização da área de pesquisa	49
Figura 18 - Malha Rodoviária (Federal, Estadual e Municipal) do município de Caçapava do Sul.	51
Figura 19 - Limites entre municípios de Caçapava do Sul.	52
Figura 20 - Mapa de distribuição dos solos do município de Caçapava do Sul.....	53
Figura 21 - Mapa de distribuição de uso e ocupação do solo do município de Caçapava do Sul.	54
Figura 22 - Rede de Drenagem do município de Caçapava do Sul.	55
Figura 23 - Mapa do relevo município de Caçapava do Sul.....	56
Figura 24 - O mapa apresenta as formações geológicas, a feição hachurada corresponde à Suite Granítica Caçapava do Sul.....	59
Figura 25 – Nesta imagem, evidenciamos um ponto crítico onde a erosão intensa revela as camadas mais profundas do solo.	61
Figura 26 – Evolução da erosão sobre talude no Passo do Moinho, Caçapava do Sul.....	62
Figura 27 - Veio de pegmatito granítico	62
Figura 28 - Perfil de solo com diferentes horizontes em exposição.	63
Figura 29 - Processo de erosão em ravina, evidências de fluxo hidráulico tipo “pipe”.	65
Figura 30 - Erosão tipo “pipe” sobre soleira de pegmatito.....	66
Figura 31 - ficha de descrição de dados e de coleta amostral em campo.....	67
Figura 32 - Coleta de amostras de solo para ensaios Geotécnicos.	68
Figura 33 - A esquerda conjunto de peneira para análise granulométrica, a direita material retido após o peneiramento.	70
Figura 34 - Proveta de vidro capacidade 1000 ml para sedimentação.....	71
Figura 35 - A esquerda preparação da amostra para os ensaios de massa específica real dos grãos (MER), a direita execução do ensaio de massa específica real dos..	74
Figura 36 - Aparelho de ensaio para determinação do limite de liquidez pelo método Casa Grande	75
Figura 37 - Resultado do ensaio para limite de plasticidade	76

Figura 38 - Recipiente preenchido com material para o, ensaio de índice de vazios mínimo e máximo	79
Figura 39 - Pesagem de conjunto solo mais cilindro para determinação do índice de vazios mínimo.	79
Figura 40 - Cilindro para ensaio Proctor Normal.	81
Figura 41 - Execução ensaio CBR, mostra amostras de solo submersas em um tanque de água, com dial gauges instalados para medir a penetração durante o teste.	82
Figura 42 - Prensa de ensaio CBR.....	83
Figura 43 - Permeômetro de carga variável, para execução de ensaio de permeabilidade do solo.	85
Figura 44 – Resultados para o ensaio de granulometria	87
Figura 45 – Classificação do solo pelo método do triangulo textural determinado pelos dados da (tabela 4).	88
Figura 46 - Curva de Compactação – determinando a densidade máxima pelo teor de umidade.....	90
Figura 47 - Curva de ensaio do Índice de Suporte California	91
Figura 48 – Característica topográfica da área de trabalho	93
Figura 49 – Perfil de elevação da área de trabalho, cobrindo uma extensão de aproximadamente 600 metros e uma elevação que varia da cota de 270 – 340 metros acima do nível do mar.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho de partículas minerais que compõem a estrutura do solo pela classificação da (EMBRAPA).....	34
Tabela 2 - Classes de estrutura	36
Tabela 3 - Teor de umidade natural	86
Tabela 4 – Resultados para massa específica real dos grãos e classificação granulométrica.....	86
Tabela 5 - Resultados para os ensaios de Consistência ou de Limites de Atterberg.	88
Tabela 6 – Resultados para índice de vazios máximo e mínimo e determinação da densidade mínima e máxima do solo.	89
Tabela 7 – Resultados para os ensaios de Compactação e CBR.....	90
Tabela 8 - Resultados para permeabilidade à carga variável.....	91
Tabela 9 – Resultados de dados para análise granulométrica.....	102
Tabela 10 - Ensaio para limites de Consistência Atterberg.....	103
Tabela 11 – Dados dos ensaios para índice de vazios	104
Tabela 12 – Dados de compactação.....	104
Tabela 13 – Dados de permeabilidade à carga variável	105

LISTA DE ABREVIATURAS

°C – Graus Celsius

cm – Centímetro

ρ_s – Densidade Seca

Ø – Diâmetro

E – Leste

$e_{Max.}$ – Índice de Vazios Máximos

$e_{Min.}$ - Índice de Vazios Mínimos

g – Gramas

IP – Índice de Plasticidade

K – Coeficiente

Kg – Quilogramas

km - Quilômetro

kN – KiloNewton

LC – Limite de Contração

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

mm - Milímetro

N – Norte

NP – Não Plastico

Nº - Número

% - Porcentagem

R – Red

S – Sul

W – Oeste

W_{opt} - Umidade Optima

Y – Yellow

YR – Yellow – Red

LISTA DE SIGLAS

ASTM - **A**merican **S**ociety for **T**esting and **M**aterials
CBR – Califórnia Bearing Ratio
CNT - Confederação Nacional do Transporte
CNEPA - Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas
CNPS - Centro Nacional de Pesquisa em Solos
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISC – Índice de Suporte Califórnia
MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
NBR – Normas Brasileiras
PCD - Plataforma de Coleta de Dados
RADAM-BRASIL - Projeto Radar da Amazônia
SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SNLCS - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos
UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
WRB - World Reference Base

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	19
2.0 OBJETIVOS.....	20
2.1 Objetivo geral	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
2.3 Justificativa.....	20
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1 Solo.....	22
3.1.1 Conceitos de solo	23
3.1.2 Origens do solo	23
3.1.3 Intemperismo.....	23
3.1.3.1 Intemperismo físico (ou mecânico)	24
3.1.3.2 Intemperismo químico	25
3.1.4 Agente biológico	29
3.1.5 Propriedades dos solos.....	30
3.1.6 Características morfológicas dos solos.....	31
3.1.7 Classificação dos solos.....	37
3.2 Característica Geomorfológica	39
3.3 Clima.....	40
3.4 Hidrologia e processos erosivos	40
3.4.1 Erosão hídrica	42
3.4.2 Processos erosivos causadas pelo escoamento superficial	44
3.4.3 Erosão laminar ou erosão em lençol.....	44
3.4.4 Processos erosivos na formação e desenvolvimento de ravinas	45
3.4.5 Erosão processos em estágio de voçorocas – boçoroca.....	47
3.4.6 Processos erosivos causadas pelo escoamento subsuperficial.....	48
4.0 ÁREA DE ESTUDO	49
4.1 Rodovias de acesso ao município de Caçapava do Sul.	50
4.2 Limites territorial entre municípios	51
4.3 Tipos de solos do município de Caçapava do Sul	52
4.4 Cultura do uso e ocupação do solo.....	53
4.5 Rede hidrográfica do município de Caçapava do Sul.....	54
4.6 Geomorfologia do município de Caçapava do Sul.....	55

4.6.1	Depressão central gaúcha (Norte)	56
4.6.2	Planalto de Caçapava do Sul (Centro-Oeste)	57
4.6.3	Planalto rebaixado de Canguçu (Leste)	57
4.7	Geologia local	57
4.7.1	Suíte Intrusiva Caçapava do Sul (NP3Yca)	57
5.0	MATERIAIS E MÉTODOS	59
5.1	Etapa de campo	60
5.2	Levantamento aerofotográfico	60
5.3	Observação e descrição de campo	60
5.4	Coletas de amostra de solo para análise geotécnico	66
5.5	Etapa de gabinete	68
5.6	Etapa de laboratório	69
5.6.1	Ensaio simples	69
5.6.2	Análise granulométrica	69
5.6.3	Método de Ensaio Granulométrica	70
5.6.4	Umidade higroscópica	72
5.6.5	Determinação da massa específica dos grãos	72
5.6.6	Teor de umidade natural	74
5.6.7	Limites de Atterberg	74
5.6.8	Utilização dos Limites de Atterberg na avaliação de riscos	76
5.6.9	Índice de Vazios	77
5.6.10	Importância do Índice de Vazios no Solo	78
5.6.11	Compactação e ou CBR (Californian Bearing Ratio)	80
5.6.12	Ensaio de permeabilidade à carga variável	84
6.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
6.1	Teor de umidade natural	85
6.2	Massa específica real dos grãos e classificação granulométrica	86
6.3	Limites de Atterberg	88
6.4	Índice de vazios	89
6.5	Análise dos Resultados de Compactação e CBR	89
6.6	Permeabilidade à carga variável	91
6.7	Caracterização topográfica	92
6.7.1	Curvas de nível	92
6.7.2	Perfil de elevação	94

7.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
REFERÊNCIAS.....	98
ANEXOS.....	102
ANEXO A.....	102
ANEXO B.....	103
ANEXO C.....	104
ANEXO D.....	104
ANEXO E.....	105

1.0 INTRODUÇÃO

A história da evolução humana revela que, desde a sua origem o homem viveu em sociedade. Ideais fundamentados na segurança, necessidades biológicas, a vida em grupo passou a ser regra entre os indivíduos. Neste contexto a evolução do Homem caminhou por grandes mudanças, dentro das divisões pré-histórica às grandes revoluções industriais dos últimos séculos, carregando em seu DNA costumes e culturas entre diversas civilizações.

Nas últimas cinco décadas, as transformações que ocorreram entre o meio rural e urbano vêm refletindo na atualidade, abordando discussões na classificação territorial, novos costumes e padrões.

Segundo os dados da CNT (Confederação Nacional do Transporte) de 2021, somente 12,4% da malha rodoviária brasileira são pavimentadas, 78,5% são de rodovias não-pavimentadas e 9,1% são rodovias planejadas, subdivididas entre jurisdição Federal, Estadual e Municipal. As rodovias não-pavimentadas ou rodovias vicinais, são rodovias cuja superfície de rolamento é constituída das muitas vezes por materiais do próprio leito natural da via, por vezes, materiais específicos outros, para melhorar o desempenho da rodovia. Essas rodovias geralmente têm a função de interligar localidades vizinhas e aos grandes centros urbanos.

De maneira geral, este tipo de rodovia quando construídas de maneira inadequadas estão mais suscetíveis às erosões, e, sem monitoramento e manutenção adequada, a evolução desses processos combinados a outros fatores se torna difícil e oneroso sua recuperação.

2.0 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Identificar e analisar os processos erosivos na Estrada da Aviação, determinando as causas e os impactos ambientais associados.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar as propriedades físicas e químicas do solo da área estudada.
- ✓ Avaliar o impacto das condições climáticas e do relevo sobre a erosão.
- ✓ Identificar os principais agentes e mecanismos de erosão atuantes.
- ✓ Propor medidas de mitigação e controle da erosão para a área de estudo.

2.3 Justificativa

A escolha do tema sobre os processos erosivos na Estrada da Aviação, localizada no município de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, justifica-se pela necessidade urgente de compreender e mitigar os impactos ambientais causados pela erosão em rodovias não-pavimentadas. Esta via, como muitas outras no Brasil, é fundamental para a conexão de localidades vizinhas aos grandes centros urbanos, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico regional.

A degradação dessas rodovias devido à erosão não apenas compromete a infraestrutura viária, mas também acarreta sérios danos ao meio ambiente, como a perda de solo fértil, a sedimentação de cursos d'água e a destruição de habitats naturais. A falta de manutenção adequada dessas vias intensifica esses problemas, tornando a recuperação onerosa e complexa.

Portanto, este estudo se propõe a identificar e analisar os processos erosivos que ocorrem na Estrada da Aviação, determinando suas causas e os impactos ambientais associados. A metodologia adotada inclui a coleta de amostras de solo, análises laboratoriais e observações in situ. Os resultados esperados contribuirão para o desenvolvimento de estratégias eficientes de mitigação e controle da erosão,

promovendo práticas de manejo sustentável que possam ser aplicadas não apenas nesta rodovia, mas em outras semelhantes no país.

A pesquisa visa não só à preservação ambiental, mas também à melhoria da qualidade de vida das comunidades locais, garantindo a segurança e a funcionalidade das rodovias vicinais. Dessa forma, este trabalho apresenta relevância acadêmica e prática, oferecendo subsídios para políticas públicas e ações de conservação ambiental.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura é uma parte fundamental de qualquer estudo científico, incluindo trabalhos de conclusão de curso (TCC) e projetos de pesquisa em geologia. Proporciona a análise e síntese de estudos prévios sobre o tema de interesse, ajudando a identificar lacunas no conhecimento, métodos utilizados e resultados obtidos por outros pesquisadores.

3.1 Solo

O solo é um composto de elementos complexos que não podem ser expressos por uma simples descrição, e suas mudanças são contínuas e difícil distingui-las claramente. O solo é feito de rochas, cinzas vulcânicas depositadas na superfície da terra, que é física e quimicamente intemperizadas em partículas finas, como areia, silte e argila.

A definição de solo varia conforme o campo de estudo e a utilização desse material. No campo da agronomia, solo é visto como um meio de fixação das raízes e um reservatório de nutrientes e água para as plantas. Para geólogos de mineração, o solo é a camada de material sobrejacente ao minério, considerada um material de rejeito a ser removido. Já para engenheiros civis, os solos são agregados de partículas resultantes da decomposição de rochas, que podem ser facilmente escavados sem a necessidade de explosivos e desempenham um papel crucial como materiais de construção e fundação.

Solo é a coletividade de indivíduos naturais, na superfície da terra, eventualmente modificado ou mesmo construído pelo homem, contendo matéria orgânica viva e servindo ou sendo capaz de servir à sustentação de plantas ao ar livre. Em sua parte superior, limita-se com o ar atmosférico ou águas rasas. Lateralmente, limita-se gradualmente com rocha consolidada ou parcialmente desintegrada, água profunda ou gelo. O limite inferior é talvez o mais difícil de definir. Mas, o que é reconhecido como solo deve excluir o material que mostre pouco efeito das interações de clima, organismos, material originário e relevo, através do tempo (Soil taxonomy 1975 e do Soil survey manual 1984).

3.1.1 Conceitos de solo

A palavra “solo” pode ser entendida de várias maneiras como uma ampla gama de suas aplicabilidades e do que se esperam, como: produção de alimentos, o fornecimento de matérias-primas para têxteis e medicamentos, filtragem e retenção de água.

A definição acadêmica de solo também é vaga, mesmo do ponto de vista internacional. Isso porque a forma de se entender suas finalidades alteram conforme a finalidade de uso. No contexto da Geociências o solo e sua composição assumem papéis fundamentais no suporte da vida humana como no todo em nosso planeta Terra.

3.1.2 Origens do solo

A origem do solo (do Latim Húmus), está relacionada à decomposição das rochas por processos de intemperismo que ocorre nas rochas da crosta terrestre. Essa decomposição é o resultado da ação dos agentes físicos, químicos e pela ação de agentes biológicos.

Existem cinco fatores ambientais para a formação do solo: clima, organismos vivos, rocha hospedeira, topografia e tempo. O clima afeta os efeitos físicos, químicos e biológicos do solo em cada seção transversal por meio da temperatura e da precipitação. A rocha hospedeira é o solo principal com diferentes composições e localizações geográfica e o tempo está profundamente envolvido no processo de maturação do solo.

O solo resultante do intemperismo físico e químico da rocha hospedeira que compõe naquela posição é chamado de solo residual, e o tipo de solo formado é o original.

3.1.3 Intemperismo

Intemperismo é um conjunto de processos físicos e químico que alteram maciços rochosos, desgastando e modificando suas características físicas e químicas, transformando-as em pequenos fragmentos e solubilizando alguns de seus constituintes.

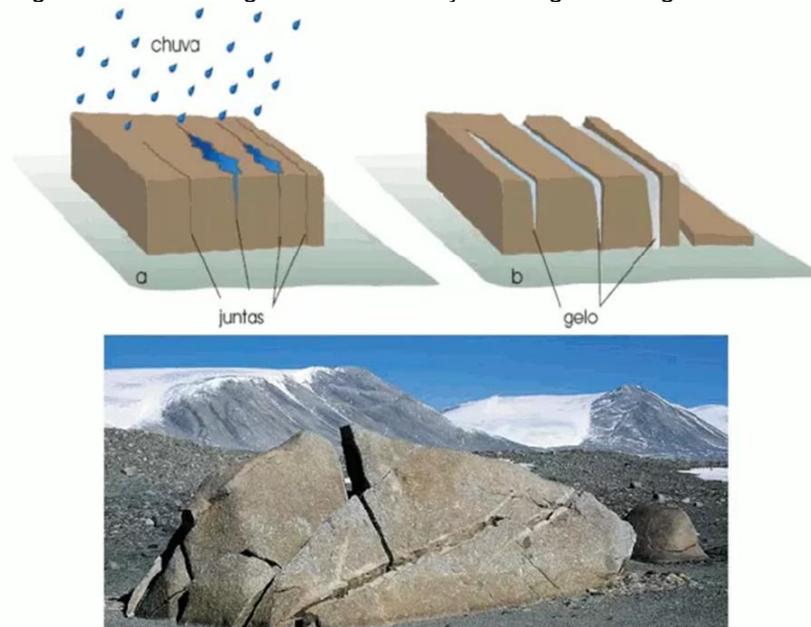
3.1.3.1 Intemperismo físico (ou mecânico)

O processo de intemperismo é fundamental para a evolução das paisagens terrestres. Ele ocorre devido à interação entre fatores naturais, como variação de temperatura, água, vento e pela ação dos agentes biológicos (raízes das plantas, líquens, minhocas, etc.).

A alternância entre o calor do dia e o frio da noite causa variações térmicas nas rochas. Essas mudanças de temperatura levam à dilatação e contração dos minerais presentes na rocha, essa fadiga mineral resulta na ruptura dos minerais, fragmentando a rocha em partículas menores. À medida que os minerais se rompem, o tamanho das partículas diminui isso aumenta a área de superfície exposta da rocha, quanto maior a superfície, mais eficiente é o intemperismo químico subsequente.

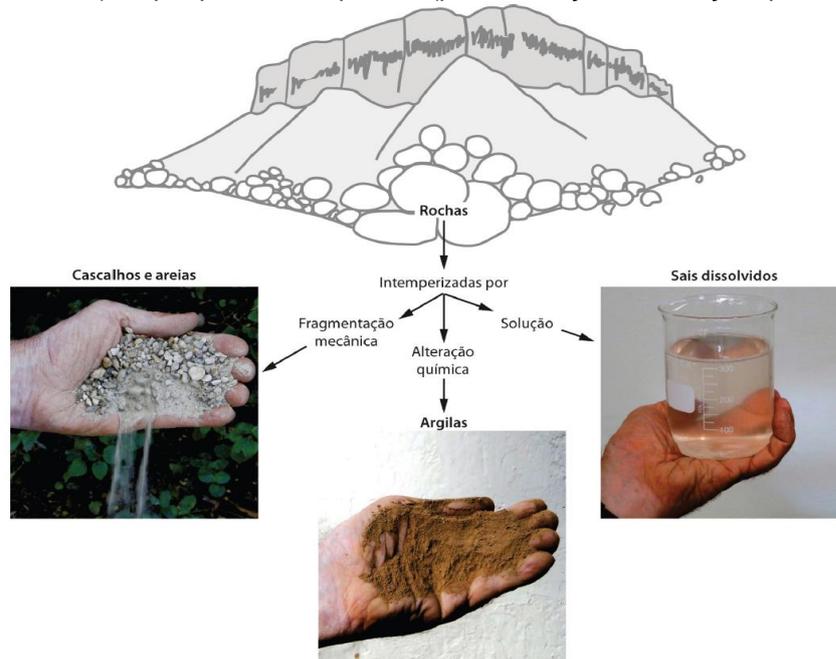
A combinação desses processos físicos e químicos molda a paisagem ao longo do tempo. As rochas se fragmentam, suas partículas se tornam mais acessíveis aos agentes químicos e o ciclo de transformação continua.

Figura 1 - Bloco de gnaisses sobre ação da água e do gelo.



Fonte: <https://image.slidesharecdn.com/6-solos-220824171949-21bbdcad/75/6-Solos-pptx-4-2048.jpg>

Figura 2 - Processos de intemperismo de maciço rochoso, processos físicos (por fragmentação mecânica) ou por processos químico (por dissolução e alteração química).



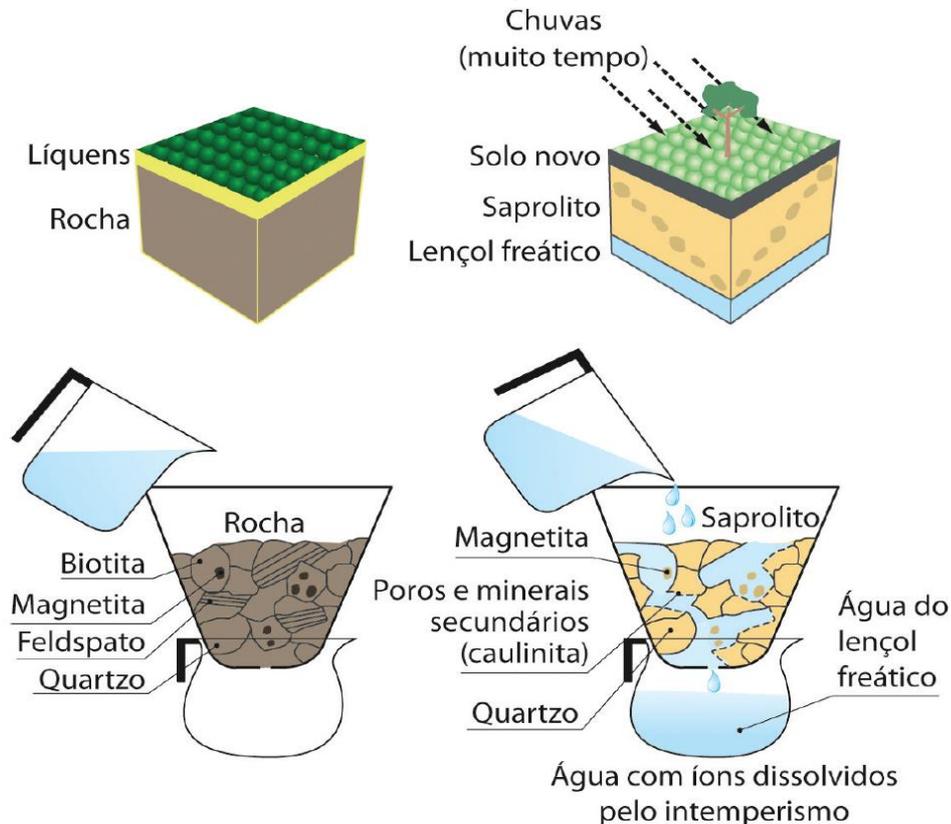
Fonte: Adaptado de Press e Siever (1978), Marston H.D. Franceschini.

3.1.3.2 Intemperismo químico

As reações de intemperismo químico resultam na formação de novos minerais, frequentemente mais estáveis nas condições ambientais da superfície terrestre. Além disso, o intemperismo químico contribui para a liberação de nutrientes essenciais para as plantas, enriquecendo o solo e promovendo a formação de horizontes de solo distintos. O intemperismo químico é um processo complexo e contínuo que transforma a rocha original em solo. A compreensão das reações envolvidas e suas implicações é essencial para diversas aplicações, desde a agricultura até a engenharia civil.

Este tipo de intemperismo é mais comum em climas quentes e úmidos, como no Brasil, onde os solos resultantes, como argilas, são o produto final do processo de decomposição. Em um grande período e em condições de calor e chuva abundantes, a maior parte dos minerais primários sofrem ação do intemperismo, deixando um resíduo rico apenas em minerais muitíssimos resistentes como o, quartzo e os neominerais do grupo dos óxidos de ferro e de alumínio (Lepsch, 2011).

Figura 3 - Analogia com coador de café; A água ao ser derramada no coador (com rocha fisicamente fragmentada no papel de café moído), dissolve o que é mais solúvel, deixando um resíduo (borra de café/saprolito) constituído de novos minerais com a caulinita e minerais primários mais resistentes (quartzo, magnetita).

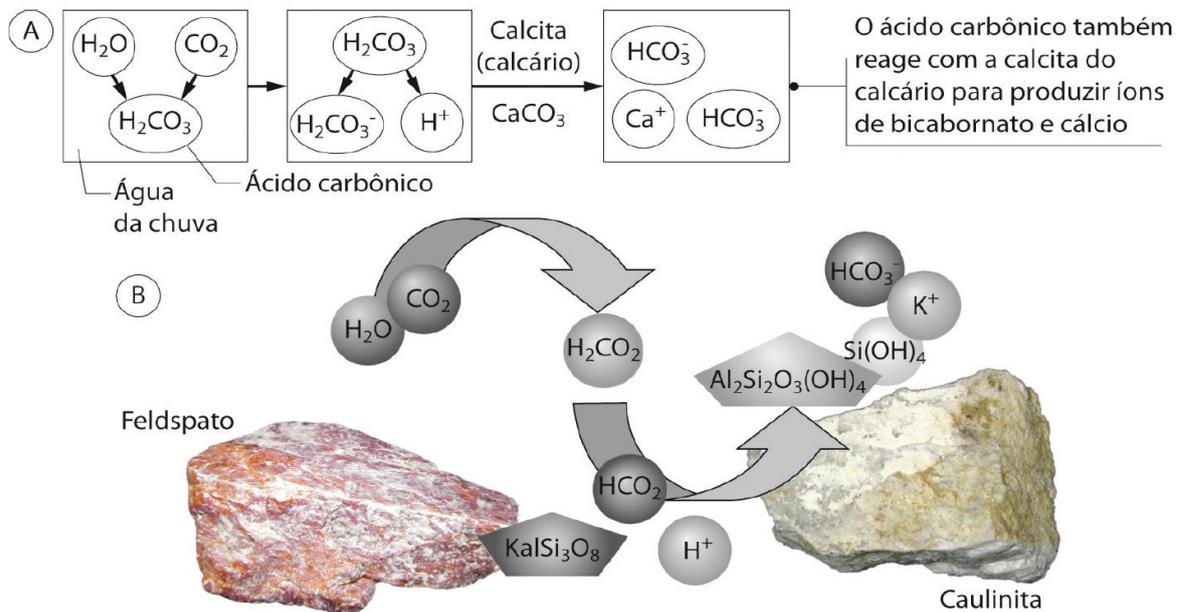


Fonte: Adaptado de Railsback (2006).

Entre as várias reações químicas do intemperismo destacam-se: (a) dissolução, (b) Oxidação e (c) Hidrólise. Na dissolução os minerais se “desfazem” ou se dissociam na água; na oxidação, eles reagem com o oxigênio e, na hidrólise, eles reagem com a água. A (Figura 4) traz exemplos dessas reações para uma melhor compressão dos fenômenos.

As reações de intemperismo químico resultam na formação de novos minerais, frequentemente mais estáveis nas condições ambientais da superfície terrestre. Por exemplo, a caulinita, um mineral argiloso, é um produto comum do intemperismo de feldspatos. Além disso, o intemperismo químico contribui para a liberação de nutrientes essenciais para as plantas, enriquecendo o solo e promovendo a formação de horizontes de solo distintos. O intemperismo químico é um processo complexo e contínuo que transforma a rocha original em solo. A compreensão das reações envolvidas e suas implicações é essencial para diversas aplicações, desde a agricultura até a engenharia civil.

Figura 4 - Algumas das reações comuns do intemperismo químico sob condições de clima quente e úmido: (a) dissolução da calcita formando íons de bicarbonato e de cálcio; (b) hidrólise de feldspato potássico (ortoclásio) formando a caulinita e liberando íons de potássio e ácido silícico [Si(OH)₄].



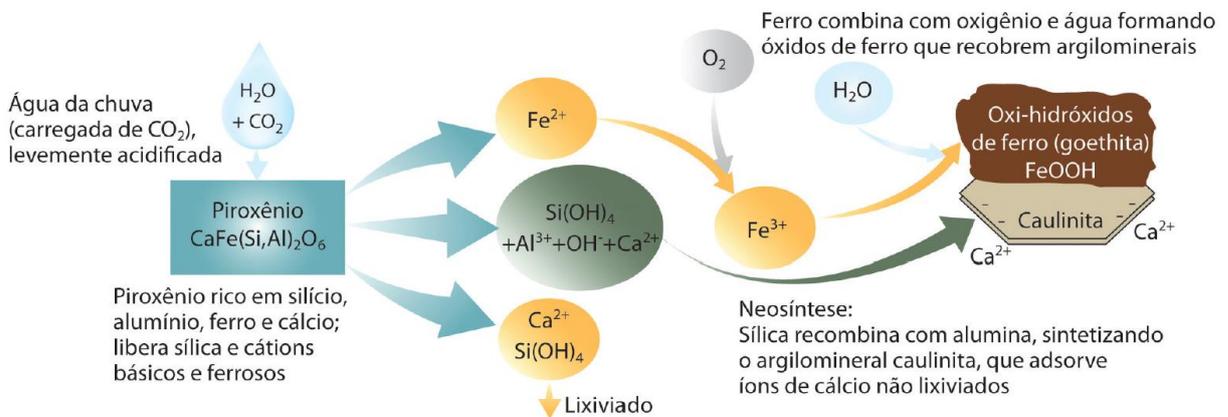
Fonte: Adaptado de Railsback (2006).

A dissolução é uma reação onde os minerais se "desfazem" ou se dissociam na água. Este processo é comum em minerais solúveis, como halita (NaCl) e gipsita (CaSO₄·2H₂O), que se dissolvem em água, liberando íons na solução. A água da chuva, ligeiramente ácida devido à presença de dióxido de carbono dissolvido (formando ácido carbônico), pode acelerar a dissolução de minerais carbonáticos como calcita (CaCO₃), levando à formação de cavernas e paisagens cársticas.

O processo de oxidação ocorre em todos os minerais que contêm elementos químicos passíveis de serem oxidados, como os minerais que contêm ferro exemplo dos ortossilicatos olivina e os silicatos em cadeia (piroxênios, anfibólios e biotita).

A oxidação e elementos reduzidos (Fe²⁺, S²⁺, Mn²⁺) são oxidados por oxigênio (O₂) atmosférico na presença da água e microrganismo para (Fe³⁺, S⁴⁺, Mn³⁺, Mn⁴⁺). Este processo resulta na formação de óxidos e hidróxidos férricos, causando a expansão e desintegração da estrutura cristalina dos minerais e resultando em cores castanhas ou avermelhadas típicas de solos ricos em ferro (Lepsch, 2011).

Figura 5 - Esquema de alteração do mineral piroxênio, rico em oxigênio, ferro, sílica e cálcio. Com a hidrólise, seus cátions são liberados. O ferro ferroso (Fe^{2+}) é oxidado para formar o mineral secundário goethita enquanto a sílica e a alumina se recombina para formar o argilomineral caulinita.



Fonte: Lepsch (2010).

A hidrólise é uma reação química entre os íons H^+ da água e os elementos da estrutura do mineral. Este processo é particularmente significativo na transformação de minerais primários em argilas e na liberação de cátions e sílica solúvel. A hidrólise ocorre quando íons H^+ e OH^- da água substituem outros íons na estrutura cristalina de um mineral, fazendo com que esta se desfça ou modifique. Esta reação é especialmente importante em climas tropicais e subtropicais úmidos, onde contribui para a formação de argilominerais. Minerais de silicato, comuns em solos, são especialmente suscetíveis à hidrólise. O pH da água influencia a taxa de hidrólise, sendo mais rápida em condições ácidas ou básicas em comparação com água neutra. Temperaturas mais elevadas também aumentam a taxa de reação. Provavelmente este é o mais importante processo de transformação dos minerais primários em argilas e de liberação de cátions e de sílica solúvel (Sposito, 2008).

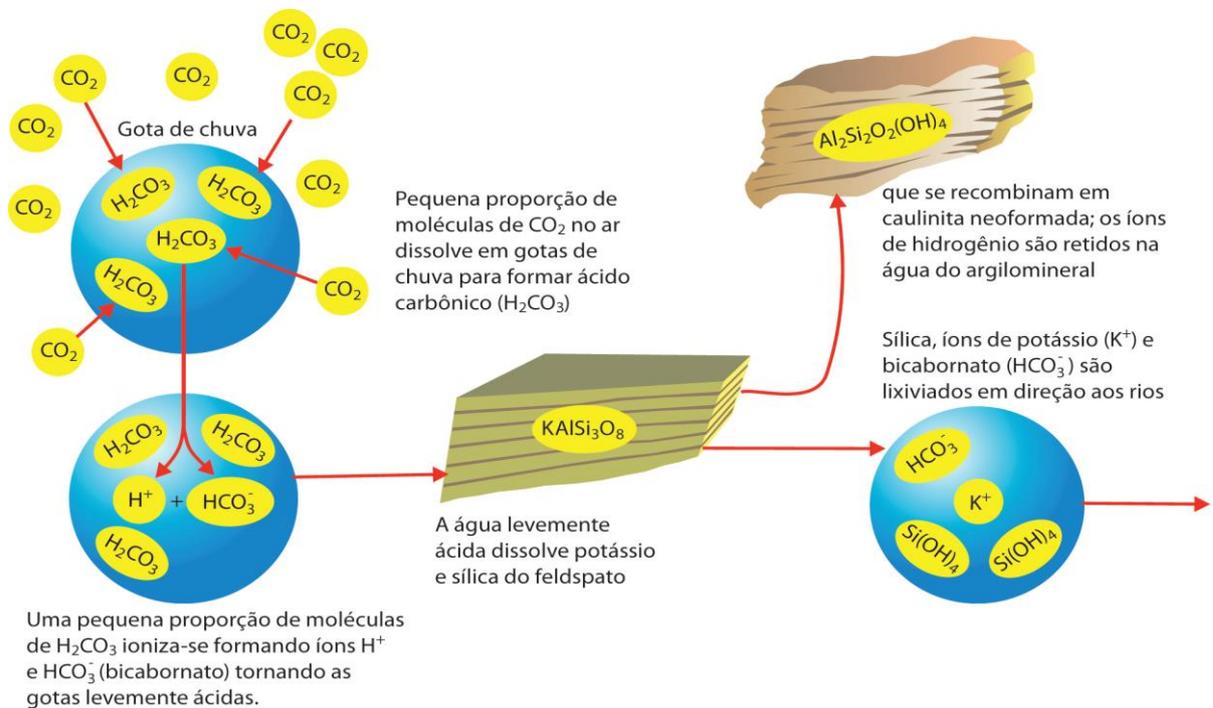
A hidrólise é uma reação química entre os íons H^+ da água e os elementos da estrutura do mineral. As fontes de H^+ são diversas para que ocorra a hidrólise. Uma das fontes comuns é matéria orgânica do solo, em cuja decomposição há formação de radicais orgânicos, como os ácidos carboxílicos, os quais podem liberar H^+ . Esta é a principal reação química na formação e transformação de argilominerais, particularmente sob condições tropicais e subtropicais úmidas; ela envolve a remoção de cátions básicos (Popp, 2010).

Diferentes minerais têm diferentes susceptibilidades à hidrólise. Minerais de silicato, por exemplo, são comuns em solos e podem ser bastante reativos. O pH da água afeta a taxa de hidrólise. Água ácida ou básica acelera o processo em

comparação com água neutra. Temperaturas mais elevadas geralmente aumentam a taxa de reações químicas, incluindo a hidrólise.

A hidrólise de minerais pode enfraquecer a estrutura do solo, reduzindo sua coesão e aumentando a susceptibilidade à erosão. Alguns produtos da hidrólise, como argilas expansivas, podem aumentar de volume quando molhados, causando problemas em fundações e pavimentos. A mudança na composição mineralógica pode alterar as propriedades mecânicas do solo, como a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade.

Figura 6 - Ilustração da hidrólise do feldspato potássico formando argila caulinita, sílica e sais que são lixiviados em direção aos rios e mares.



Fonte: Teixeira et al. (2000).

3.1.4 Agente biológico

Os agentes biológicos são aqueles que ocorrem com a participação de organismos vegetais, animais e microrganismos. A participação dos organismos vivos, em geral, ocorre com a atuação de substância química (intemperismo químico) excretadas ou gerada pelo metabolismo, e pela ação mecânica das raízes (agente biológico). Assim a ação dos organismos no intemperismo do tipo físico e/ou químico, sendo classificado como agente biológico apenas por apresentar participação de seres vivos no processo (adaptado de Lepsch, 2011).

Figura 7 - Agentes biológico, ação por diversos organismos vivos contribuem para a quebra e alteração das estruturas rochosas e do solo.



Fonte: Sheila Santos

3.1.5 Propriedades dos solos

As propriedades dos solos definem a distribuição da água nas camadas da terra, e são responsáveis pela circulação e manutenção de água e ar no solo.

Os processos pedogenéticos e os processos gerais de formação dos solos, formarão as características morfológicas externas do solo, bem como o seu perfil. As propriedades dos solos são atribuídas a várias características físicas, químicas e biológicas do solo, que incluem:

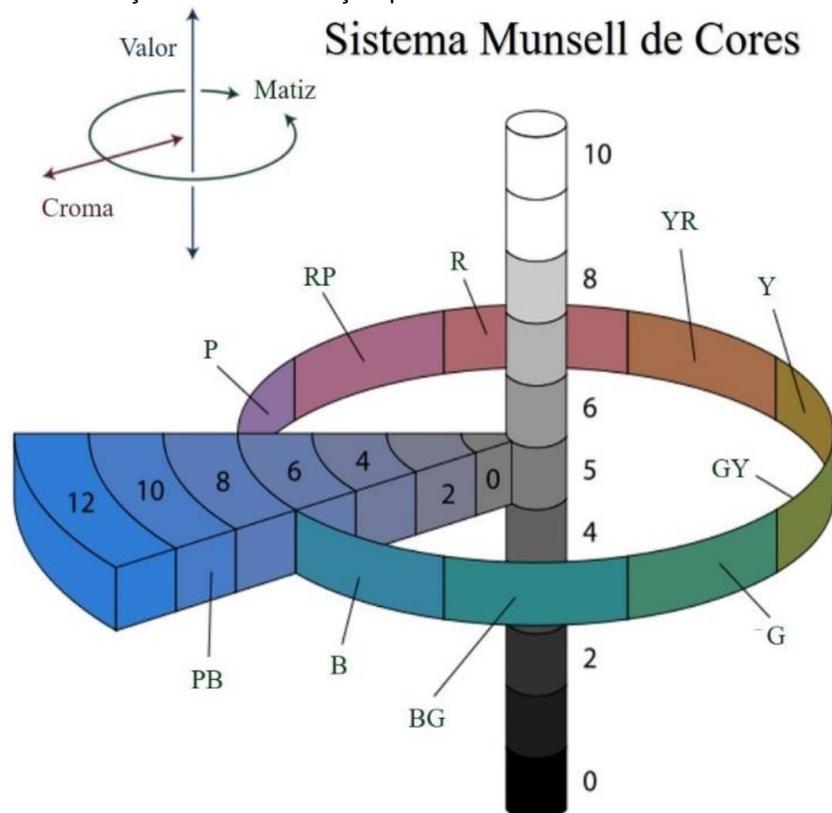
1. Textura: Relaciona-se com a proporção de partículas de areia, silte e argila no solo.
2. Estrutura: Refere-se à disposição das partículas do solo e à formação de agregados.
3. Densidade: Inclui a densidade aparente e a densidade real do solo.
4. Porosidade: Volume de espaços vazios no solo.
5. Permeabilidade: Capacidade do solo de permitir a passagem de água.
6. Capacidade de Retenção de Água: Quantidade de água que o solo pode armazenar.
7. Resistência ao Cisalhamento: Capacidade do solo de resistir a forças de corte.
8. Compressibilidade: Grau em que o solo se deforma sob carga.
9. Plasticidade: Capacidade do solo de ser moldado sem se romper.

3.1.6 Características morfológicas dos solos

A análise das características do solo é fundamental para a compreensão de sua formação, comportamento e manejo. Entre as características mais perceptíveis está a cor do solo, que pode ser facilmente determinada em campo ou laboratório. A cor é influenciada pela matéria orgânica e pela mineralogia, especialmente pelos óxidos de ferro. A Carta de Cores de Munsell é amplamente utilizada para padronizar a identificação da cor do solo, considerando matiz, valor e croma (figura 8). A matéria orgânica tende a escurecer o solo, diminuindo o valor e o croma de Munsell, enquanto óxidos como hematita e goethita conferem tonalidades específicas ao solo (Lepsch, 2011 and U.S. Geological Survey, 2023).

Os óxidos pedogênicos mais frequentes no solo são a hematita (geralmente associada à goethita), com tonalidades entre 10 R e 5 YR, e a goethita (sem hematita), com tonalidades entre 7,5 YR e 2,5 Y. A goethita é comum em diversos climas e materiais de origem, enquanto a hematita é abundante em solos tropicais bem drenados com forte efeito de pigmentação e está ausente em solos jovens de climas temperados úmidos.

Figura 8 - Representação visual das cores organizadas por matiz, valor e croma, facilitando a identificação e a comunicação precisa das cores em diversas áreas



Fonte: Adaptado de (RUS, 2007)

Uma técnica crucial na identificação de solos, teve suas raízes nas décadas de 1960 e 1970 com o desenvolvimento de sensores remotos capazes de medir a radiação eletromagnética em diferentes partes do espectro. Essa técnica permite quantificar a interação dos objetos terrestres, incluindo solos, com a energia eletromagnética, medindo a luz refletida, transmitida ou absorvida. Água, minerais, solos e vegetação possuem registros espectrais característicos derivados da interação de sua estrutura atômico-molecular intrínseca com a energia eletromagnética.

O espectrorradiômetro ASD FieldSpec4 é uma ferramenta avançada para análise espectral de materiais, incluindo amostras de solo. A faixa espectral, O ASD FieldSpec4 opera na faixa espectral de 350 a 2.500 nm (nanômetros). Essa ampla faixa permite a detecção de características sutis nos espectros de refletância das amostras em diferentes comprimentos de onda.

As curvas espectrais resultantes mostram como a intensidade da luz refletida varia em toda a faixa espectral. Com base nas curvas espectrais obtidas, os dados são comparados com uma biblioteca de espectros de minerais conhecidos. Isso permite a identificação dos minerais presentes nas amostras de solo.

Os limites de consistência são as fronteiras que definem os diferentes estados físicos de um solo à medida que sua umidade varia.

A consistência do solo refere-se às manifestações das forças de coesão e adesão das partículas do solo, variando com o teor de umidade. É descrita em três condições de umidade: seca, úmida e molhada. A consistência seca avalia a resistência à quebra, enquanto a consistência úmida mede a friabilidade e a consistência molhada avalia a plasticidade e a pegajosidade do solo (Brady & Weil, 2008).

A terminologia para a consistência inclui especificações distintas para a descrição em três condições de umidade padronizados: consistência seca, consistência úmida e consistência molhada.

A avaliação da consistência seca do solo é essencial para várias aplicações práticas e científicas. Solos com alta resistência à quebra em estado seco pode ser difíceis de arar e preparar para o plantio. A dureza do solo também afeta a emergência das plantas, dificultando a penetração das raízes e a absorção de água. Solos que se desagregam facilmente quando secos são mais suscetíveis à erosão

pelo vento, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Medidas de conservação, como a cobertura vegetal, são essenciais para proteger esses solos.

A consistência seca é um parâmetro crucial na construção de fundações e outras estruturas. Solos muito duros podem oferecer uma base sólida, enquanto solos soltos podem necessitar de estabilização adicional para suportar cargas estruturais (Soil Science Society of America 2023).

A consistência úmida do solo refere-se à resistência que o solo oferece à deformação ou ruptura quando se encontra ligeiramente úmido. Este parâmetro é crucial para entender o comportamento mecânico do solo em condições naturais, influenciando diretamente sua manipulação, cultivo e a construção civil. A consistência úmida é avaliada pela friabilidade, que é a facilidade com que o solo pode ser quebrado ou desagregado com uma leve pressão (Hillel, D. 2004)

A consistência molhada do solo é uma característica crucial que se observa em amostras de solo molhadas, amassadas e homogeneizadas manualmente. Este parâmetro avalia duas propriedades fundamentais: a plasticidade e a consistência. Ambas as propriedades são essenciais para entender a manipulação do solo em condições de saturação e têm implicações significativas para a agricultura, a engenharia civil e a ciência do solo.

A plasticidade está diretamente relacionada ao conteúdo de argila no solo. Solos com alto teor de argila, como as argilas expansivas, mostram alta plasticidade devido à presença de minerais como a montmorilonita (Guggenheim & Martin, 1995). A plasticidade é medida através de testes como o Limite de Plasticidade (Atterberg, 1911).

A coesão é influenciada pelo conteúdo de argila e pela presença de matéria orgânica. Solos com alta pegajosidade podem apresentar desafios no manejo agrícola e na construção civil, pois tendem a dificultar a limpeza de ferramentas e máquinas (Mitchell & Soga, 2005).

A textura do solo é uma propriedade fundamental que descreve a proporção relativa das partículas de areia, silte e argila no solo. Esta característica física influencia significativamente o comportamento do solo em termos de sua capacidade de retenção de água, aeração, drenagem e disponibilidade de nutrientes. A textura do solo é determinada com base na análise granulométrica, que classifica as partículas do solo em diferentes faixas de tamanho. Partículas de tamanho intermediário são macias ao toque, melhoram a retenção de água e nutrientes, mas

podem ser suscetíveis à erosão (Brady & Weil, 2008). As partículas grandes e espessas proporcionam boa drenagem e aeração, mas têm baixa capacidade de retenção de água e nutrientes (Hillel, 2004). Partículas muito finas conferem alta capacidade de retenção de água e nutrientes, mas podem causar problemas de drenagem e compactação (Mitchell & Soga, 2005).

No Brasil, a classificação de tamanho de partículas utilizada segue o padrão disposto pela (EMBRAPA, 1979) ver (Tabela 1).

A granulação da rocha, associada à mineralogia, determina a textura do solo. Materiais com elevado teor em quartzo produzem solos de textura mais arenosa em comparação às rochas básicas ricas em minerais ferro-magnesianos.

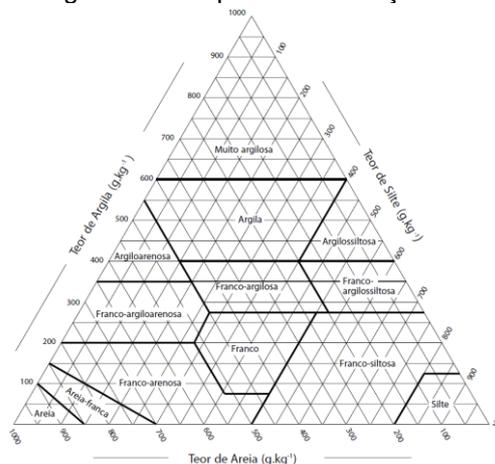
Tabela 1 - Tamanho de partículas minerais que compõem a estrutura do solo pela classificação da (EMBRAPA).

Argila	< 0,002 mm	
Silte	0,002 - 0,05 mm	
Areia	Areia fina	0,05 - 0,2 mm
	Areia grossa	0,2 - 2 mm
As frações mais grosseiras do que a fração areia são:	Cascalho	2 - 20 mm
	Calhau	20 - 200 mm
	Matacão	> 200 mm

Fonte: Adaptado, EMBRAPA, 1979.

A textura do solo é frequentemente representada em um triângulo textural, que é um diagrama triangular utilizado para classificar o solo com base nas proporções de areia, silte e argila (Figura 9). Este método é amplamente aceito e utilizado mundialmente (USDA, 1993 and EMBRAPA, 1979).

Figura 9 - Triângulo textural para classificação do solo.



Fonte: Adaptado de Lemos e Santos (1996).

A granulação da rocha, associada à mineralogia, determina a textura do solo. Materiais com elevado teor em quartzo produzem solos de textura mais arenosa em comparação às rochas básicas ricas em minerais ferro-magnesianos. Uma rocha poderá formar solos diferentes, dependendo da variação dos demais fatores de formação.

A estrutura do solo refere-se ao arranjo das partículas primárias (areia, silte e argila) em agregados ou partículas secundárias. Este arranjo é influenciado por vários fatores, incluindo a matéria orgânica, os óxidos de ferro e a atividade biológica. A estrutura do solo desempenha um papel crucial na determinação das propriedades físicas do solo, como porosidade, aeração, drenagem e capacidade de retenção de água e nutrientes (IBGE, 2007). A matéria orgânica atua como um agente cimentante que promove a formação de agregados estáveis. Ela melhora a coesão entre as partículas do solo e aumenta a sua resistência à desagregação (Brady & Weil, 2008). Os óxidos de ferro, presentes em muitos solos tropicais, também contribuem para a estabilidade dos agregados, ajudando a manter a estrutura do solo em condições adversas (Kämpf & Curi, 2012).

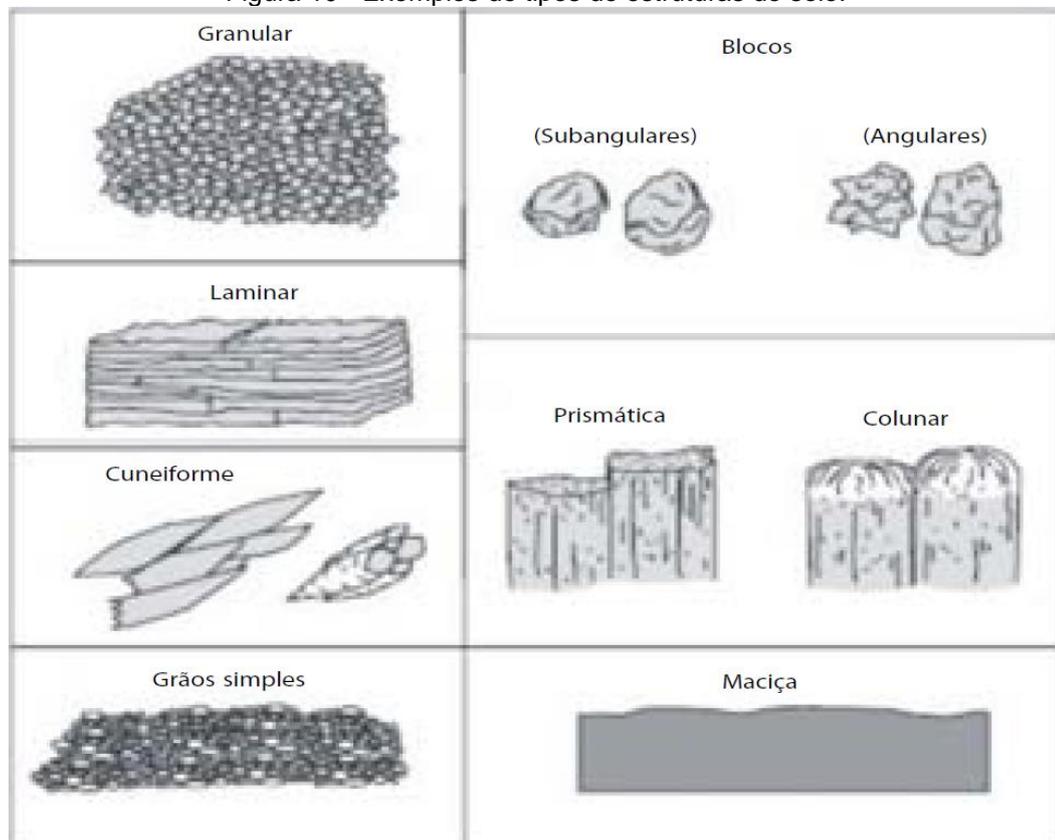
A atividade de raízes, fungos e micro-organismos contribui para a formação de agregados ao secretar substâncias que atuam como ligantes e ao exercer pressão física sobre as partículas do solo (Six *et al.*, 2004).

A estrutura do solo é caracterizada pelo tipo de agregados formados, seu tamanho e o grau de desenvolvimento. Os principais tipos de estrutura do solo incluem:

1. Laminar: Agregados em forma de placas finas. Comum em solos compactados ou com camadas de argila (IBGE, 2007). As partículas do solo estão arranjadas em torno de uma linha horizontal, ou seja, figuras geométricas regulares onde as dimensões horizontais são sempre maiores que as verticais.
2. Prismática: Agregados com forma alongada e prismática, comuns em solos com expansão e contração devido a variações de umidade.
3. Colunar: Similar à prismática, mas com topos arredondados. Comum em solos sodificados.
4. Blocos Angulares e Subangulares: Agregados em forma de blocos com ângulos definidos (angulares) ou com bordas mais arredondadas (subangulares). Comuns em solos argilosos.

5. Granular: As partículas estão arranjadas em torno de um ponto, formando agregados arredondados, cujo contato entre as unidades não se dá através de faces e sim de pontos. São também reconhecidos dois subtipos: granular e grumos, que se diferenciam pela porosidade, sendo que os grumos são mais porosos.
6. Solto: Solo sem agregados definidos, com partículas separadas.
7. Fraca: Agregados pouco desenvolvidos, facilmente desintegráveis.
8. Moderada: Agregados bem formados, mas não extremamente estáveis.
9. Forte: Agregados muito bem desenvolvidos e estáveis, com alta resistência à desagregação.

Figura 10 - Exemplos de tipos de estruturas do solo.



Fonte: Adaptado de Schoeneberger et al. (2002).

10. Tamanho: muito pequena, pequena, média, grande, muito grande, deve ser observada em campo, na descrição morfológica, mas seu valor definitivo é dado pela análise granulométrica, realizada em laboratório.

Tabela 2 - Classes de estrutura

Classes	Critérios (mm)		
	Granular e Laminar	Colunar, prismático e Cuneiforme	Blocos Angulares e Subangulares
Muito pequena	< 1	< 10	< 5

Pequena	1 < 2	10 a < 20	5 a < 10
Média	2 a < 5	20 a < 50	10 a < 20
Grande	5 a < 10	50 a < 100	20 a < 50
Muito grande	≥ 10	100 a < 500	≥ 50
Extremamente grande	-	≥ 500	-

Nota: No caso de estrutura laminar, colunar, prismática e cuneiforme, considerar as dimensões do menor eixo.

Fonte: Manual técnico de pedologia - 2a edição IBGE, 2007

A porosidade do solo é uma propriedade física fundamental que se refere ao volume total de espaços vazios (poros) dentro de um solo, os quais podem ser preenchidos por água ou ar. A porosidade é expressa como a fração ou porcentagem do volume total do solo que é ocupado por esses poros. Esta característica é crucial para compreender a permeabilidade do solo, bem como sua capacidade de retenção de água e nutrientes, influenciando diretamente a saúde das plantas e a eficácia do gerenciamento do solo (Sposito, 2008). Solos com baixa porosidade são mais suscetíveis à compactação, o que reduz a infiltração de água e aumenta o risco de erosão superficial. A manutenção de uma boa porosidade é fundamental para a conservação do solo e a prevenção de processos erosivos (Brady & Weil, 2008).

3.1.7 Classificação dos solos

A classificação do solo consiste em uma importante ferramenta que pode ser utilizada na orientação do uso eficiente e racional do solo. No Brasil, a classificação sistêmica dos solos teve início no fim da década de 1970, quando foram realizadas diversas aproximações, sendo que a publicação da primeira edição do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SiBCS) ocorreu em 1999.

O intuito de qualificar um solo como agrícola ou não agrícola busca exclusivamente expressar fatores limitantes para quaisquer atividades que se almeja realizar no local. Por exemplo, solos onde se observa elevada concentração de ácido sulfúrico, carbonatos ou sais serão inaptos para lavouras, uma vez que apresentam toxicidade elevada, não permitem a penetração de raízes e impedem o desenvolvimento vegetal (Oliveira, 1999; Santos *et al.*, 2018).

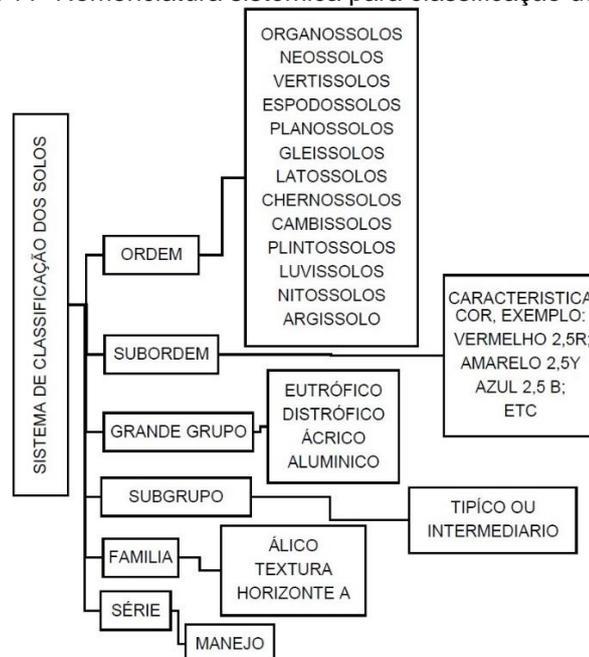
Os solos são constituídos de materiais minerais e orgânicos, os quais estão organizados em camadas e/ou horizontes. O perfil do solo constitui um corte vertical, onde é possível visualizar a disposição dos horizontes até o

material de origem, utilizado para exame, descrição, coleta e classificação do solo, por meio da comparação dos aspectos individuais verificados no perfil do solo e os critérios do SiBCS (EMBRAPA, 2006).

A nomenclatura para a classificação dos solos (Figura 11), dentro da concepção de um sistema multicategórico e hierárquico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), foram estruturados em seis níveis sendo: ordem, subordem, grande grupo, subgrupo família e séries, das quais (famílias e séries) foi definido recentemente e ainda está em discussão.

Ordem: engloba 13 classes, definidas principalmente pela presença ou ausência de horizontes diagnósticos que refletem diferenças relacionadas a processos pedogenéticos.

Figura 11- Nomenclatura sistêmica para classificação dos solos.



Fonte: EMBRAPA, 2011 (adaptado pelo Autor).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) foi elaborado tomando como base perfis representativos de solos enquadrados em táxons dos níveis hierárquicos mais elevados identificados em levantamentos dos tipos reconhecimento e exploratório com nomes provisórios da antiga classificação dos EUA.

A última versão da classificação, publicada em 2018, somente classes dos quatro primeiros níveis categóricos foram definidas: as Famílias estão com definições de teste e as Séries não foram definidas.

3.2 Característica Geomorfológica

Caçapava do Sul, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, apresenta um relevo variado que combina planaltos, coxilhas e áreas de depressão.

1. Planaltos e Serras

- Serra do Sudeste: A cidade está situada em uma região de transição entre o Planalto Sul-Rio-Grandense e a Serra do Sudeste. A Serra do Sudeste é composta por elevações suaves e colinas, com altitudes variando entre 200 e 400 metros.

2. Coxilhas

- Coxilhas Subtropicais: A região é caracterizada por coxilhas, que são colinas de baixa altitude e topo arredondado, típicas do pampa gaúcho. Essas formações são importantes para a pecuária, especialmente a criação de gado.

3. Depressões

- Depressão Central: Parte do território de Caçapava do Sul está inserido na Depressão Central do Rio Grande do Sul, uma área de relevo mais plano e baixo, com altitudes que variam de 50 a 200 metros.
- A área de estudo está situado no Planalto Sul-Rio-Grandense

4. Solos e Recursos Naturais

- Solos Ferruginosos: A região possui solos ricos em ferro, o que é evidenciado pela presença de formações rochosas e minerais. Esse tipo de solo é fértil e adequado para a agricultura.
- Recursos Minerais: Caçapava do Sul é conhecida por seus recursos minerais, incluindo mármore, calcário e minérios de ferro, que são extraídos e utilizados na indústria local.

5. Uso do Solo e Vegetação

- Agricultura e Pecuária: A combinação de solos férteis, relevo adequado e recursos hídricos favorece a agricultura, especialmente o cultivo de arroz, soja e milho, além da pecuária de corte e leiteira.
- Vegetação de Campo: A vegetação predominante é de campos nativos, com gramíneas e espécies adaptadas ao clima subtropical, sendo comum a presença de áreas de pastagem natural.

Essa diversidade no relevo e nas características naturais faz de Caçapava do Sul uma região com múltiplas vocações econômicas e um cenário natural variado e atrativo.

3.3 Clima

O clima de Caçapava do Sul é caracterizado por verões quentes e invernos amenos a frios, com precipitação bem distribuída ao longo do ano e altas taxas de umidade. A variabilidade climática é influenciada tanto por massas de ar frias vindas do Sul quanto por massas de ar quentes e úmidas do Atlântico.

3.4 Hidrologia e processos erosivos

A hidrologia é fundamental para compreender os processos erosivos, especialmente no contexto do escoamento superficial e subsuperficial da água. O movimento lateral de água em subsuperfície das camadas superiores do solo desempenha um papel crucial no intemperismo e na erodibilidade dos solos, influenciando diretamente o transporte de minerais em solução e a formação de erosões lineares, como as voçorocas. Estudos mostram que o escoamento subsuperficial pode ocorrer em fluxos concentrados, formando túneis ou dutos que possuem efeitos erosivos significativos, resultando no colapso da superfície e na criação de grandes voçorocas (Oliveira, 1999).

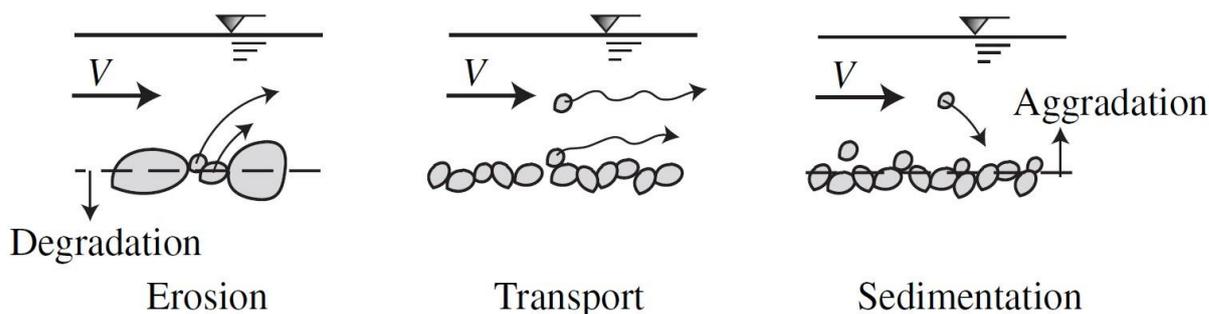
O relevo de Caçapava do Sul é drenado por diversos rios e arroios, que contribuem para a fertilidade dos vales e planícies.

Segundo (Coelho Neto, 1998, *apud* Oliveira, 1999), as erosões lineares são causadas por diferentes mecanismos que variam conforme a escala temporal e espacial. Esses processos têm origem nas rotas tomadas pelos fluxos de água em superfície e subsuperfície, destacando a importância da sazonalidade na formação das erosões lineares, especialmente em ambientes como o Cerrado. A análise hidrológica é, portanto, essencial para a compreensão e mitigação dos processos erosivos, proporcionando uma base para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle e prevenção de erosão.

Os processos naturais de erosão, transporte e sedimentação (Figura 12), estiveram ativos ao longo do tempo geológico e moldaram a paisagem atual do

nosso mundo. Atualmente, podem causar graves problemas ambientais e de engenharia. As atividades humanas geralmente aceleram os processos de erosão, do transporte e da sedimentação. Por exemplo, a erodibilidade do solo é aumentada pela aragem e preparo do solo. O dossel protetor é enfraquecido por arrancar, cortar ou queimar a vegetação existente.

Figura 12 - Processos interligados de degradação, erosão, transporte e sedimentação, que são fundamentais para a formação e modificação das paisagens terrestres.



Fonte: Julien, 2010

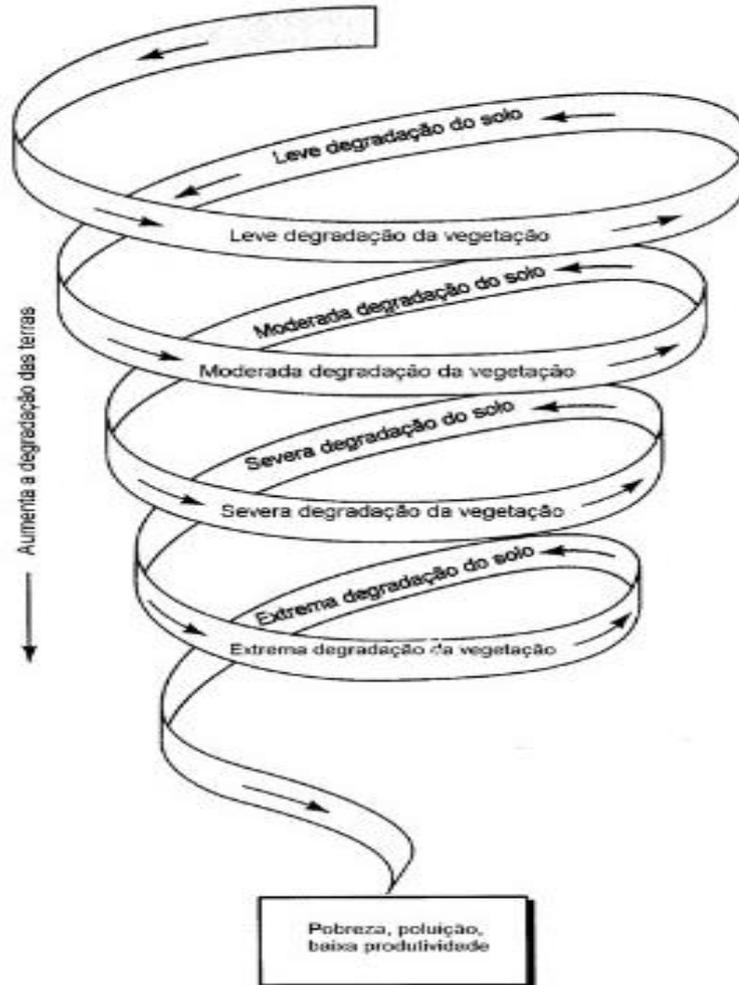
Além de produzir sedimentos nocivos, a erosão pode causar sérios danos locais às terras agrícolas, reduzindo a produtividade dos solos férteis. Em algumas circunstâncias, a taxa de erosão pode ser 100 a 1.000 vezes maior do que a taxa de erosão geológica de 0,1 ton./acre ano (25 ton.km⁻² ano).

A espiral da degradação do solo (Figura 13), uma representação visual que demonstra como a degradação do solo e da vegetação pode levar a problemas graves, como pobreza, poluição e baixa produtividade agrícola. Esse processo de degradação é caracterizado por um ciclo vicioso onde a perda de vegetação leva à maior erosão do solo, o que, por sua vez, agrava a degradação da vegetação e continua a deteriorar a qualidade do solo.

A degradação do solo tem implicações profundas para o meio ambiente e a economia. Com a diminuição da fertilidade do solo, há uma queda na produtividade agrícola, afetando diretamente a segurança alimentar e a subsistência dos agricultores. A erosão pode levar à sedimentação de corpos d'água, causando inundações e poluição da água devido ao escoamento de fertilizantes e pesticidas.

A figura da espiral de degradação é uma ferramenta didática eficaz para compreender como ações inadequadas de manejo do solo podem desencadear uma série de problemas ambientais e econômicos interconectados, agravando a vulnerabilidade das populações que dependem diretamente da terra para sua sobrevivência.

Figura 13 - Espiral descendente da degradação do solo é resultado das interações negativas solo/vegetação.



Fonte: Ray R. Weil.

O solo é uma camada viva, em processo permanente de formação, através da alteração das rochas e de processos pedogenéticos. Este processo é contrabalançado pelo processo de erosão, que remove seus constituintes, sobretudo pela ação da água de chuva. Portanto, há um quadro dinâmico, no

qual diversos processos atuam de forma contraditória, formando e erodindo o solo, refletindo certo equilíbrio na natureza, no qual a erosão é considerada normal. (Gomes, 2001).

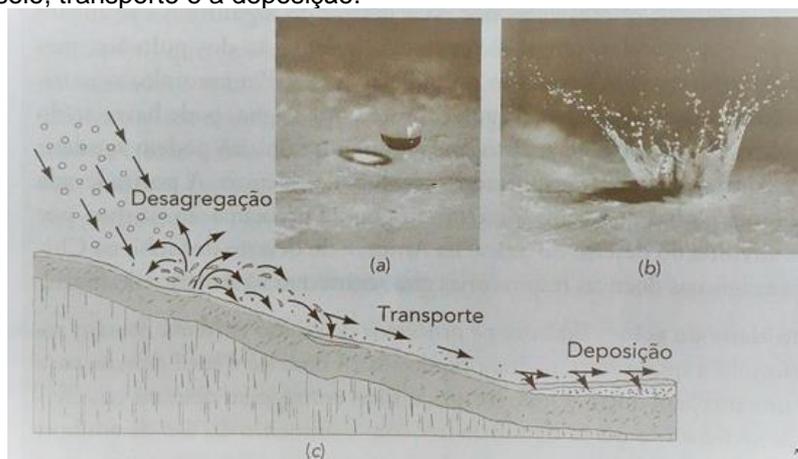
3.4.1 Erosão hídrica

De uma maneira geral, em quase todo solo removido pela erosão, há necessidade da presença da água sobre o terreno. A água que cai sob forma de chuva, exerce ação erosiva sobre o solo e, é agravada pela concentração das

estações chuvosas de determinada região, em determinados períodos do ano (Santoro, 1991).

O solo estando desprotegido de cobertura vegetal, o solo sofre ações de desagregação pelos impactos das gotículas de chuva tais consequências são representadas (Figura 14), ocorrendo o transporte, principalmente nos primeiros minutos da chuva.

Figura 14 - Processos de erosão hídrica, ação dos impactos das gotículas da chuva causando o desprendimento do solo, transporte e a deposição.

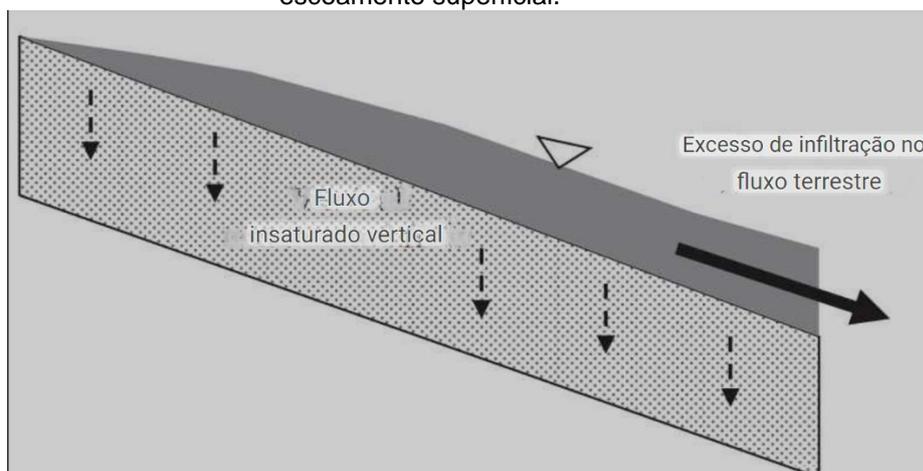


Fonte: Ray R. Weil

A taxa de desprendimento de solo é proporcional à energia cinética da chuva, à declividade do terreno e à altura da lâmina de água. Na etapa seguinte, a erosão é controlada pelo escoamento superficial. A formação e magnitude do escoamento superficial dependem fundamentalmente da infiltração, sendo que, esta depende das características da precipitação, relevo, vegetação e das características do perfil do solo.

O primeiro ocorre quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração (Horton, 1947). O segundo quando o solo se torna saturado, sendo que qualquer precipitação adicional causará escoamento (Beven and Kirkby, 1979). A água da chuva que cai no local é somada e escoada rapidamente na superfície da terra, produzindo um escoamento superficial, este resultado também significa que quando há percolação de água em forma de *piping* dentro da camada do solo ocorre um fluxo mais rápido do que o solo circundante, pode explicar a resposta do escoamento de saturação. A importância de tal a heterogeneidade tem sido apontada por observações desde cerca de 1980.

Figura 15 - Esquema mostrando mecanismos de escoamento pluvial por infiltração de excesso de escoamento superficial.



Fonte: Kirkby, 1979 (Adaptado pelo autor)

A variabilidade espacial dos fatores condicionantes determina que a geração do escoamento superficial em bacias hidrográficas seja governada por uma complexa dinâmica hidrológica (Rose, 2004). Duas teorias são utilizadas para descrever a variabilidade espacial e temporal da infiltração e, conseqüentemente, do escoamento superficial: mecanismo Hortoniano e as áreas de afluência variável.

3.4.2 Processos erosivos causadas pelo escoamento superficial

O escoamento superficial ocorre durante um evento chuvoso, quando a capacidade de armazenamento de água no solo é saturada (Figura 15). A excedência da capacidade de infiltração proporciona um fluxo laminar que se escoia sobre o solo como uma massa d'água com pequenos cursos anastomosados e raramente, na forma de lâmina d'água. A ação da água pode ocorrer na forma de ataque direto, quando atinge o solo na superfície, desagregando-o e possibilitando o transporte de partículas menores, ou ainda em subsuperfície, afetando a massa de material inconsolidado. As ações relacionadas ao início do escoamento superficial, geram formas erosivas associadas aos fluxos de escoamento difuso e concentrado, sendo os principais processos a erosão laminar, ravinas e voçorocas.

3.4.3 Erosão laminar ou erosão em lençol

A erosão em lençol, ou erosão laminar, depende da ação da chuva e do escoamento superficial difuso. São caracterizados pela forma dispersa, não se concentrando em canais, quase sempre ocorrendo sob condições de chuva prolongada. O fluxo laminar pode ser considerado o primeiro estágio do processo erosivo, por compreender um fluxo mais ou menos regular, no qual a concentração de sedimentos e a velocidade das partículas aumentam com o fluxo vertente abaixo, ao mesmo tempo que a erosão começa a se estabelecer.

As características das vertentes que podem afetar a erosão dos solos dizem respeito à declividade, bem como ao comprimento e à forma que apresentam. A importância da declividade e do comprimento das vertentes para a erosão é atribuída à influência que estes fatores exercem sobre a velocidade e o volume do escoamento superficial.

A forma das vertentes, por sua vez, atua direta e indiretamente no escoamento superficial e na erosão, com importantes implicações para o balanço de materiais e natureza dos processos.

Relevos com declividade entre 3% e 8%, com densidade de drenagem grosseira e fraco aprofundamento da drenagem, com formações superficiais espessas e onde a ação do escoamento subsuperficial provoca a perda de materiais finos em superfície com empobrecimento dos solos e, localmente, do escoamento superficial difuso, favorecendo uma erosão laminar.

No que se refere à forma da vertente em curvatura, identifica aquelas cujas curvas de nível deslocam-se de forma convexa para fora das mesmas como distribuidoras de água, nas quais a água se espalha lateralmente vertente abaixo, tendendo esses setores a serem mais secos que as concavidades. Ao contrário, as vertentes de contornos côncavos são consideradas coletoras de água, a jusante das quais localizam-se as nascentes de rios. (Bloom, 1970) destaca que, geralmente, a superfície superior convexa do perfil da vertente é controlada por escorregamentos, em especial o rastejamento, ao passo que nos trechos inferiores, côncavos, predomina o transporte pela água, caracterizado pelo escoamento laminar ou por filetes.

3.4.4 Processos erosivos na formação e desenvolvimento de ravinas

O processo de formação e desenvolvimento de ravinas pode, em algumas situações, relacionar-se aos tipos de uso da terra, sobretudo em áreas que sofreram a retirada da vegetação primária.

A erosão das vertentes, particularmente aquelas destituídas da cobertura vegetal, associada à precipitação e ao fluxo superficial, frequentemente causa a formação de uma rede de ravinas subparalelas.

A erosão por fluxo concentrado é particularmente generalizada nos platôs ocupados por agricultura intensiva, resultando da conexão hidrológica entre uma área de contribuição de escoamento, onde a remoção do solo não ocorre necessariamente, e um canal coletor, onde a velocidade e a descarga do fluxo excedem os valores críticos para o surgimento e o desenvolvimento de ravinas.

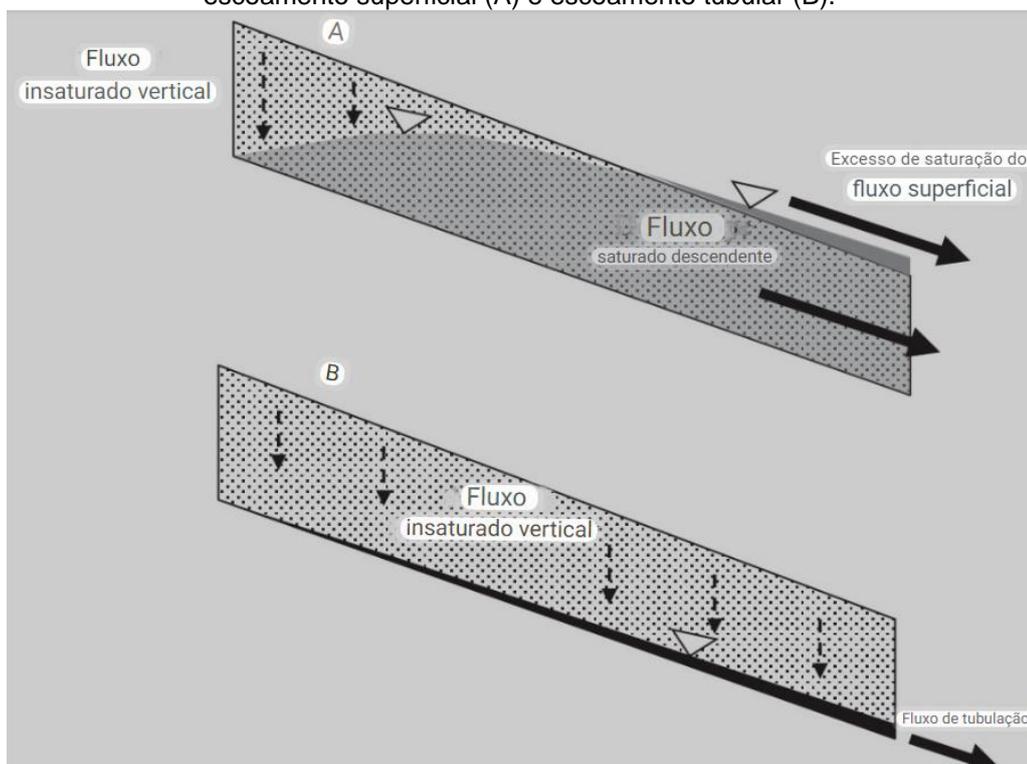
São identificadas geralmente por relevos com declividades superiores a 45%, onde as formações superficiais são pouco espessas ou inexistentes, podendo apresentar pedregosidade e afloramentos rochosos.

Há predomínio de enxurradas e do escoamento superficial concentrado, que provocam a remoção total do horizonte A, atingindo diretamente o horizonte B dos solos, com a formação de ravinas e voçorocas.

Nestas áreas, profundas e extensas voçorocas efêmeras podem aparecer mesmo onde o gradiente das vertentes e a intensidade das chuvas sejam relativamente baixos, acreditando-se serem os sistemas de cultivo responsáveis por este problema ambiental.

As rápidas mudanças temporais no diagrama de escoamento de saturação não podem ser explicadas pelo fluxo de infiltração na camada do solo ao atingir uma camada de solo, fisicamente homogênea com uma condutividade hidráulica saturada normal. O fluxo na camada do solo é muito lento para produzir um escoamento de saturação, de modo que o fluxo de água subterrânea estagna, o nível da água sobe e transborda na superfície do solo e ocorre um fluxo superficial saturado (Figura 16 A).

Figura 16 - Esquema dos mecanismos de escoamento pluvial por excesso de saturação de escoamento superficial (A) e escoamento tubular (B).



Fonte: Kirkby, 1979 (Adaptado pelo autor)

3.4.5 Erosão processos em estágio de voçorocas – boçoroca

As voçorocas, ao contrário das ravinas, são feições erosivas relativamente permanentes com paredes laterais íngremes, que experimentam fluxos durante as chuvas torrenciais, estando quase sempre associadas à erosão acelerada.

As boçorocas são formas erosivas de grande porte que se desenvolvem geralmente em áreas de cabeceiras de drenagem com a ação das águas subsuperficiais (freático) por erosão interna (*piping*) (Figura 16 B), possuindo um fundo chato e paredes íngremes. No boçorocamento ocorre uma ação conjugada das águas superficiais e subsuperficiais, cuja erosão produzida por águas subterrâneas pode ocasionar desmoronamentos que induzem a formação de uma morfologia de anfiteatros nas cabeceiras das drenagens (Salomão, 1994). Esta forma erosiva possui inúmeras denominações no Brasil e demais países. A origem do conceito de boçoroca está relacionada à expressão do tupi-guarani “*yby soroc*” que significa rasgão da terra (Vieira, 1978). Internacionalmente, a feição geomorfológica denominada boçoroca recebe inúmeras denominações em vários países, como: cárcava nos países hispânicos, *barroca* em países lusófonos, *donga*

na África do Sul; *gully* nos Estados Unidos da América e *lavaka* em Madagascar (Vieira, 1978).

A partir de meados da década de 1990, alguns pesquisadores passaram a utilizar o conceito de voçoroca, e estes autores não apresentaram argumento científico para esta mudança conceitual. O conceito de voçoroca passou a ser amplamente utilizado no campo das Geociências nas últimas décadas.

3.4.6 Processos erosivos causadas pelo escoamento subsuperficial

O movimento lateral de água em subsuperfície, das camadas superiores do solo, tem se destacado nas pesquisas de Geociências mais específicas da Hidrologia. O escoamento subsuperficial, além de controlar o intemperismo, afeta diretamente a erodibilidade dos solos, através de suas propriedades hidráulicas, influenciando o transporte de minerais em solução. O escoamento subsuperficial, quando corre em fluxos concentrados, em túneis ou dutos, possui efeitos erosivos (Figura 19 B), que são bem conhecidos, provocando o colapso da superfície acima, resultando na formação de voçorocas.

Segundo (Oliveira, 1999), as erosões lineares são originadas através do intenso trabalho do escoamento superficial e subsuperficial nas vertentes. Se o escoamento linear perpetuar, pequenos canais podem evoluir, admitindo dimensões de vários metros de profundidade, largura e extensão, e passam a ser denominados de voçorocas. Na região dos Cerrados, as voçorocas geralmente se caracterizam por apresentar um canal principal central de maiores dimensões e uma rede de ravinhas e voçorocas menores conectadas ao canal principal. Além das voçorocas diferenciarem-se entre si pelas dimensões de ocorrência, se diferenciam também pelo afloramento ou não do lençol freático na base do canal, sendo então denominada de voçoroca seca (sem afloramento do freático) e voçoroca úmida (com afloramento do lençol freático).

Coelho Neto (1998, *apud* Oliveira, 1999), afirma que as erosões lineares são causadas por diferentes mecanismos que também variam de acordo com a escala temporal e espacial. Todos têm origem a partir de rotas tomadas pelos fluxos de água que ocorrem tanto em superfície quanto em subsuperfície. Baccaro e Oliveira (1999), também trabalha destacando a importância que estes dois tipos de

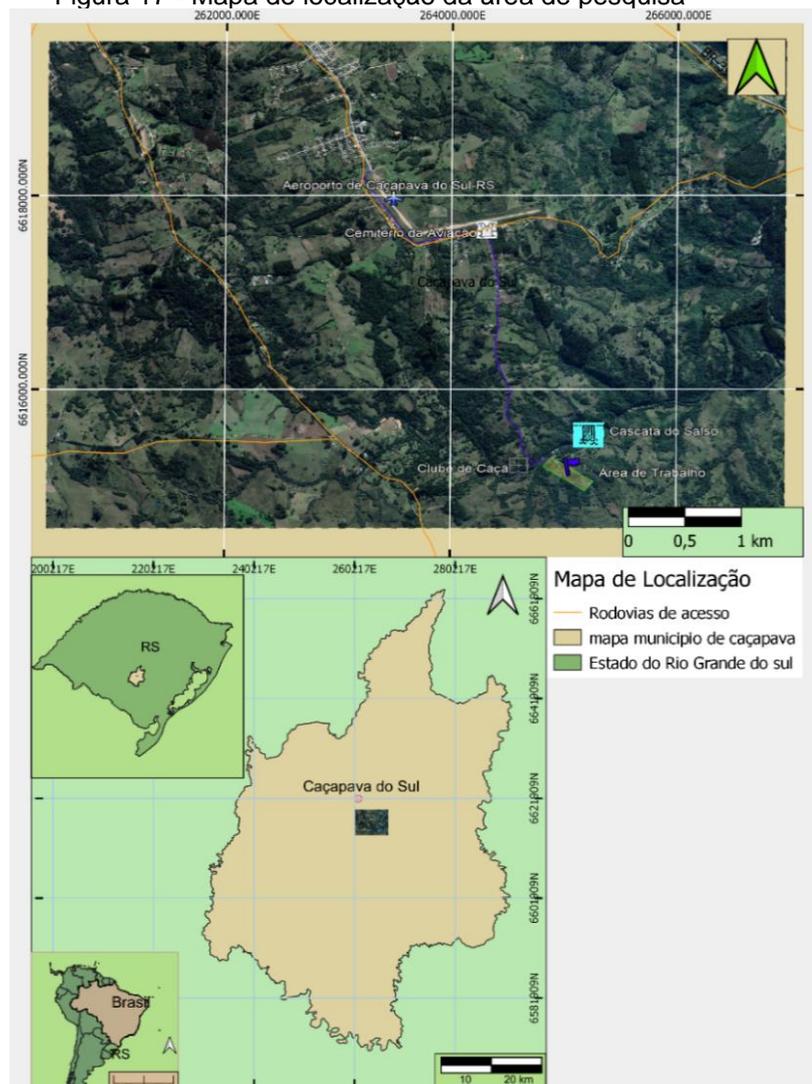
escoamento têm sobre a formação das erosões lineares no Cerrado, principalmente pela marcante presença da sazonalidade neste ambiente.

4.0 ÁREA DE ESTUDO

O município de Caçapava do Sul, está situado na porção central do Estado do Rio Grande do Sul, localizado a 264 km da capital Porto Alegre.

A área de estudo, localizada no Passo do Moinho, está localizada dentro do perímetro urbano municipal de Caçapava do Sul, com uma distância aproximada de nove km, (Figura 17) da área de trabalho. O acesso principal, se dá pela Avenida Santos Dumont, seguindo por via secundária pela Estrada da Aviação (rodovia não pavimentada), dobra à direita no Cemitério da Aviação e segue em sentido ao Clube de Caça e Pesca Caçapava do Sul.

Figura 17 - Mapa de localização da área de pesquisa



Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

As coordenadas da área de estudo são dadas pelos pontos:

Ponto A: 22 J 0265009 E / 6615151 N

Elevação: 288m

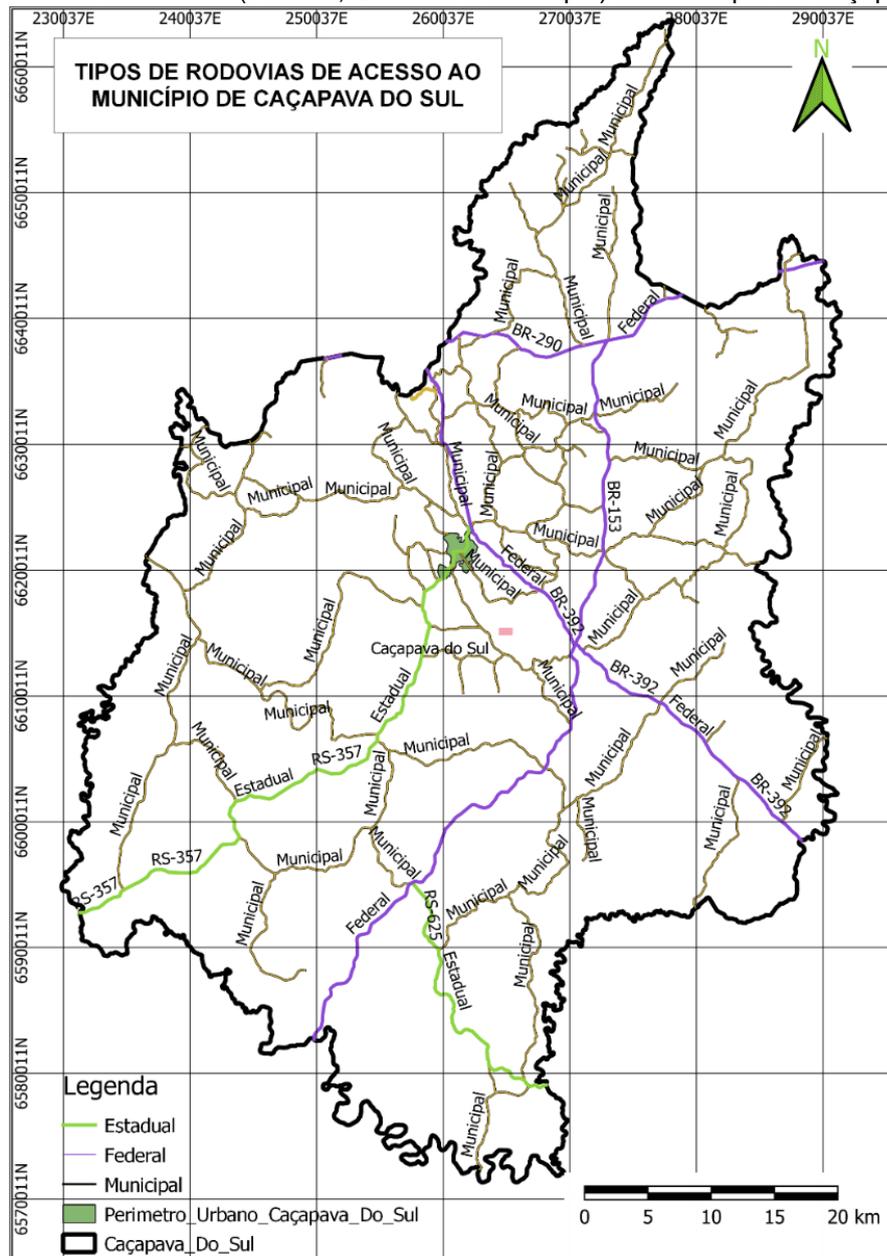
Ponto B: 22 J 0265125 E / 6615039 N

Elevação: 304 m

4.1 Rodovias de acesso ao município de Caçapava do Sul.

As principais Rodovias de acesso que interligam o Município de Caçapava do Sul são: Nordeste-Noroeste Br 290, ao Sul BR 153, Sudeste-Noroeste BR 392 e ao Sul as Rodovias RS625-RS357 e as Rodovias Municipais (Figura 18).

Figura 18 - Malha Rodoviária (Federal, Estadual e Municipal) do município de Caçapava do Sul.

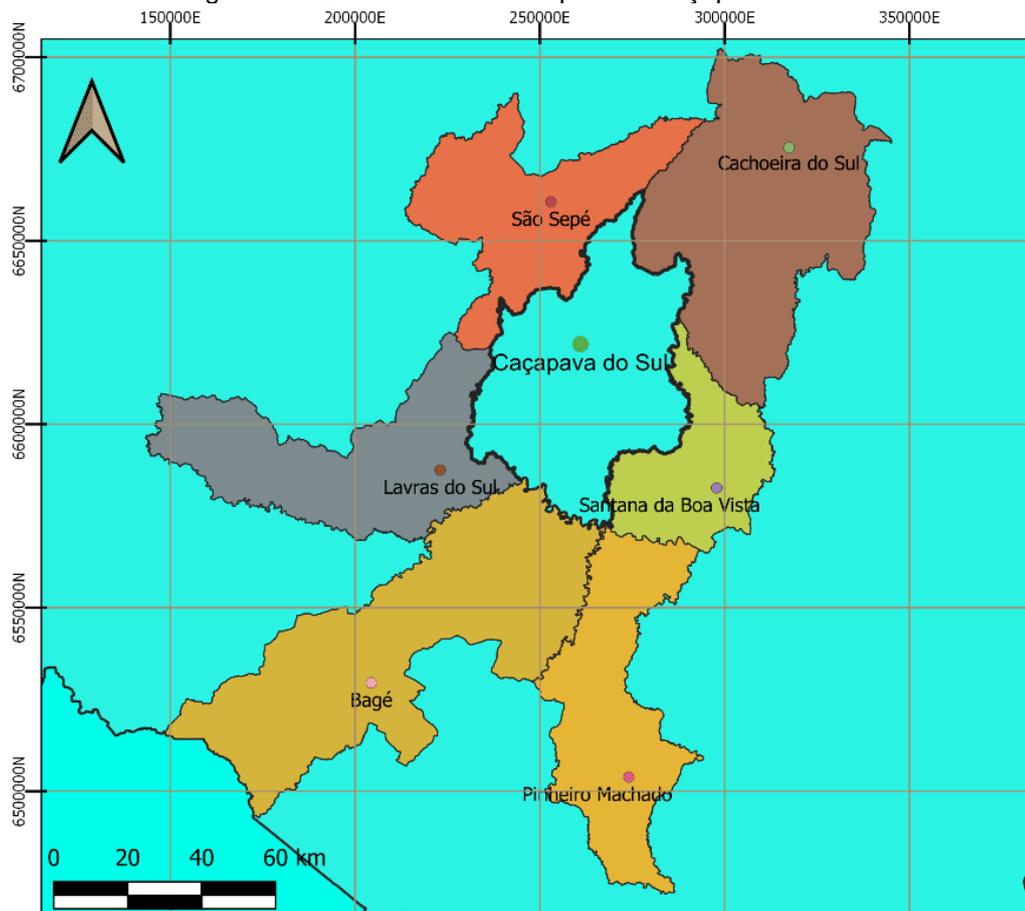


Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

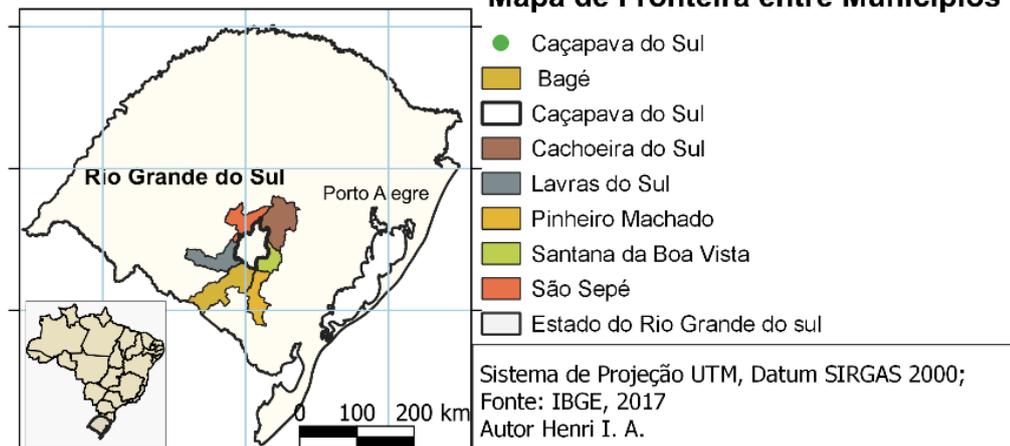
4.2 Limites territorial entre municípios

O município de Caçapava do Sul, situado na região da campanha (Sudeste Rio Grandense), se encontra centralizado fazendo limites com os municípios: São Sepé, Cachoeira do Sul, Santana da Boa Vista, Pinheiro Machado, Bagé e Lavras do Sul (Figura 19).

Figura 19 - Limites entre municípios de Caçapava do Sul.



Mapa de Fronteira entre Municípios



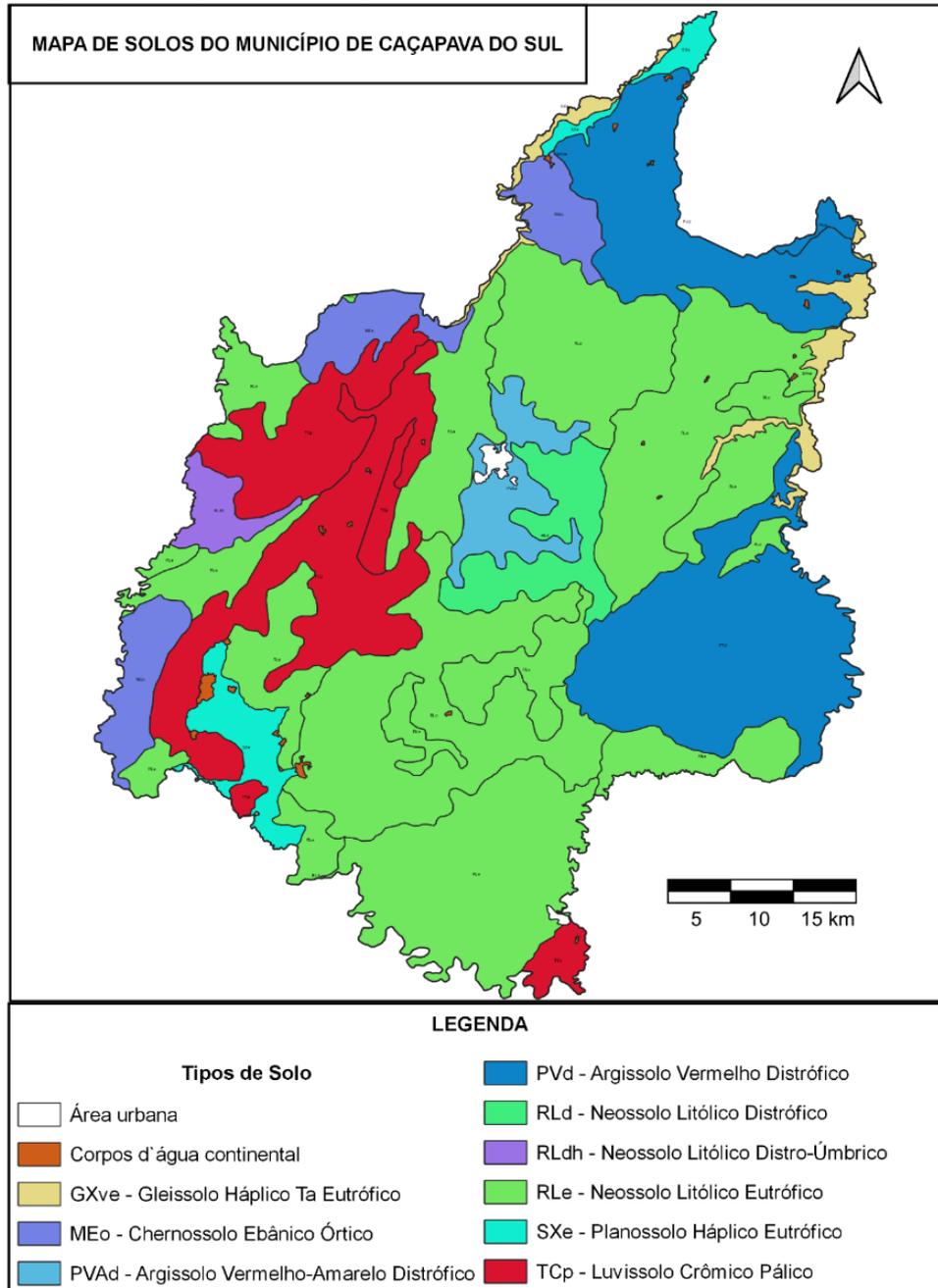
Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

4.3 Tipos de solos do município de Caçapava do Sul

Segundo os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Caçapava do Sul é composto por aproximadamente dez tipos de solos. Isso se deve às características e suas diversidades geológicas. A classificação de solo no Brasil é realizada por meio do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

(SiBCS), sendo baseada em características morfológicas e genéticas dos horizontes do solo (Figura 20).

Figura 20 - Mapa de distribuição dos solos do município de Caçapava do Sul.



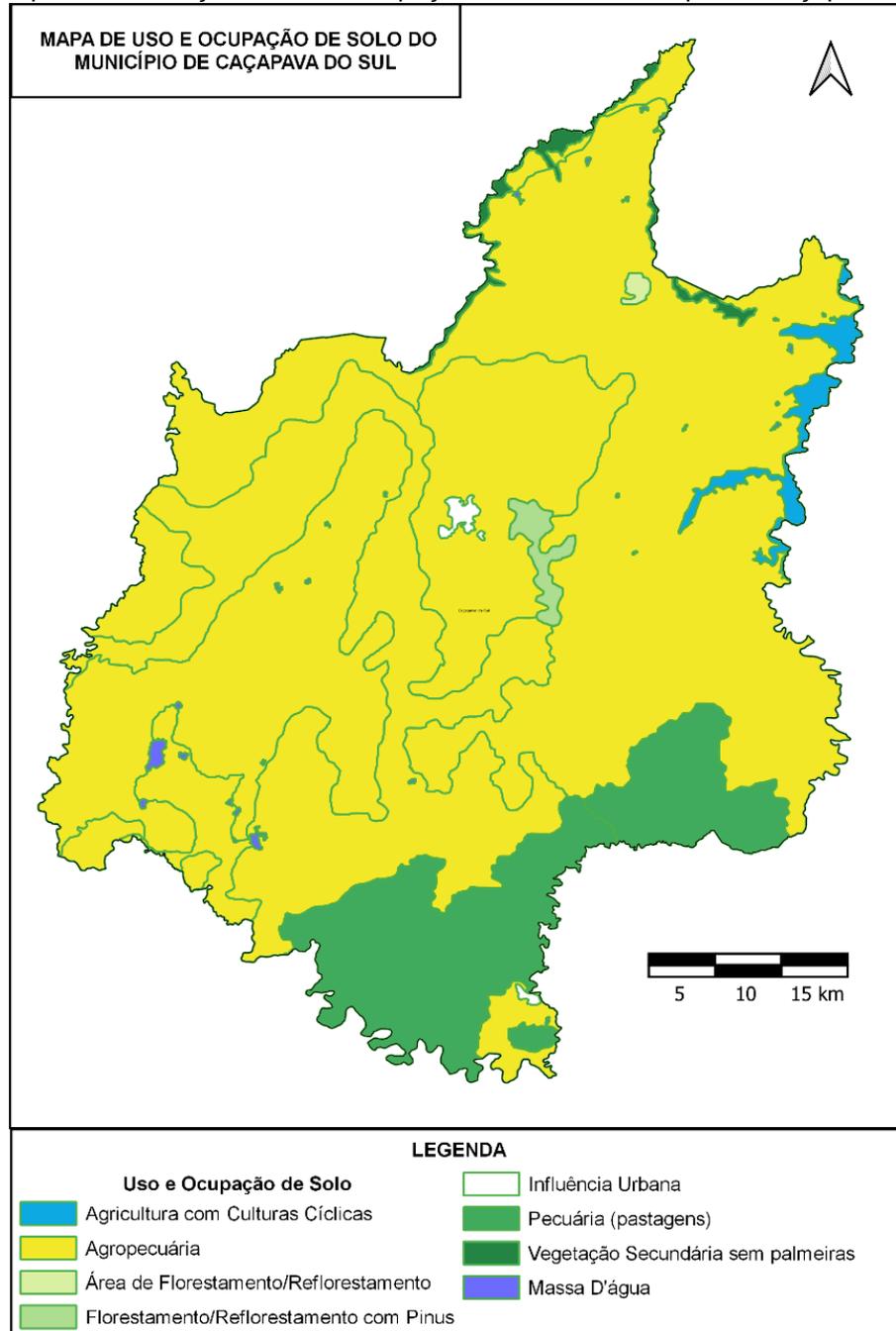
Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

4.4 Cultura do uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo (Figura 21), consiste no conjunto de atividades associadas ao cultivo do solo e à criação de animais. No município de Caçapava do Sul, a agropecuária sendo uma cultura híbrida entre a pecuária e a agricultura está inserida no setor primário da economia e, a ocupação e uso destas áreas predomina

em grande parte do município, seguido de grandes áreas da pecuária, mineração de calcário e áreas de reflorestamentos.

Figura 21 - Mapa de distribuição de uso e ocupação do solo do município de Caçapava do Sul.



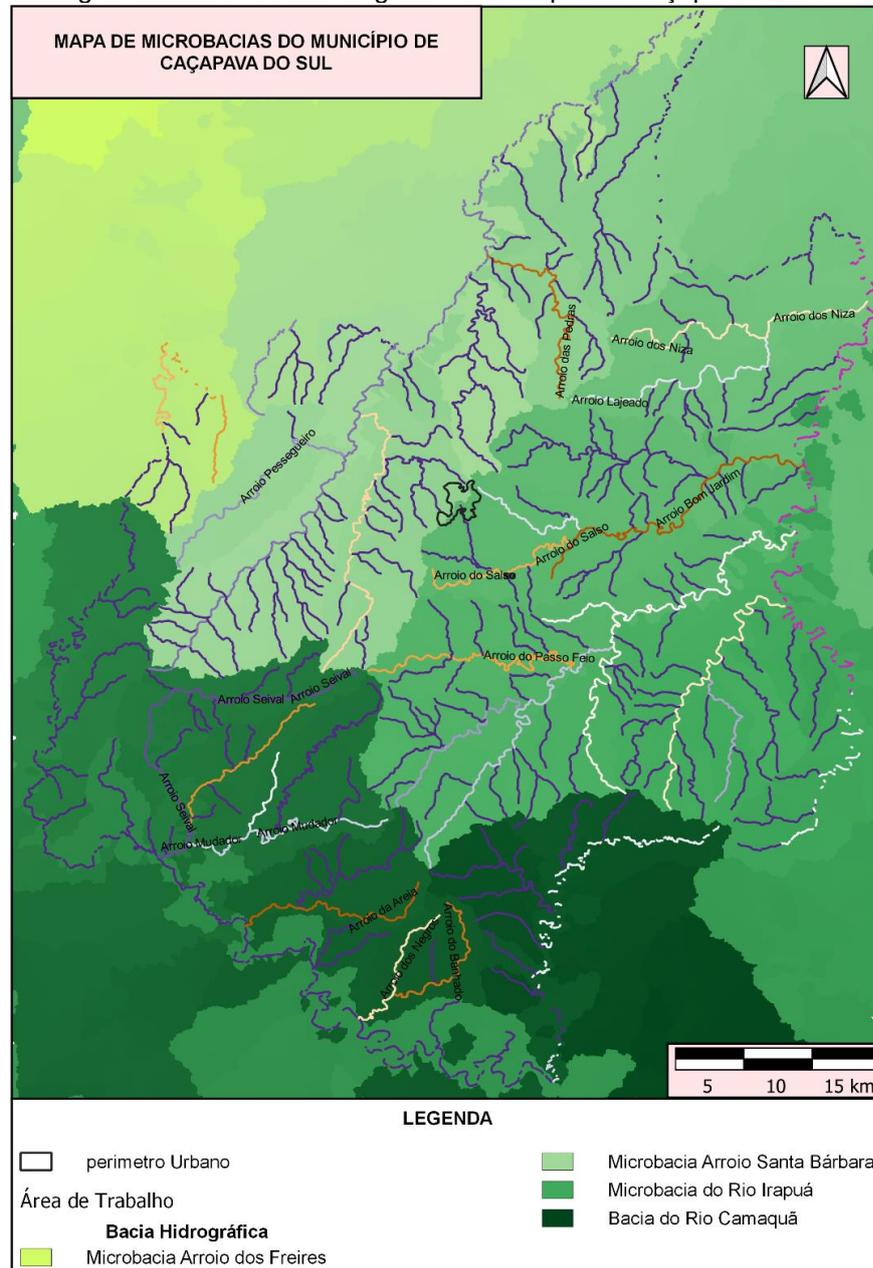
Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

4.5 Rede hidrográfica do município de Caçapava do Sul

O município de Caçapava do Sul, está inserido entre duas regiões hidrográficas do Estado do Rio Grande do Sul. Sendo a Região Hidrográfica do Litoral e a Região Hidrográfica do Guaíba.

Das microbacias e macrobacias hidrográficas (Figura 22), Caçapava do Sul está situado entre as microbacias do Santa Barbara (Noroeste), microbacia Arroio dos Freires (Oeste), microbacia do Irapuá (nordeste) e a macrobacia do Camaquã (Sul-Sudeste).

Figura 22 - Rede de Drenagem do município de Caçapava do Sul.



Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

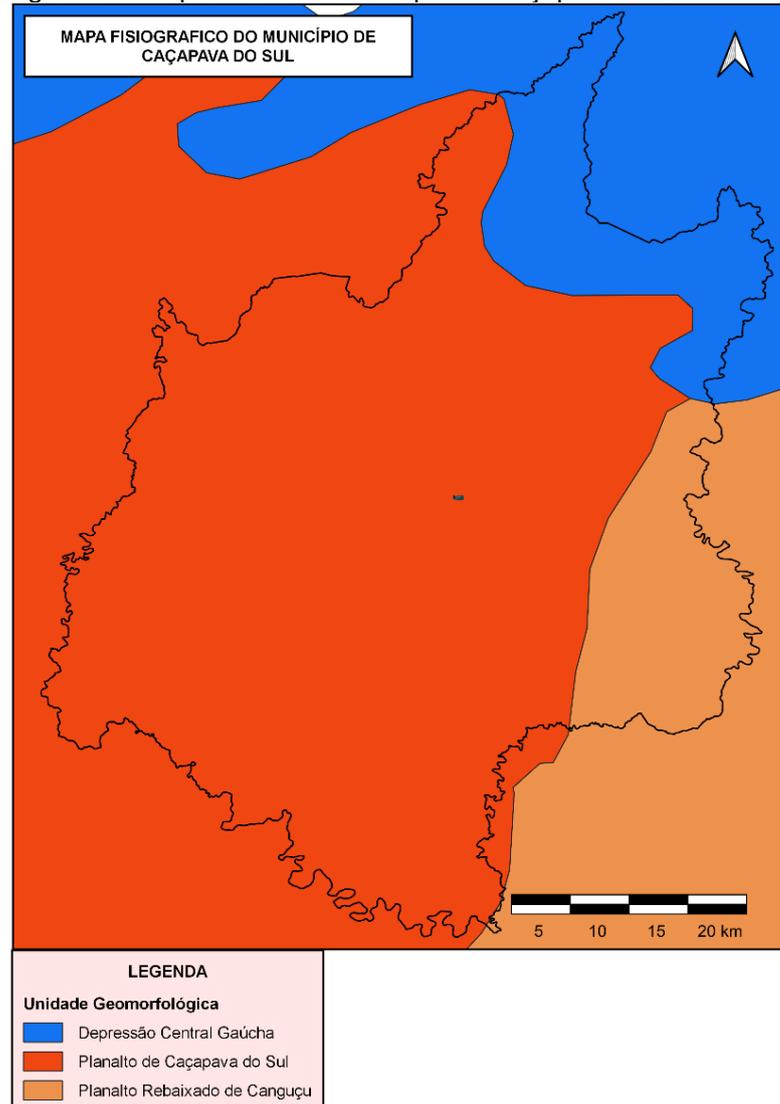
4.6 Geomorfologia do município de Caçapava do Sul

O município de Caçapava do sul, localizado no estado do Rio Grande do Sul, possui uma geografia diversificada que abrange três principais formas de relevo

(Figura 23) sendo, a Depressão central gaúcha (Norte), Planalto de Caçapava do Sul (Centro-Oeste) e o Planalto rebaixado de Canguçu (a Leste).

Essa diversidade de relevo influencia diretamente os ecossistemas locais, a vegetação, e as atividades econômicas da região, tornando Caçapava do sul uma área de interesse tanto para estudos geológicos quanto para a gestão ambiental e agrícola.

Figura 23 - Mapa do relevo município de Caçapava do Sul.



Fonte: Base cartográfica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

4.6.1 Depressão central gaúcha (Norte)

Esta área é caracterizada por extensas campinas e regiões com florestas de eucaliptos plantados, araucárias e florestas tropicais. A depressão central é uma

vasta planície que apresenta uma paisagem predominantemente plana, com vegetação nativa e cultivada.

4.6.2 Planalto de Caçapava do Sul (Centro-Oeste)

Com uma feição plana ou dissecada, o planalto de Caçapava do Sul possui um relevo homogêneo, atingindo uma altitude máxima de 450 metros em relação ao nível de base. Esta região é marcada por terrenos relativamente uniformes e, é limitada por bordas ovaladas que definem sua extensão.

4.6.3 Planalto rebaixado de Canguçu (Leste)

A Leste do município de Caçapava do Sul, encontra-se o planalto rebaixado de Canguçu, que se caracteriza por uma menor altitude em relação ao planalto de Caçapava do Sul. Esta área apresenta variações no relevo que incluem pequenas elevações e depressões, contribuindo para uma paisagem mais variada e acidentada.

4.7 Geologia local

O município de Caçapava do Sul, localizado no estado do Rio Grande do Sul, apresenta uma geologia rica e variada, influenciada por sua posição geográfica e pelas diversas formações geológicas que o compõem. O município é considerado a capital gaúcha da geodiversidade. Suas formas de relevo desempenham um papel crucial nesse reconhecimento.

4.7.1 Suíte Intrusiva Caçapava do Sul (NP3Yca)

A suíte granítica de Caçapava do Sul (Figura 24) linha hachurada, localizada na porção central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, é composta por um corpo granítico com dimensões de aproximadamente 25 km por 12 km. Este complexo intrusivo é formado por granodioritos, monzogranitos e sienogranitos, e sua idade magmática é datada em torno de 550 Ma, conforme registrado por isócrono de Rb/Sr e datação U/Pb SHRIMP em zircões (Sartori e Kawashita, 1985; Leite *et al.*, 1995). A

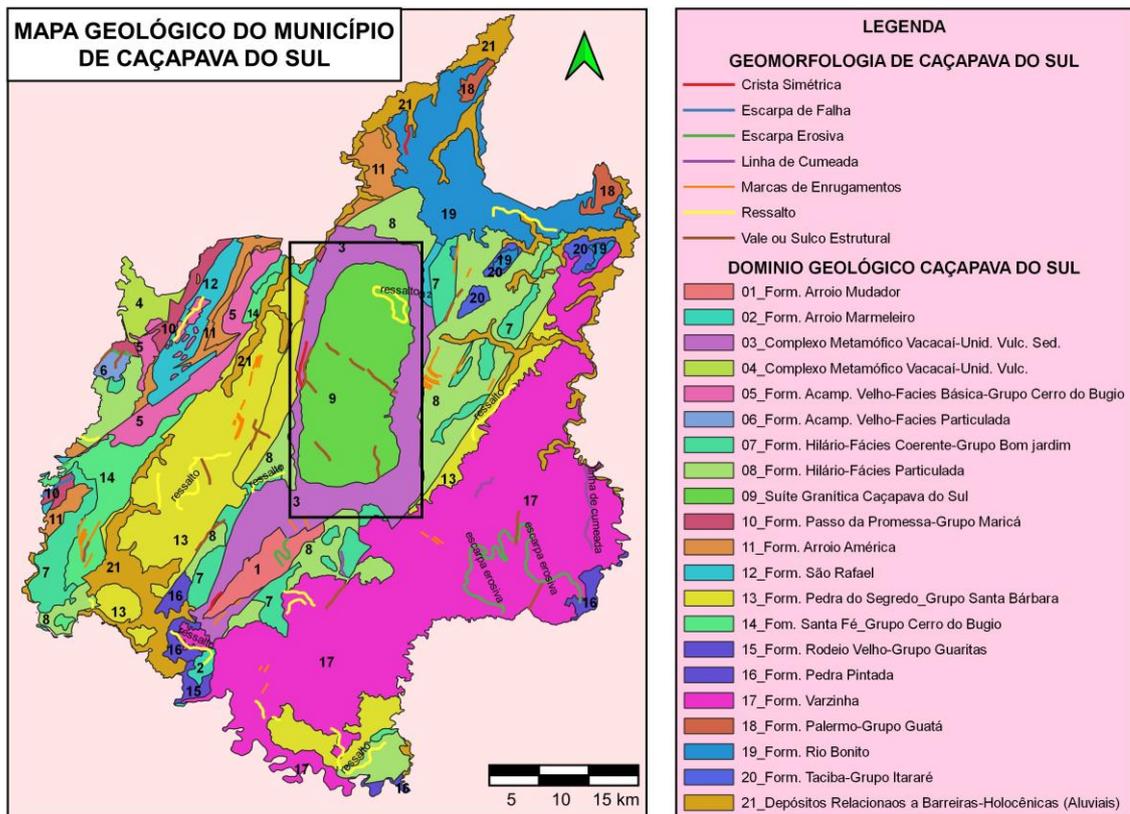
intrusão ocorreu em uma zona de cisalhamento durante as fases finais do ciclo Brasileiro/Pan-Africano (Nardi e Bitencourt, 1989). O corpo granítico é dividido em dois blocos contrastantes, limitados por estruturas de direção NW. No bloco norte, predominam leucogranitoides, enquanto no bloco sul afloram biotita granitoides, granodioritos e porções dioríticas. Dados gravimétricos sugerem a presença de uma raiz profunda de 4 km sob a área norte, indicando que o bloco sul representa uma porção mais profunda da intrusão (Nardi e Bitencourt, 1989; Costa *et al.*, 1995).

A geomorfologia da região é marcada pela presença de altos topográficos onde os leucogranitoides são mais abundantes no bloco norte. Essa morfologia sugere uma diferenciação na erosão e exposição dos diferentes tipos de rochas ao longo das estruturas de direção NW que dividem o corpo granítico (UFRGS, 1998).

O escudo Sul-rio-grandense, onde se localiza o complexo granítico de Caçapava do Sul, é uma importante característica geotectônica do sul do Brasil, que inclui áreas de embasamento paleoproterozoico e cinturões de dobramentos neoproterozoicos relacionados ao ciclo Brasileiro/Pan-Africano (Porada, 1979). Este ciclo envolveu eventos de acreção juvenil e retrabalhamento crustal posicionados na região entre 900 e 500 Ma (Chemale, 2000). Após a estabilização dos sistemas orogênicos no início do Paleozoico, o escudo Sul-rio-grandense atuou como um alto de embasamento persistente, compondo parte da margem sudeste da Bacia do Paraná (Milani, 1997).

Os processos evolutivos antes da orogenia incluem a formação e estabilização dos sistemas orogênicos durante o ciclo Brasileiro/Pan-Africano, que resultaram na acreção e retrabalhamento crustal na região entre 900 e 500 Ma (Chemale, 2000). Após a estabilização do supercontinente Gondwana, a região experimentou um regime tectônico convergente com a subducção da placa Panthalassa sob a margem sul do continente. Este cenário tectônico convergente é subdividido em dois ciclos principais: o Famatiniano (Ordoviciano a Devoniano) e o Gondwanico (Carbonífero e Permiano) (Ramos, 1990). A transição para um regime tectônico extensional ocorreu na fronteira Permiana/Triássica, culminando na ruptura final de Gondwana durante o Jurássico/Cretáceo e na abertura do oceano Atlântico Sul (Ramos e Kay, 1991; Mpodozis e Kay, 1992; Uliana *et al.*, 1989; Franzese e Spalletti, 2001).

Figura 24 - O mapa apresenta as formações geológicas, a feição hachurada corresponde à Suite Granítica Caçapava do Sul.



Fonte: Base cartografica do IBGE, 2017, (Adaptado pelo autor)

5.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada no estudo "Processos Erosivos: Estudo de Caso na Estrada da Aviação no Município de Caçapava do Sul - RS" inclui diversas etapas, que vão desde a coleta de amostras até a análise laboratorial.

1. Levantamento aerofotográfico: utilizando um drone DJI Phantom 4 Pro equipado com uma câmera de 20 megapixels, é realizado um levantamento aerofotográfico da área. Essa técnica oferece uma visão ampla e precisa da área, permitindo identificar padrões de erosão, mudanças na topografia e características específicas da paisagem.
2. Observação In Situ dos Processos Erosivos: a observação in situ envolve visitas de campo para observar diretamente os processos erosivos e suas consequências no ambiente. Durante essas visitas, são realizadas medições e registradas as características específicas da erosão, como a formação de voçorocas e a presença de barreiras naturais.

3. Coleta de amostras de solo para análise geotécnica: é a base para entender as características do solo da área estudada. As amostras são coletadas em diferentes pontos da estrada para análise posterior em laboratório.
4. Análise Laboratorial das Amostras: as amostras coletadas são submetidas a uma série de análises laboratoriais para determinar suas propriedades físicas e químicas. Isso inclui análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos, teor de umidade natural, limites de Atterberg, índice de vazios, compactação (CBR) e permeabilidade à carga variável.

5.1 Etapa de campo

Com o objetivo de compreender melhor os impactos dos processos erosivos do solo foram propostos um trabalho de campo metuculoso dividido em três etapas.

5.2 Levantamento aerofotográfico

Na primeira etapa de campo, realizada na Estrada da Aviação no Passo do Moinho, utilizou-se um drone modelo DJI Phantom 4 Pro equipado com uma câmera de 20 megapixels. Essa abordagem proporcionou uma visão ampla e precisa, permitindo identificar padrões de erosão, mudanças na topografia e características específicas da paisagem.

5.3 Observação e descrição de campo

Durante a observação em campo, a (Figura 25) revela uma significativa exposição de camadas de solo inferiores, resultante da erosão intensa. Essa exposição é evidenciada pela presença de blocos de rocha (matacões) depositados na superfície do solo ou parcialmente enterrados. O volume considerável desses matacões em áreas de degradação sugere um ambiente geológico e geomorfológico específico, onde a ação erosiva removeu as camadas superficiais de solo, expondo as camadas mais profundas.

A análise da imagem aérea, juntamente com o trabalho de campo, é crucial para compreender a dinâmica do solo, os processos de erosão e a evolução da paisagem. A observação detalhada das voçorocas e das barreiras naturais, como os

pegmatitos, fornece insights valiosos sobre os processos erosivos e suas consequências no ambiente.

Figura 25 – Nesta imagem, evidenciamos um ponto crítico onde a erosão intensa revela as camadas mais profundas do solo.



Fonte: Autor

A imagem (Figura 26), mostra um talude com sinais avançados de erosão. É possível observar a exposição do solo, formação de sulcos e deslizamentos. A presença de rochas e pedras indica a remoção de materiais mais finos, enquanto a vegetação circundante está comprometida, potencializando o processo erosivo. O solo exposto é visível na parte superior do talude, onde a vegetação foi removida.

Pequenos canais formados pela ação da água são visíveis, indicando onde a água de escoamento superficial concentra-se e transporta o solo. Esses sulcos podem evoluir para ravinas maiores se a erosão continuar sem controle.

Figura 26 – Evolução da erosão sobre talude no Passo do Moinho, Caçapava do Sul.



Fonte: Autor

Figura 27 - Veio de pegmatito granítico



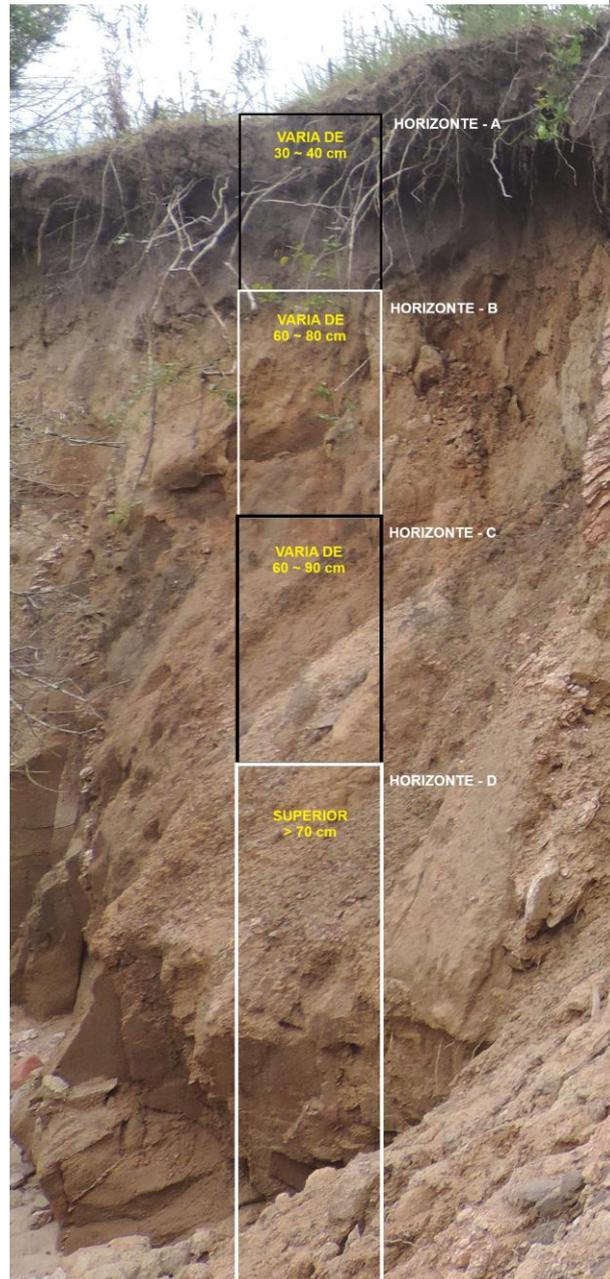
Fonte: Autor

Os pegmatitos presentes na região atuam como barreiras naturais, influenciando o fluxo de água e a distribuição dos sedimentos.

Estas intrusões ígneas, devido à sua composição mineral e resistência à erosão, desempenham um papel crucial na contenção dos processos erosivos.

Durante a etapa de campo, foram observadas áreas onde os pegmatitos interrompem a progressão da voçoroca, formando uma espécie de defesa natural que retarda a erosão adicional (Figura 27).

Figura 28 - Perfil de solo com diferentes horizontes em exposição.



Fonte: Autor

A imagem (Figura 28), mostra um perfil de solo exposto, revelando diferentes horizontes que variam em composição e características físicas. Esse perfil é essencial para a interpretação das condições do solo em trabalhos de campo, como estudos geotécnicos, ambientais e agronômicos.

1. O Horizonte (A), também conhecido como Horizonte orgânico ou de acumulação de matéria orgânica é a camada superficial, com espessura observada em campo de 30 - 40 cm. As características dessa camada são definidas pela sua coloração por ser rica em matéria orgânica, apresenta uma cor mais escura e contém raízes de plantas. Pode apresentar uma textura mais fina e uma estrutura granular devido à decomposição de matéria orgânica e atividade biológica.
2. O Horizonte (B) tem uma espessura que varia de 60 - 80 cm. Esta camada é caracterizada pela acumulação de materiais lixiviados do Horizonte (A), como argilas, óxido de ferro e alumínio. Apresenta uma cor mais avermelhada ou amarelada, indicando a presença de óxidos de ferro. Este horizonte pode ser mais argiloso e apresentar uma estrutura mais massiva ou blocos maiores, refletindo a acumulação de argilas e óxidos de ferro.
3. O Horizonte (C), possui uma espessura superior a 60 – 90 cm. A camada mais profunda parece ainda mais clara, possivelmente indicando a presença do horizonte C. Este horizonte pode variar em cor, mas geralmente é mais claro que os horizontes superiores. Este horizonte é menos afetado por processos biológicos e químicos que ocorrem nos horizontes superiores.
4. O Horizonte (D), possui uma espessura superior a 70 cm. Esta é a camada mais profunda do talude e que avança até o fundo da voçoroca. Composta por fragmentos de rocha em decomposição. Na parte inferior da imagem, é possível observar blocos maiores e fragmentos de rochas, indicando a presença do material de origem ou rochas parcialmente alteradas.

Evidências de fluxo hidráulico tipo "pipe" (Figura 29) contribuindo para a formação da ravina. O fluxo hidráulico tipo "pipe" é um fenômeno subterrâneo onde a água se move através de canais ou tubos formados dentro do solo, resultando em erosão interna. Este processo pode levar à formação de ravinas ou outros tipos de erosão significativa na superfície do solo.

O fluxo "pipe" geralmente inicia-se em solos que possuem uma camada permeável sobre uma camada menos permeável. A água infiltra-se na camada

superior e começa a se acumular sobre a camada inferior, que impede a drenagem rápida. A água acumulada encontra caminhos de menor resistência, formando canais subterrâneos à medida que flui.

Figura 29 - Processo de erosão em ravina, evidências de fluxo hidráulico tipo "pipe".



Fonte: Autor

Estes canais são conhecidos como "pipes". O movimento da água remove partículas de solo dentro dos "pipes", ampliando os canais e enfraquecendo a estrutura do solo acima. À medida que os "pipes" se expandem, o solo acima pode colapsar, resultando em buracos e ravinas na superfície (Figura 32).

O pegmatito, uma rocha ígnea de granulação grossa, é comumente encontrado em áreas de erosão. A presença de pegmatito pode tanto resistir quanto

canalizar a erosão, dependendo da sua estrutura e da quantidade de água envolvida (Figura 30).

Figura 30 - Erosão tipo “pipe” sobre soleira de pegmatito.



Fonte: Autor

A presença de materiais soltos e fragmentados ao redor da ravina sugere a remoção de partículas de solo por fluxo subterrâneo.

5.4 Coletas de amostra de solo para análise geotécnico

Na terceira etapa de campo, foram coletadas amostras de solo deformadas sob o substrato da rodovia. Essas coletas foram detalhadas em uma ficha de

mecânicas e físicas do solo, que são fundamentais para projetos de engenharia, como construção de fundações, estabilização de taludes, pavimentação, entre outros.

Figura 32 - Coleta de amostras de solo para ensaios Geotécnicos.



Fonte: Autor

A camada superior do solo é composta por um material mais solto e granular, apresenta uma textura arenosa e parece ser facilmente desagregável.

Abaixo da camada superficial, o solo parece mais coesivo e compactado, possivelmente indicando a presença de argila ou uma mistura de material argiloso e silte. A textura é mais firme e menos granular que a camada superior, sugerindo maior coesão.

5.5 Etapa de gabinete

Nesta etapa, realiza-se uma pesquisa aprofundada nas fontes bibliográficas disponíveis sobre processos erosivos, incluindo livros, artigos, monografias e materiais publicados. A abordagem envolve a exploração de fontes especializadas, o acesso a imagens de satélite, e a consulta de dados meteorológicos em sites especializados. Além disso, realiza-se uma análise integrada dos princípios das ciências da Terra para compreender melhor os processos e fatores envolvidos na

erosão. Esta fase é fundamental para embasar teoricamente o estudo e orientar as etapas subsequentes do trabalho, como a etapa de campo e os ensaios laboratoriais

5.6 Etapa de laboratório

As amostras em laboratório, foram mantidas em local adequado, de forma a preservar suas características, assim como retiradas em campo.

Os métodos utilizados para a execução dos ensaios, seguiram fielmente as normas brasileiras (NBR), nas situações em que estas encontram-se disponíveis. Para aqueles ensaios que não são normatizados pela ABNT, seguiu-se as orientações da norma americana (ASTM) ou do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

5.6.1 Ensaio simples

São considerados ensaios simples, os ensaios de caracterização (análise granulométrica, determinação da massa específica dos grãos, limites de consistência), do teor de umidade natural, da massa específica aparente, de compactação, dos índices de vazios máximo e mínimo, de permeabilidade (à carga constante ou à carga variável), de compressão simples e do Índice de Suporte Califórnia e expansão.

Os ensaios simples, também conhecidos como ensaios de caracterização, são métodos fundamentais para determinar as propriedades básicas do solo. São fundamentais na engenharia geotécnica, fornecendo dados críticos para uma variedade de aplicações e ajudando a garantir a segurança e a estabilidade das estruturas construídas sobre ou dentro do solo, proporcionando informações vitais para a construção segura e eficaz de estruturas que interagem com o solo.

5.6.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica é um processo utilizado na engenharia geotécnica para determinar a distribuição de tamanhos das partículas de um solo. Esse ensaio é essencial para classificação do solo e para entender suas propriedades mecânicas.

5.6.3 Método de Ensaio Granulométrica

O método de análise granulométrica por peneiramento, destinado a partículas grossas, tem como objetivo determinar a distribuição granulométrica de partículas maiores que 0,075 mm (número da peneira 200). Para a execução desse ensaio, utiliza-se um conjunto de peneiras padronizadas, um agitador de peneiras e uma balança de precisão.

O procedimento inicia-se com a separação da amostra de solo, que é seca em estufa. Em seguida, a amostra seca é pesada e colocada no conjunto de peneiras. O conjunto de peneiras é então agitado mecanicamente por um tempo específico. Após a agitação, o material retido em cada peneira é pesado individualmente.

Com base nos pesos obtidos, calcula-se a distribuição granulométrica da amostra, que é representada em um gráfico de distribuição cumulativa. Este gráfico permite visualizar a proporção de diferentes tamanhos de partículas presentes na amostra, fornecendo informações essenciais para a classificação do solo e suas propriedades físicas.

Figura 33 - A esquerda conjunto de peneira para análise granulométrica, a direita material retido após o peneiramento.



Fonte: Autor

O método de análise granulométrica por sedimentação é utilizado para determinar a distribuição granulométrica de partículas menores que 0,075 mm. Este ensaio é essencial para caracterizar as frações finas do solo, como silte e argila. Para a realização do ensaio, são necessários os seguintes equipamentos: uma balança de precisão, um cilindro de sedimentação, um densímetro e um agitador.

O procedimento inicia-se com a dispersão da amostra de solo em uma solução de dispersante, o que ajuda a separar as partículas finas. A suspensão de solo resultante é então colocada no cilindro de sedimentação. Em intervalos de tempo específicos, são realizadas leituras com o densímetro para medir a densidade da suspensão em diferentes profundidades.

Os dados obtidos são analisados utilizando a lei de Stokes, que permite calcular o tamanho das partículas com base na taxa de sedimentação. Este método fornece uma distribuição granulométrica detalhada das partículas finas do solo, essencial para diversas aplicações geotécnicas e ambientais.

Figura 34 - Proveta de vidro capacidade 1000 ml para sedimentação



Fonte: Autor

5.6.4 Umidade higroscópica

É a quantidade de água que um solo absorve da atmosfera até atingir um equilíbrio com a umidade do ar circundante. Este valor é geralmente medido em laboratórios, onde as amostras de solo são deixadas em um ambiente controlado com uma umidade relativa específica até que não haja mais variação de peso na amostra.

Solos com alta umidade higroscópica têm uma maior capacidade de reter água, o que pode afetar suas propriedades de expansão e contração.

Os dados apresentados na (Tabela 9) (ANEXO A), referem-se às medições da umidade higroscópica de diferentes amostras de solo, coletadas e analisadas em laboratório. As amostras foram pesadas antes e depois de serem secas, permitindo a determinação da massa de água absorvida e, conseqüentemente, da umidade higroscópica.

5.6.5 Determinação da massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos de solo (ou densidade dos grãos) é a relação entre a massa dos grãos do solo e o volume que eles ocupam, excluindo os espaços de ar entre eles. Este valor é importante na engenharia geotécnica para diversas análises e cálculos.

O ensaio de determinação da massa específica dos grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 e dos grãos de solos que passam na abertura 4,8 é normatizado pelo Anexo B da NBR 6458:2016. Consiste em uma característica física do solo, relacionada a composição mineralógica dos seus constituintes.

A massa específica real é numericamente igual a densidade do mineral que constitui os grãos e pode ser determinada utilizando um picnômetro, e o ar do solo é retirado através de bomba de vácuo. Os resultados dos ensaios são apresentados em planilha de acompanhamento do ensaio, em conformidade com as normas da ABNT, contendo a média de pelo menos duas determinações de massa específicas consideradas satisfatórias, e valor do teor de umidade.

O valor da massa específica (δ) é utilizado nos cálculos de análise granulométrica por sedimentação na determinação de relações volumétricas das

fases do solo e como indicação da natureza mineralógica do solo ou de suas frações.

A determinação da densidade real dos grãos de solo é um ensaio fundamental na caracterização geotécnica dos materiais.

1. Secagem da Amostra: A amostra de solo deve ser seca em uma estufa a uma temperatura entre 105 °C e 110 °C até atingir uma massa constante. Este processo garante que toda a umidade seja removida, proporcionando uma medida precisa da massa sólida do solo.
2. Resfriamento da Amostra: Após a secagem, a amostra deve ser resfriada em um dessecador para evitar a absorção de umidade do ar ambiente, o que poderia afetar a precisão das medições subsequentes.
3. Pesagem do Picnômetro Vazio: O picnômetro vazio e seco é pesado com precisão. Esta medida é necessária para todas as pesagens subsequentes.
4. Adição de Solo ao Picnômetro: Cerca de 50 gramas de solo seco são pesados e adicionados ao picnômetro. O conjunto picnômetro + solo é então pesado. Esta etapa é crucial para determinar a massa do solo utilizado no ensaio.
5. Submersão do Solo: Água destilada é adicionada ao picnômetro até que o solo esteja completamente submerso. É importante eliminar qualquer bolha de ar presa no solo, o que pode ser feito através da aplicação de vácuo ou fervendo a água com o solo.
6. Completar o Picnômetro: Após assegurar que não há bolhas de ar, o picnômetro é preenchido com água destilada até a marca de calibração. Este passo assegura que o volume total do picnômetro está sendo utilizado para a medição.
7. Pesagem do Conjunto: O picnômetro contendo o solo e a água é pesado. Esta medida é necessária para calcular o volume de água deslocado pelo solo.
8. Pesagem do Picnômetro com Água: O picnômetro é esvaziado e novamente preenchido apenas com água destilada até a marca de calibração e pesado. Esta pesagem final permite calcular o volume de água que o picnômetro pode conter.

Através dessas etapas, é possível determinar a densidade real dos grãos de solo. A densidade real é calculada utilizando a diferença de massa e volume de água deslocado, permitindo uma compreensão precisa da massa dos sólidos em relação ao volume ocupado pelos grãos do solo. Este ensaio é essencial para

diversas aplicações na engenharia geotécnica, incluindo a análise de compactação, resistência e comportamento dos solos em diferentes condições ambientais.

Figura 35 - A esquerda preparação da amostra para os ensaios de massa específica real dos grãos (MER), a direita execução do ensaio de massa específica real dos



Fonte: Autor

5.6.6 Teor de umidade natural

O teor de umidade natural de um solo é a relação entre a massa de água presente nos poros do solo e a massa do solo seco, expressa como uma porcentagem. Este parâmetro é fundamental para diversas análises geotécnicas, pois influencia diretamente as propriedades mecânicas do solo. Para isto, obtêm-se a massa do solo úmido e a massa do solo seco (secagem na estufa), tomando o cuidado para garantir que toda a água do sistema evaporou, o que pode ser certificado com pesagens sucessivas sem notar variação de massa. A diferença entre a massa de solo úmido e a massa de solo seco corresponde à massa de água no solo. Dessa forma é possível determinar o teor de umidade do solo, relacionando a massa de água e a massa de solo seco. Os procedimentos para a realização do ensaio são de acordo com a norma técnica NBR 6457:2016.

5.6.7 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg são usados para descrever a consistência e as propriedades físicas de solos finos (argilas e siltes) em diferentes estados de umidade. Eles foram desenvolvidos por Albert Atterberg, um engenheiro agrônomo sueco, e são amplamente utilizados na engenharia geotécnica para classificação de solos e previsão de seu comportamento. Existem três principais Limites de Atterberg: Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Contração (LC). O Limite de Liquidez é a umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido.

A determinação do Limite de Liquidez é feita pelo aparelho Casa grande. O aparelho consiste em uma concha de latão sobre suporte de ebonite. Por meio de um excêntrico imprime-se à concha repetidas quedas de altura de 1 cm e intensidade constante.

Figura 36 - Aparelho de ensaio para determinação do limite de liquidez pelo método Casa Grande



Fonte: Didática SP

Atterberg baseou-se no fato que quando o material é fluido toma a forma do recipiente que o contém. Assim, quando colocada uma fração de solo no recipiente, com um sulco aberto, e ao imprimir um choque à concha através de quedas, o sulco se fecha. Repetindo-se a experiência com umidades diferentes, traça-se a linha de escoamento do material (gráfico umidade x nº de golpes para fechar o sulco na amostra). Por definição, o limite de liquidez é o teor de umidade para qual o sulco se fecha com 25 golpes. Os procedimentos para a realização dos ensaios são de acordo com a norma técnica NBR 6459:2016.

O limite de plasticidade (LP) foi determinado originalmente por Atterberg pelo cálculo do teor de umidade na qual o solo começa a se fraturar, quando se tenta

moldar com ele um cilindro de diâmetro de 3 mm. Modernamente o ensaio foi padronizado especificando-se que essa moldagem deve ser feita por movimentos regulares dos dedos das mãos sobre uma placa de vidro fosco colocada em superfície horizontal. Ao rolar-se a amostra, essa vai progressivamente perdendo a umidade até chegar ao ponto em que o cilindro começa a partir. Determina-se então a umidade da amostra e esse é o Limite de Plasticidade. Os procedimentos para a realização dos ensaios são de acordo com a norma técnica NBR 7180:2016.

Figura 37 - Resultado do ensaio para limite de plasticidade



Fonte: Autor

Os ensaios Limites de Atterberg são usados para diferenciar solos coesivos de não coesivos e classificá-los em categorias como argilas de alta plasticidade ou siltes de baixa plasticidade. Prever o comportamento do solo sob diferentes condições de umidade é crucial para a engenharia geotécnica e para projetos de construção.

A capacidade do solo de suportar cargas aplicadas é diretamente afetada por seu teor de umidade. Um solo seco geralmente tem maior resistência e capacidade de suporte de carga. Em um solo saturado, a resistência pode diminuir significativamente, levando ao colapso ou assentamento excessivo das estruturas. Alguns tipos de solos, especialmente argilas, são suscetíveis à expansão e contração devido a variações no teor de umidade.

5.6.8 Utilização dos Limites de Atterberg na avaliação de riscos

1. Determinar a susceptibilidade do solo a problemas como expansão, contração e liquefação. Quando absorvem água, os solos expansivos aumentam de volume, o que pode levar ao levantamento de fundações, pavimentos e outras

estruturas. Quando perdem água, esses solos diminuem de volume, o que pode causar rachaduras e danos estruturais.

2. A umidade do solo influencia a estabilidade de encostas e taludes, solo saturado, pode levar à diminuição da coesão e do ângulo de atrito interno, aumentando o risco de deslizamentos de terra.
3. A gestão da umidade do solo é fundamental para o controle da erosão e a gestão da infiltração, a umidade excessiva pode levar à erosão superficial, especialmente em solos não coesivos.

A previsão do comportamento do solo sob diferentes condições de umidade é essencial para garantir a segurança, estabilidade e durabilidade de estruturas e infraestruturas. Essa previsão ajuda a evitar falhas estruturais, controlar a erosão, planejar sistemas de drenagem eficientes e projetar fundações adequadas, resultando em projetos mais seguros e econômicos.

5.6.9 Índice de Vazios

O índice de vazio representa a razão entre o volume de vazios e o volume ocupado pela parte sólida em um solo. Na execução deste ensaio, normalmente interessa o índice de vazios mínimos e o índice de vazios máximos, os quais são normatizados pela NBR 12051 e pela NBR 12004 (MB 3324) respectivamente. O cálculo do seu valor é dado em função do peso específico das partículas e do peso específico aparente seco. Esse parâmetro fornece informações da densificação dos solos, já que a redução de volume de um maciço resulta principalmente da diminuição do volume de vazios.

O ensaio de índice de vazios mínimos é realizado através do enchimento de um molde cilíndrico e a seguir recalque do material para posicionamento da sobrecarga sobre a superfície da amostra de solo e, por fim, vibração do conjunto de forma a reduzir ao máximo os espaços vazios. O valor é obtido através da relação entre a massa da amostra do solo seca e do volume da amostra do solo densificado. Para a determinação do índice de vazios máximo, coloca-se suavemente o material em um cilindro, não permitindo sua vibração e acumulação das partículas. Após rasar o excesso, determinar a massa do conjunto, e em posse do volume e massa do cilindro, torna-se possível determinar o índice de vazios máximo.

5.6.10 Importância do Índice de Vazios no Solo

A razão do índice de vazios é essencial para entender as propriedades mecânicas do solo, como a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade. Solos com menor índice de vazios tendem a ter maior capacidade de suporte de carga. Solos com altos índices de vazios podem ser mais suscetíveis à liquefação, especialmente durante terremotos. O índice de vazios influencia diretamente a permeabilidade do solo. Solos com altos índices de vazios permitem maior fluxo de água, aumentando o risco de erosão.

Essas considerações mostram a importância de medir e entender o índice de vazios para diversas aplicações em engenharia geotécnica, desde a previsão de comportamento do solo até o design de soluções para prevenir erosão.

Os ensaios de índice de vazios mínimo e máximo foram realizados para determinar as propriedades físicas das amostras de solo coletadas. Para a execução desses ensaios, foi necessário preparar conjuntos específicos com o material de solo. O ensaio para determinar o índice de vazios mínimo de um solo envolve uma sequência de etapas meticulosas para garantir a precisão dos resultados. A seguir, são descritas as etapas do procedimento:

1. **Secagem e Homogeneização:** Inicialmente, as amostras de solo foram secas em estufa a uma temperatura de 105°C até atingirem um peso constante. Este processo garante que toda a umidade seja removida, proporcionando uma base uniforme para o ensaio. Após a secagem, as amostras foram homogeneizadas para assegurar a uniformidade do material, eliminando variações que poderiam afetar os resultados.
2. **Preenchimento do Recipiente:** O recipiente padrão utilizado para o ensaio foi preenchido com a amostra seca. Para assegurar a compactação mínima do solo, foi utilizado o método de vibração durante o preenchimento. Este método é essencial para simular a condição de menor densidade possível, que é necessária para calcular o índice de vazios mínimo.
3. **Pesagem e Cálculo:** Após o preenchimento, o recipiente contendo a amostra foi cuidadosamente pesado. O peso obtido, juntamente com o volume conhecido do recipiente, foi utilizado para calcular o índice de vazios mínimo do solo.

Este procedimento é essencial para obter uma medida confiável do índice de vazios mínimo, que é uma variável crítica na caracterização geotécnica dos solos e na avaliação de suas propriedades de compactação e estabilidade.

Figura 38 - Recipiente preenchido com material para o, ensaio de índice de vazios mínimo e máximo



Fonte: Autor

Figura 39 - Pesagem de conjunto solo mais cilindro para determinação do índice de vazios mínimo.



Fonte: Autor

O ensaio para determinar o índice de vazios máximo de um solo é realizado para encontrar a maior quantidade de espaços vazios que pode existir entre as

partículas do solo quando ele está na sua condição mais solta possível. A seguir, as etapas do procedimento e suas características técnicas:

1. **Secagem e Homogeneização:** As amostras de solo foram secas em estufa a 105°C até atingirem um peso constante, garantindo a remoção de toda a umidade. Este processo é idêntico ao realizado para o ensaio de índice de vazios mínimo. Após a secagem, as amostras foram homogeneizadas para assegurar a uniformidade do material, eliminando variações que poderiam afetar a precisão dos resultados.
2. **Preenchimento do Recipiente:** O recipiente padrão utilizado para o ensaio foi preenchido com a amostra seca. Desta vez, utilizou-se o método de queda livre para garantir a densidade máxima solta do solo. Neste método, o solo é despejado no recipiente a partir de uma altura controlada, sem qualquer compactação adicional, permitindo que ele assuma uma condição de empacotamento natural e solto.
3. **Pesagem e Cálculo:** Após o preenchimento, o recipiente contendo a amostra foi cuidadosamente pesado. O peso obtido, juntamente com o volume conhecido do recipiente, foi utilizado para calcular o índice de vazios máximo do solo.

Este índice é fundamental para avaliar a capacidade de compactação e a estabilidade do solo em condições soltas.

5.6.11 Compactação e ou CBR (Californian Bearing Ratio)

O ensaio de compactação é um método que visa a redução do índice de vazios do solo através da aplicação de uma certa energia sobre um solo com diferentes teores de umidade, contido em um molde cilíndrico. O material fornecerá diferentes massas específicas, que são função do teor de umidade, de forma que a umidade ótima é aquela que permitirá ao solo atingir sua maior massa específica ou o melhor estado de compactação.

Figura 40 - Cilindro para ensaio Proctor Normal.



Fonte: Autor

Para os ensaios de compactação Proctor Normal segue-se o que é definido na NBR 7182:2016. Os resultados obtidos fornecem:

1. Uma curva de compactação parabólica (teor de umidade versus massa específica aparente seca);
2. O valor correspondente à ordenada máxima da curva, com aproximação de $0,01 \text{ g/cm}^3$;
3. O valor da umidade ótima correspondente ao ponto de massa específica seca máxima, expresso com aproximação de $0,10\%$;
4. A umidade higroscópica da amostra;
5. A quantidade de água adicionada a cada ponto;
6. As condições do ensaio (energia, número de camadas e número de golpes por camada); e
7. Todos os pontos realizados (mesmo aqueles que forem desconsiderados na curva de compactação). O número mínimo de pontos para aprovação do ensaio é igual a 05 (cinco).

O ensaio de compactação Proctor Normal, é um procedimento laboratorial utilizado para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. Este ensaio é fundamental para identificar a umidade ótima e a densidade máxima que um solo pode atingir sob uma determinada energia de

compactação. A seguir, descrevemos a sequência do ensaio, suas características e os resultados obtidos.

1. Preparação da Amostra: A amostra de solo é seca ao ar e homogeneizada para garantir a uniformidade.
2. A umidade higroscópica da amostra é determinada previamente.
3. Adição de Água: Água é adicionada à amostra em diferentes proporções para criar várias subamostras, cada uma com um teor de umidade diferente. A quantidade de água adicionada a cada ponto é cuidadosamente medida e registrada.
4. Compactação das Subamostras: Cada subamostra é compactada em um molde padrão utilizando um soquete de compactação. O solo é compactado em três camadas, cada uma recebendo 26 golpes do soquete, conforme especificado na norma para o ensaio Proctor Normal. As condições de compactação (energia aplicada, número de camadas e número de golpes por camada) são rigorosamente controladas e registradas.

Figura 41 - Execução ensaio CBR, mostra amostras de solo submersas em um tanque de água, com dial gauges instalados para medir a penetração durante o teste.



Fonte: Autor

Procedimentos para a Execução do Ensaio CBR preparação da Amostra:

1. Coleta do Solo: Coletar amostras representativas do solo ou material granular a ser testado.
2. Preparação do solo: Secar a amostra ao ar livre ou em estufa a 105°C até atingir peso constante.

3. Quebrar os torrões de solo e peneirar a amostra para remover partículas maiores que 19 mm.
4. Adicionar água à amostra para atingir a umidade desejada, geralmente a umidade ótima determinada pelo ensaio Proctor.
5. Moldagem da amostra: Moldar a amostra em três camadas dentro de um molde padrão (diâmetro de 152 mm e altura de 178 mm) utilizando um soquete de compactação.
6. Compactação: Compactar cada camada com 56 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 305 mm (compactação intermediária).
7. Saturação da Amostra; Imersão: Submergir a amostra compactada em água por 96 horas para permitir a saturação completa.
8. Após a saturação, drenar a água e deixar a amostra equilibrar por 15 minutos antes do teste de penetração.

Figura 42 - Prensa de ensaio CBR



Fonte: Autor

Ensaio de Penetração, Configuração do Equipamento:

1. Colocar a amostra compactada na prensa de ensaio CBR. Ajustar o dial gauge para medir a penetração.
2. Aplicação da Carga: Aplicar uma carga na amostra com um pistão de penetração de 50 mm de diâmetro a uma taxa constante de 1,25 mm/min. Registrar as leituras de penetração a cada 0,25 mm até uma penetração máxima de 7,5 mm.
3. Calcular a força aplicada em função da penetração.
4. Comparar a força medida com as forças padrão para penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm.
5. Forças padrão: 13,24 kN para 2,5 mm e 19,96 kN para 5,0 mm.
 - a. Valores altos de CBR indicam solos com alta capacidade de suporte de carga (ex.: solos arenosos e brita).
 - b. Valores baixos de CBR indicam solos com baixa capacidade de suporte de carga (ex.: solos argilosos e siltosos).

5.6.12 Ensaio de permeabilidade à carga variável

O ensaio de permeabilidade à carga variável é utilizado para determinar o coeficiente de permeabilidade de solos finos, como argilas e siltes. Esse método é especialmente útil quando a permeabilidade do solo é baixa.

O objetivo na execução do ensaio de permeabilidade é determinar o coeficiente de permeabilidade do material, com a percolação de água através do solo em regime de escoamento laminar. O ensaio pode ser executado à carga constante ou à carga variável, a depender da textura do material, sendo os métodos de execução definidos respectivamente pela NBR13292 pela NBR14545. O que difere a utilização de um ensaio de permeabilidade a carga constante ou carga variável é a granulometria da amostra. Recomenda-se que solos cujos coeficientes de permeabilidade sejam menores do que 10^{-3} cm/s devem ser ensaiados pelo método à carga variável. Os corpos de prova ensaiados podem ser talhados ou compactados.

Como resultados, são apresentados o coeficiente de permeabilidade $K_{médio}$, referente à temperatura da água na realização do ensaio, o coeficiente de permeabilidade $K_{20\text{ °C}}_{médio}$, referente à temperatura de 20 °C, ambos expressos de forma exponencial e em cm/s; as características geométricas do corpo de prova e

do permeâmetro utilizado; os índices físicos da amostra; o volume de água percolado; e a variação da altura do corpo de prova, do $K_{20}^{\circ}\text{C}$, e do K para os vários instantes em que forem efetuadas as medidas. Além desses dados, no caso do ensaio de permeabilidade à carga constante, são apresentados os valores de $e_{\text{máx.}}$ e $e_{\text{mín.}}$, e a compactidade relativa.

Figura 43 - Permeâmetro de carga variável, para execução de ensaio de permeabilidade do solo.



Fonte: Autor

6.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos de acordo com o processo de determinado ensaio como descritos nos tópicos anteriores, estes, são expostos em quadros resumos a seguir e posteriormente demonstrado as memórias de cálculo de cada amostra.

6.1 Teor de umidade natural

A (Tabela 3), representa os procedimentos e os resultados da medição do teor de umidade natural de uma amostra de solo deformada em três cápsulas diferentes. Cada cápsula é pesada antes e após a secagem para determinar a quantidade de água presente originalmente no solo. A massa da água é calculada

pela diferença entre a massa do solo úmido e seco, e o teor de umidade é expresso como uma porcentagem relativa à massa do solo seco.

Tabela 3 - Teor de umidade natural

Determinação do teor de umidade natural amostra deformada									
Amostra Nº	Cápsula Nº	Massa da Capsula + Material		Cap. (g)	M. Material		Massa água	Teor de	Umidade
		Úmido	Seco		úmido	Seco		Umidade	Média
		g		g				%	
AD - 01	42'	17,57	16,59	9,20	8,37	7,39	0,98	13,26	12,73
	50'	16,95	16,14	9,58	7,37	6,56	0,81	12,35	
	51'	16,25	15,38	8,47	7,78	6,91	0,87	12,59	

Fonte: Autor

Os dados obtidos para o teor de umidade natural das amostras deformadas, conforme apresentado na (Tabela 3), indicam que o solo possui uma variação de umidade média de 12,73%. Este valor é fundamental para compreender a condição inicial do solo antes de qualquer intervenção, influenciando diretamente a compactação e a estabilidade das fundações.

6.2 Massa específica real dos grãos e classificação granulométrica

Os dados da (Tabela 4) permitem a classificação do solo e a previsão de seu comportamento em diferentes condições, influenciando decisões críticas em projetos de engenharia civil e agrícola. A compreensão detalhada dessas propriedades é crucial para garantir a estabilidade e a eficiência dos projetos que envolvem o uso do solo.

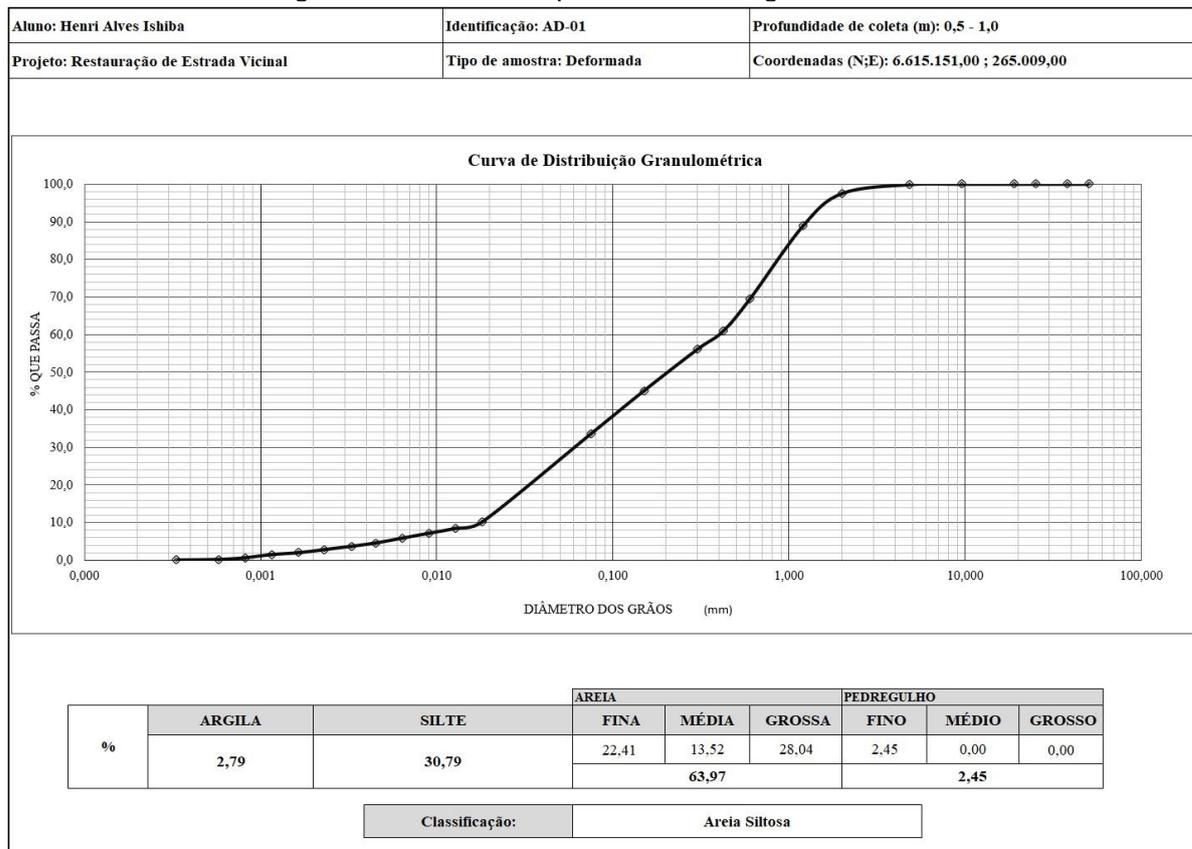
Tabela 4 – Resultados para massa específica real dos grãos e classificação granulométrica.

Amostra	$\rho_s \text{ g/cm}^3$	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA - %				Classificação
		Argila	Silte	Areia	Pedregulho	
AD-01	2,75	2,79	30,79	63,97	2,45	Areia siltosa

Fonte: Autor

A análise granulométrica divide as partículas do solo em diferentes classes de tamanho (argila, silte, areia e pedregulho) e é crucial para determinar a textura do solo. A alta porcentagem de areia (63,97%) na amostra AD-01 sugere que o solo terá uma boa capacidade de drenagem, o que é vantajoso para evitar problemas de encharcamento em projetos de construção. No entanto, a presença significativa de silte (30,79%) pode indicar uma suscetibilidade à erosão, o que necessita de medidas de controle adequadas.

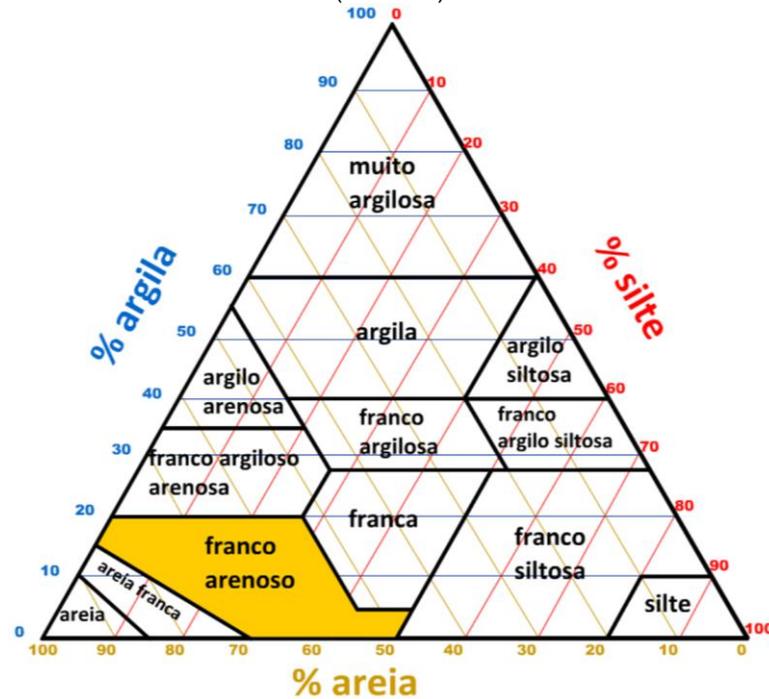
Figura 44 – Resultados para o ensaio de granulometria



Fonte: Autor

Utilizando o diagrama triangular, pode-se mostrar visualmente como a amostra AD-01 se enquadra na classificação “franco arenosa” ou “areia siltosa” de acordo com a curva granulométrica (Figura 44), facilitando a compreensão das propriedades do solo. A combinação dos dados da (Tabela 4) com o diagrama triangular de textura (Figura 45) do solo permite uma análise detalhada e precisa das propriedades texturais do solo. A apresentação visual clara dos dados, juntamente com argumentos fundamentados, proporciona uma compreensão profunda das características e comportamentos do solo, essenciais para a tomada de decisões informadas em projetos de engenharia. Resultado dos ensaios (ANEXO A).

Figura 45 – Classificação do solo pelo método do triangulo textural determinado pelos dados da (tabela 4).



Fonte: Executado pela calculadora no site:

https://docente.ifsc.edu.br/joao.quoos/textura_solo/textura.html

6.3 Limites de Atterberg

Os Limites de Atterberg são usados para caracterizar a consistência e o comportamento dos solos finos em diferentes condições de umidade.

A (Tabela 5), apresenta os resultados dos Limites de Atterberg para a amostra de solo AD-01, indicando que o solo não apresenta plasticidade "NP" (Não Plástico).

Tabela 5 - Resultados para os ensaios de Consistência ou de Limites de Atterberg.

LIMITES DE ATTERBERG			
Furo / Amostra	LL(%)	LP(%)	IP(%)
AD-01	-	-	NP

Fonte: Autor

Quando um solo é classificado como não plástico (NP), isso significa que ele não possui uma quantidade significativa de argila para exibir comportamento plástico. Em outras palavras, o solo não passa por uma transição líquida-plástica-sólida ao adicionar ou remover água. Solos não plásticos tendem a ter boa estabilidade e compactação devido à ausência de plasticidade. Eles não se deformam facilmente quando submetidos a cargas, tornando-os adequados para

aplicações onde a estabilidade é crítica, como em fundações de edificações e pavimentação de estradas. Resultados dos ensaios (ANEXO B).

6.4 Índice de vazios

A (Tabela 6), apresenta dados importantes sobre os índices de vazios e densidade da amostra AD-01. Esses parâmetros são cruciais para entender as propriedades físicas e o comportamento mecânico do solo.

Tabela 6 – Resultados para índice de vazios máximo e mínimo e determinação da densidade mínima e máxima do solo.

ÍNDICE DE VAZIOS			Densidade (g/cm ³)		
Amostra	e _{Max.}	e _{Min.}	Máxima média	Real dos grãos	Mínimas média
AD-01	1,21	0,78	1,55	2,75	1,24

Fonte: Autor

O índice de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos no solo. Valores de (e_{Max.}) e (e_{Min.}), indicam as condições mais soltas e mais compactas do solo, respectivamente. Esses valores sugerem que o solo pode variar significativamente em termos de compactação, o que influenciará sua porosidade e permeabilidade.

A densidade real dos grãos é a densidade dos sólidos sem considerar os espaços vazios. A densidade máxima média é a maior densidade que o solo pode atingir em condições de compactação máxima, enquanto a densidade mínima média é a menor densidade em condições de compactação mínima. Os valores do índice de vazios e densidades máximas e mínimas da amostra AD-01, mostrados na (Tabela 06), sugerem que o solo pode ser compactado de forma eficaz, com uma densidade máxima média de 1,55 g/cm³ e mínima de 1,24 g/cm³. Resultados dos ensaios (ANEXO C).

6.5 Análise dos Resultados de Compactação e CBR

A tabela 7, apresenta dados cruciais sobre os parâmetros de compactação e o Índice de Suporte Califórnia (ISC) da amostra AD-01. Esses parâmetros são fundamentais para avaliar a adequação do solo em projetos de pavimentação e outras aplicações de engenharia civil.

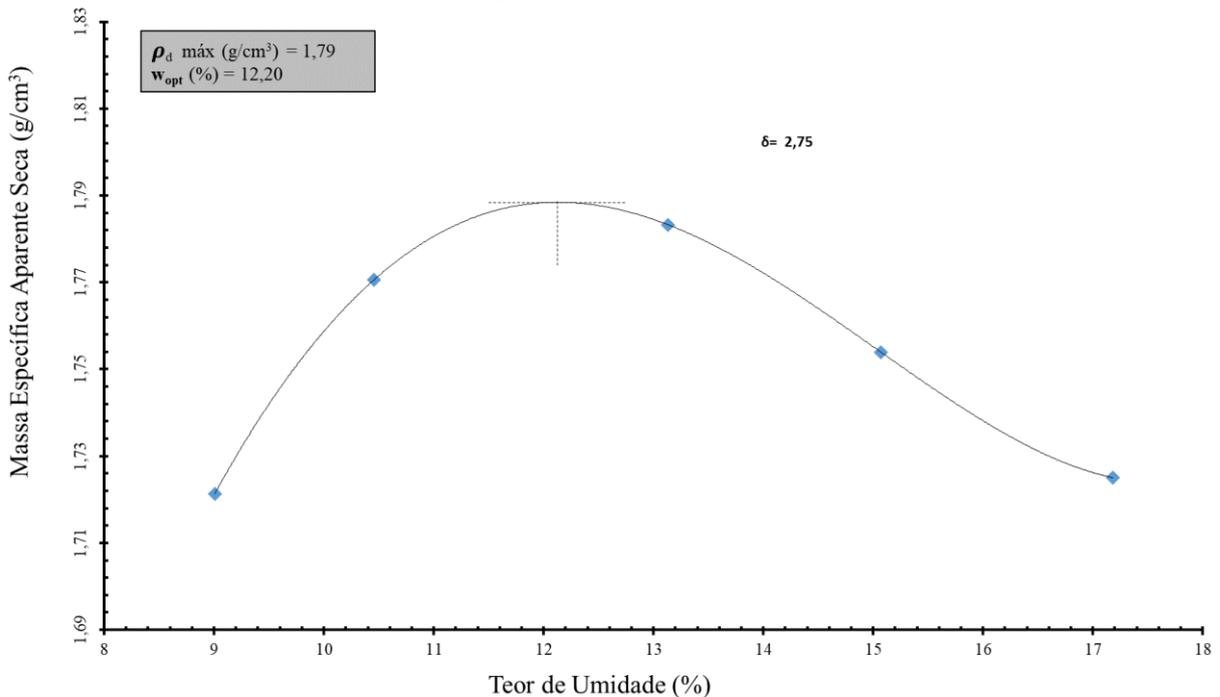
Tabela 7 – Resultados para os ensaios de Compactação e CBR

Amostra	COMPACTAÇÃO		CBR	
	W_{opt} (%)	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	ISC (%)	Expansão (%)
AD-01	12,20	1,79	17,75	0,00

Fonte: Autor

1. W_{opt} (12,20 %): Este é o teor de umidade no qual a amostra AD-01 atinge sua densidade máxima. Indica que o solo precisa de uma quantidade moderada de umidade para ser compactado de forma eficaz.
2. $\rho_{dm\acute{a}x}$ (1,79 g/cm³): A densidade seca máxima de 1,79 g/cm³ sugere que o solo pode ser densificado até um nível relativamente alto, proporcionando boa estabilidade e capacidade de suporte.
3. ISC (17,75%): Um valor de ISC de 17,75% indica que o solo tem uma resistência moderada à penetração. Este valor é suficiente para suportar tráfego leve a médio em pavimentações.
4. Expansão (0,00%): A ausência de expansão durante o teste CBR (0,00%) é um resultado positivo, indicando que o solo não apresenta tendências expansivas, o que é benéfico para a estabilidade a longo prazo das estruturas de pavimentação.

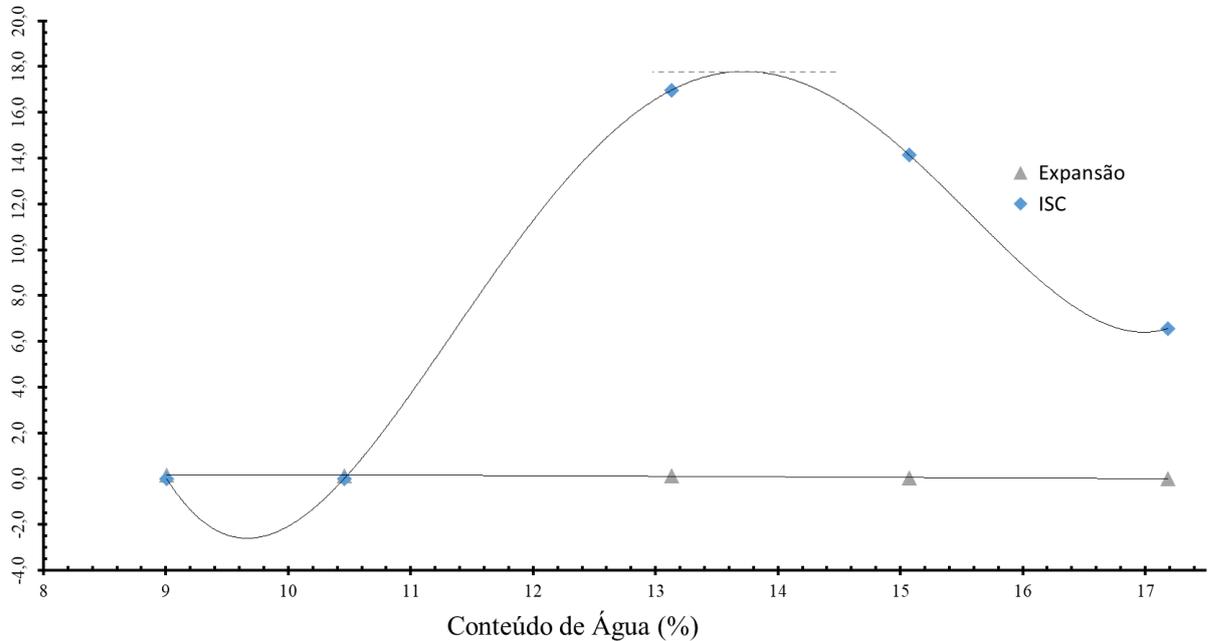
Figura 46 - Curva de Compactação – determinando a densidade máxima pelo teor de umidade
Curva de Compactação - Energia Normal



Fonte: Autor

Esses valores indicam que o solo pode ser compactado de forma eficiente, alcançando uma densidade considerável, o que é crucial para a estabilidade das fundações e pavimentações.

Figura 47 - Curva de ensaio do Índice de Suporte California
Curva Expansão e ISC



Fonte: Autor

O índice de suporte Califórnia (ISC) de 17,75% sugere que o solo tem uma resistência moderada, adequada para suportar tráfego leve a médio. A ausência de expansão (0,00%) durante o teste (ISC) indica que o solo não apresenta problemas de expansividade, o que é benéfico para a longevidade e manutenção das estruturas. Resultados dos ensaios (ANEXO D).

6.6 Permeabilidade à carga variável

A tabela 8, apresenta o valor do coeficiente de permeabilidade (K) para a amostra AD-01. Esse parâmetro é crucial para entender como o solo permitirá a passagem de água através de seus poros, influenciando diretamente sua adequação para diversas aplicações de engenharia, especialmente em projetos de drenagem e fundação. O valor de K é frequentemente determinado a uma temperatura padrão de 20 °C (K_{20}), para garantir consistência em medições.

Tabela 8 - Resultados para permeabilidade à carga variável.

Amostra	PERMEABILIDADE
AD-01	$K_{20} = 1,3E-04$ cm/s

Fonte: Autor

Este valor ($1,3E-04$ cm/s), indica que a amostra AD-01 tem uma permeabilidade relativamente baixa. De acordo com a classificação geral de solos, esse valor sugere que o solo é de baixa permeabilidade, possivelmente caracterizando um solo argiloso ou um solo finamente granuloso. Resultados dos ensaios (ANEXO E).

6.7 Caracterização topográfica

A topografia é a descrição exata e detalhada de um determinado espaço, capaz de mensurar as dimensões, elementos existentes, variações altimétricas, acidentes geográficos e outras características do lugar.

6.7.1 Curvas de nível

As curvas de nível são linhas que conectam pontos de igual altitude no terreno, e sua disposição permite inferir a direção do fluxo de água e potencializa a identificação de áreas suscetíveis à erosão. A análise das curvas de nível na (Figura 48) revela importantes informações sobre o relevo e a direção do fluxo superficial da água na região da Estrada da Aviação, no município de Caçapava do Sul – RS.

As principais observações são:

1. Declividade do Terreno: As curvas de nível estão bastante próximas em várias partes da área de estudo, indicando áreas com declives acentuados. Estas áreas são particularmente suscetíveis ao escoamento rápido da água, o que pode intensificar os processos erosivos.
2. Direção do Fluxo da Água: A água tende a fluir perpendicularmente às curvas de nível, descendo dos pontos mais elevados (altitudes maiores) para os pontos mais baixos (altitudes menores). No mapa, o fluxo superficial da água pode ser identificado movendo-se de áreas com altitudes como 350 - 354 metros (à direita) em direção a áreas de menor altitude, como 270-280 metros (à esquerda).

Figura 48 – Característica topográfica da área de trabalho



Fonte: Autor

Vários fatores contribuem para a erosão na Estrada da Aviação, conforme evidenciado pela análise das curvas de nível.

As regiões com maior declividade são naturalmente mais propensas à erosão devido ao escoamento superficial acelerado, que aumenta a capacidade da água de transportar partículas de solo. As curvas de nível próximas indicam que várias partes do terreno possuem inclinações significativas.

Com base nos resultados dos ensaios de permeabilidade, o solo da região possui um coeficiente de permeabilidade elevado. Embora isso permita uma rápida infiltração de água, eventos de precipitação intensa podem superar a capacidade de infiltração, resultando em maior escoamento superficial.

As áreas com relevo acentuado, solo arenoso com baixa coesão e alta permeabilidade são altamente suscetíveis à erosão. O escoamento superficial rápido em declives acentuados agrava a perda de solo.

A água tende a mover-se dos pontos mais elevados para os pontos mais baixos, com o fluxo concentrado nas direções indicadas pelas curvas de nível. Áreas como o centro e a parte esquerda do mapa, onde há um acúmulo de linhas de contorno, são particularmente vulneráveis à formação de ravinas e voçorocas.

6.7.2 Perfil de elevação

A análise detalhada das variações de elevação ao longo da distância permite identificar áreas críticas para o manejo do solo e a implementação de medidas de controle de erosão. A compreensão dessas características é essencial para garantir a sustentabilidade e a estabilidade do uso do solo na região estudada. Este perfil de elevação revela um terreno variado com seções de inclinação moderada a acentuada.

O perfil de elevação apresentado fornece uma representação visual da variação de altitude ao longo de uma distância específica, permitindo uma análise detalhada do relevo da área em questão.

Figura 49 – Perfil de elevação da área de trabalho, cobrindo uma extensão de aproximadamente 600 metros e uma elevação que varia da cota de 270 – 340 metros acima do nível do mar.



Fonte: Autor

A análise de um perfil de elevação revela importantes características do terreno, que são cruciais para entender sua topografia e planejar projetos de engenharia, construção e conservação ambiental.

As áreas planas são ideais para a construção de infraestruturas, como estradas, edifícios e áreas de cultivo, devido à facilidade de acesso e à menor necessidade de modificações do terreno.

Ao analisar o perfil de elevação, é essencial considerar várias características importantes como a inclinação influencia o escoamento da água e o potencial de erosão. Terrenos íngremes podem necessitar de sistemas de drenagem mais robustos para prevenir erosão e deslizamentos.

Baseado na (Figura 49), uma inclinação de 6.65 graus (ou 11.67%) pode aumentar significativamente a velocidade do escoamento superficial da água, especialmente durante eventos de chuva intensa. A velocidade aumentada do escoamento pode levar à erosão superficial do solo, desestabilizando a estrutura do solo e aumentando o risco de deslizamentos.

Áreas com alta inclinação estão mais suscetíveis à erosão hídrica, que remove a camada superficial fértil do solo, diminuindo a capacidade de suporte para a vegetação. A erosão também pode causar assoreamento em corpos d'água adjacentes, impactando negativamente a qualidade da água e os ecossistemas aquáticos.

Estradas e construções em áreas inclinadas podem sofrer danos devido à instabilidade do solo causada pela erosão. Manter a infraestrutura em boas condições pode exigir medidas adicionais de engenharia, como muros de contenção e sistemas de drenagem adequados.

7.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises laboratoriais realizadas proporcionaram uma caracterização detalhada do solo da área de estudo, revelando uma composição predominantemente arenosa e de baixa coesão, fatores que aumentam a suscetibilidade à erosão. A determinação do teor de umidade natural, massa específica dos grãos e a classificação granulométrica foram algumas das análises que forneceram informações valiosas para o entendimento das propriedades físicas e químicas do solo.

Com base na alta porcentagem de areia (63,97%), a amostra é classificada como "areia siltosa". Esta classificação indica que o solo possui uma boa capacidade de drenagem, o que é vantajoso para evitar problemas de encharcamento em projetos de construção. No entanto, a presença significativa de silte (30,79%) sugere que, embora o solo tenha boa drenagem, ele pode ser suscetível à erosão. Isso implica que medidas de controle de erosão, como a implementação de coberturas vegetais ou a construção de barreiras físicas, podem ser necessárias para garantir a estabilidade do solo em áreas expostas a agentes erosivos.

A massa específica real dos grãos, determinada em $2,75 \text{ g/cm}^3$, é um parâmetro fundamental que reflete a densidade dos sólidos do solo sem considerar os espaços vazios. Este valor é crucial para diversas aplicações na engenharia geotécnica, pois influencia diretamente a capacidade de suporte, a compactação e a estabilidade das estruturas construídas sobre ou com este solo.

Os Limites de Atterberg são fundamentais para caracterizar a consistência e o comportamento dos solos finos em diferentes condições de umidade. A análise

desses parâmetros forneceu informações essenciais sobre as propriedades físicas e mecânicas dos solos, especialmente em relação à sua plasticidade e capacidade de suporte de carga. Os resultados obtidos como "NP" (Não Plástico), significa que ele não possui uma quantidade significativa de argila suficiente para exibir comportamento plástico. Em outras palavras, o solo AD-01 não passa por transições entre os estados líquido, plástico e sólido com a adição ou remoção de água. Esta característica indica que o solo não se deforma facilmente quando submetido a variações de umidade, apresentando boa estabilidade e capacidade de compactação. A estabilidade proporcionada por solos não plásticos é crucial para garantir a durabilidade e segurança das estruturas construídas sobre eles.

O índice de vazios mínimo, máximo e a densidade são parâmetros fundamentais na engenharia geotécnica, pois fornecem informações essenciais sobre as propriedades físicas e o comportamento mecânico dos solos. A capacidade de variar significativamente em termos de compactação, associada a uma densidade máxima média de $1,55 \text{ g/cm}^3$ e mínima de $1,24 \text{ g/cm}^3$, sugere que o solo AD-01 pode ser compactado de forma eficaz, proporcionando estabilidade e resistência adequadas para diversas aplicações de engenharia. Este estudo é vital para garantir a segurança e durabilidade das construções, orientando decisões de projeto e técnicas de construção. A variação no índice de vazios também afeta a permeabilidade do solo. Solos mais compactados (com menor índice de vazios) têm menor permeabilidade, o que pode ser desejável em situações onde o controle da drenagem é crítico, como em fundações de edificações.

A análise dos ensaios de compactação e ISC fornece uma compreensão detalhada das propriedades do solo amostrado. A capacidade de atingir alta densidade seca em um teor de umidade ótimo, combinada com elevados valores de ISC, indica que o solo é altamente adequado para aplicações que requerem robustez e estabilidade, como fundações de edificações e pavimentação de estradas. Os resultados dos ensaios indicaram que o solo amostrado possui uma boa capacidade de suporte de carga, com valores de ISC correspondentes às forças padrão estipuladas.

O ensaio de permeabilidade à carga variável são fundamentais para determinar o coeficiente de permeabilidade de solos finos, como argilas e siltes, especialmente quando a permeabilidade do solo é baixa. O objetivo principal desses ensaios é avaliar como a água percola através do solo em regime de escoamento

laminar, fornecendo dados cruciais para diversas aplicações de engenharia, incluindo projetos de drenagem e fundação. O ensaio de permeabilidade à carga variável seguiu as metodologias definidas pela NBR 13292 e NBR 14545, apresentando o valor do coeficiente de permeabilidade (K) ajustado para a temperatura padrão de 20 °C (K₂₀). O valor obtido de (1,3E-04 cm/s) indica que a amostra possui uma permeabilidade relativamente baixa. Esses resultados são essenciais para orientar decisões sobre a adequação do solo para diferentes aplicações, assegurando a eficiência e segurança das obras realizadas sobre ele.

A análise da curva de elevação revela uma inclinação média de aproximadamente 6.65 graus (11.67%). Esta inclinação acentuada pode acelerar a velocidade do escoamento superficial da água, aumentando os riscos de erosão do solo. Para mitigar esses problemas, é essencial implementar medidas de controle de erosão, como a construção de terraços, utilização de coberturas vegetais, e instalação de sistemas de drenagem eficientes. Além disso, é fundamental monitorar continuamente as condições do solo e realizar intervenções de engenharia onde necessário para garantir a estabilidade da infraestrutura e a sustentabilidade ambiental da área afetada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro – RJ. 2016. MB - 27

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro – RJ. 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro - RJ. 2016. Origem: MB-30.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro – RJ. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984a.13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro – RJ. 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12004**: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro – RJ. 1990. Origem: MB-3324.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12052**: Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia. Rio de Janeiro – RJ. 1992. Origem: MB-3389.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro – RJ. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro – RJ. 2021.

ATTERBERG, A. "Die Plastizität der Tone". Internationale Mitteilungen für Bodenkunde, 1, 10-43. 1911.

BACCARO, C. A. D.; OLIVEIRA, M. A. de. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In GUERRA, A. J. T; SILVA, A. S e BOTELHO, R. G. M. (org). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1 ed.: 57-99. 1999

BELLINASSO, H. Biblioteca espectral de solos e sua aplicação na quantificação de atributos e classificação. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) - Escola superior de Agricultura Luis de Queiroz, Piracicaba. 2009.

BEVEN, K. J. & KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant, *Hydrological Sciences Journal*, 24:1, 43-69, DOI: 10.1080/02626667909491834. 1979

BRADY, N. C., & WEIL, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson. 2008.

COELHO NETTO, A.L. **Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia**. In: GUERRA A.J.T. & CUNHA S.B. (eds.) **Geomorfologia** - Uma atualização de base e conceitos, 2.ed., Rio de Janeiro, Bertrand, 472p. 1998.

COSTA, A. F. U.; NARDI, L. V. S.; & BITENCOURT, M. de F.; Gravimetric modeling of the Caçapava do Sul granite complex, southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 67(1), 101-110. (1995).

MANUAL de Métodos de Análise de Solo. EMBRAPA. **Publicação do SNLCS**. Rio de Janeiro – RJ. 1979.

GOMES, F. S. Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um solo em Processo Erosivo. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. UFPE. Engenharia Civil, Recife-PE. 2001.

GUGGENHEIM, S.; & MARTIN, R. T. "Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees". *Clays and Clay Minerals*, 43(2), 255-256. 1995.

HILLEL, D. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier. 2004.

HORTON, R. E.; Erosion development of streams and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, 1947

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manuais técnicos em Geociências – Manual técnico de Pedologia 2ª edição. Rio de Janeiro – RJ. 2007.

IBGE, **Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos e regiões Fitoecológicas/Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

JULIEN, P. Y.; **Erosion and Sedimentation**, Second Edition; Colorado State University, 2010.

KÄMPF, N. & CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H. & SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.107-138. 2000.

LEITE, J. A. D.; HARTMANN, L. A.; & REMUS, M. V. D.; U/Pb zircon dating of the Caçapava do Sul granite complex, southernmost Brazil: Implications for the late stages of the Brasiliano/Pan-African orogeny. **Precambrian Research**, 73(1-4), 235-244. (1995).

LEPSCH, IGO F.; **19 Lições de Pedologia / Igo F. Lepisch** – São Paulo: Oficina de Texto 2011.

MANUAL de Métodos de Análise de Solo. EMBRAPA. Publicação do SNLCS. Rio de Janeiro – RJ. 1979.

MANUAL técnico de geomorfologia. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, p. 73. (**Manuais técnicos em geociências**, n. 5). 2009.

MACEDO, P. M.; Beckel, J.; SANTOS, E. L.; CHABAN, N.; GONZALES FILHO, F.; Ocorrência de “pillow-lavas” no Arroio Mudador município de Caçapava do Sul – RS. In: **Anais** do Congresso Brasileiro de Geologia, Sociedade Brasileira Geologia, Recife, 1978.

MACHADO, S. L. – “**Apostila de Mecânica dos solos**” – Universidade Federal da Bahia (UFBA) – Departamento de Geotecnia da Escola Politécnica de Engenharia. 2002.

MITCHELL, J. K. & SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. JOHN WILEY & SONS. 2005.

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

OLIVEIRA, C. P. M.; PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; ROBERTO, A. N. ABC6, um sistema de suporte a decisões para análise de cheias em bacias complexas. **Anais da Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre - RS, 1999.

RAMOS, V. A.; & Kay, S. M.; Triassic rifting and associated basalts in the Cuyo Basin, central Argentina. In: R. S. HARMON & C. W. RAPELA (Eds.), **Andean Magmatism and its Tectonic Setting**. Geological Society of America Special Paper 265, 79-91. 1991.

ROSE, C. **An introduction to the environmental physics of soil water and watersheds**. Cambridge, UK: [Cambridge press], 2004.

SALOMÃO, F. X. T. Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural. **Tese de doutoramento**, Universidade de São Paulo, 220 f. 1994.

SANTORO, J. Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro SP. **Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica**. Rio Claro – SP (Dissertação de Mestrado). iGCE-UNESP-Campus de Rio Claro. 140p.il. 1991.

SARTORI, P. L. P.; & KAWASHITA, K.; Rb/Sr and U/Pb geochronology of the Caçapava do Sul granite complex, southernmost Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, 15(4), 349-355. (1985).

SANTOS, R, D. et al. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., & DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79(1), 7-31. 2004.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (SSSA). Glossary of Soil Science Terms. Retrieved from SSSA Website. 2023.

SPOSITO, Garrison. **A química dos solos**. Oxford university press, 2008.

USDA - Soil Survey Manual. U.S. Department of Agriculture. 1993.

VIEIRA, N. M. **Estudo geomorfológico das boçorocas de Franca, SP**. Franca, Instituto de História e Serviço Social, Universidade Estadual Paulista. 1978.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 9 – Resultados de dados para análise granulométrica

Tipo de Amostra:		Deformada			Identificação:		AD-01			
a) Amostra total (g)							1000,00			
b) Massa úmida retida # 10 (g)							26,13			
c) Massa úmida passada #10 (g)							973,87			
d) Massa total da amostra seca (g)							995,42			
Obs.: Amostra para granulometria preparada com secagem prévia ao ar										
Umidade Higroscópica					Peneiramento solo grosso					
Código da capsula		9'	16'	17'	Peneira abertura (Ø)		Massa (M)			
Massa	Úmida + tara (g)	21,83	22,33	18,67	Nº	mm	Retido (g)	Acumulada (g)	Que passa (g)	(%)
	seca + tara (g)	21,76	22,29	18,64	2"	50	0,0	0,0	995,30	100
					11/2"	38	0,0	0,0	995,30	100
					1"	25	0,0	0,0	995,30	100
Tara (g)		10,80	11,44	11,29	3/4"	19	0,0	0,0	995,30	100
Massa	Solo úmido (g)	11,03	10,89	7,38	3/8"	9,5	0,0	0,0	995,30	100
	solo seco (g)	10,96	10,85	7,35	Nº 4	4,8	1,03	1,0	994,30	99,9
	da água	0,07	0,04	0,03	Nº10	2,0	23,4	24,4	970,90	97,6
Umidade (%)		0,64	0,37	0,41	Massa total da amostra seca (g)				995,42	
Umidade média (%)		0,47								
Peneiramento do solo miúdo										
Peneira		Massa (M)				Amostragem parcial				
Nº	abertura	Retido (R)	Retido acumulada	Que passa						
	mm (Ø)	(g)	(g)	(g)	(g)	(%)				
16	1,20	10,56	10,56	92,14	88,93			Massa úmida (g)	120,00	
30	0,60	23,77	34,33	68,37	69,51					
40	0,42	10,68	45,01	57,69	60,79					
50	0,30	5,87	50,88	51,82	55,99			Massa seca (g)	102,70	
100	0,15	13,41	64,29	38,41	45,04					
200	0,075	14,03	78,32	24,38	33,58					
Massa específica dos grãos - pedregulho retido na peneira 4,8 mm (Ø)										
Msat (g)		Mi (g)		Ms (g)		ρ_{sr} g/cm ³		$\rho_{ap(s)}$ g/cm ³		
0,17		0,00		0,14		1,00		0,82		
Msat (g)		Mi (g)		Ms (g)		ρ_{sr} g/cm ³		$\rho_{ap(s)}$ g/cm ³		
3,40		1,88		3,19		2,43		2,09		
Msat média (g)		Mi média (g)		Ms média (g)		ρ_{sr} média g/cm ³		$\rho_{ap(s)}$ média g/cm ³		
1,79		0,94		1,67		1,71		1,46		
Aa (%)				Mt (g)				Mz ρ_{sr} (%)		
89,9				1000,0				0,167		
Massa específica dos grãos - solos que passam na peneira de 4,8 mm (Ø)										
M1 (g)	M2 (g)	T °C	M3 (g)	W (%)	$\rho_{w(t)}$ g/cm ³		ρ_{sp} g/cm ³			
60,00	689,11	23,8	651,02	0,47	0,9974		2,75			
M1 (g)	M2 (g)	T °C	M3 (g)	W (%)	$\rho_{w(t)}$ g/cm ³		ρ_{sp} g/cm ³			
60,00	689,12	23,8	651,02	0,47	0,9974		2,75			
ρ_{sp} média g/cm ³			ρ_s g/cm ³			M1 ρ_{sp} (%)				
2,75			2,75			99,834				
Massa específica para sedimentação - solos que passam na peneira 2 mm (Ø)										
M1 (g)	M2 (g)	T °C	M3 (g)	w (%)	$\rho_{w(t)}$ (g/cm ³)		ρ_{sp} (g/cm ³)			
60,00	688,91	23,1	651,09	0,47	0,9975		2,72			
M1 (g)	M2 (g)	T °C	M3 (g)	w (%)	$\rho_{w(t)}$ (g/cm ³)		ρ_{sp} (g/cm ³)			
60,00	688,90	23,8	651,02	0,47	0,9974		2,73			
ρ_{sp} (g/cm ³) 2 mm (Ø)					2,725					
Obs.: Amostra para massa específica real dos grãos preparada com secagem prévia ao ar.										
Sedimentação – Dados Gerais										
Massa do sedimento úmido (g)		120,00			Densímetro N°		1			
Massa do sedimento seco (g)		102,70			Proveta N°		1			
Defloculante: Hexametáfosfato de sódio		Correção do defloculante: 0,004 g/cm ³			Correção do menisco: 0,001 g/cm ³					

Sedimentação - Leituras									
Hora	Δt (S)	Dens. g/cm ³		Temp. °C	Dens. corrigida g/cm ³	Altura de queda cm	grãos mm	Finos em suspensão (%)	
								Parcial	Total
7:54	30"	1,028	1,028	22,3	1,025	12,95	0,01809	30,16	10,13
7:55	1'	1,024	1,024	22,3	1,021	13,55	0,01277	25,03	8,40
7:56	2'	1,021	1,021	22,3	1,018	14,00	0,00901	21,18	7,11
7:58	4'	1,018		22,3	1,015	13,03	0,00636	17,33	5,82
8:02	8'	1,015		22,3	1,012	13,48	0,00449	13,49	4,53
8:09	15'	1,013		22,0	1,010	13,78	0,00327	10,87	3,65
8:24	30'	1,011		22,0	1,008	14,08	0,00231	8,30	2,79
8:54	1h	1,009		21,8	1,006	14,38	0,00163	5,70	1,92
9:54	2h	1,008		21,5	1,005	14,53	0,00115	4,37	1,47
11:54	4h	1,006		21,2	1,003	14,83	0,00081	1,76	0,59
15:54	8h	1,005		21,2	1,002	14,98	0,00057	0,47	0,16
7:54	24h	1,003		21,2	1,000	15,28	0,00033	0,00	0,00

ANEXO B

Tabela 10 - Ensaio para limites de Consistência Atterberg

LIMITE DE LIQUIDEZ							
Nº de golpes	Massa					Teor de	
	Do solo		Da cápsula (g)	Do solo		de água (g)	água %
	úmido + cápsula (g)	seco + cápsula (g)		úmido (g)	seco (g)		
LIMITE DE PLASTICIDADE							
Massa						Teor de umidade	
Do solo		Da cápsula (g)	Do solo		De água (g)	(%)	Média (%)
úmido + cápsula (g)	Seco + cápsula (g)		úmido (g)	seco (g)			
GRÁFICO							
				<p>Amostra acima não apresenta (Limite de Plasticidade, por não ser possível de se obter o cilindro com 3 mm de diâmetro.</p>			
RESULTADOS							
Limite de Liquidez:				-			
Limite de Plasticidade:				-			
Índice de Plasticidade:				NP			
Obs.: Amostra preparada com secagem prévia ao ar.							

ANEXO C

Tabela 11 – Dados dos ensaios para índice de vazios

Índice de vazios máximo					
Determinação da densidade mínima do solo (g/cm ³) e do índice de vazios máximo (e_{max})					
1ª Determinação		2ª Determinação		3ª Determinação	
Solo + cilindro (g):	8540	Solo + cilindro (g):	8542	Solo + cilindro (g):	8546
cilindro (g):	7254	cilindro (g):	7254	cilindro (g):	7254
Solo (g):	1286	Solo (g):	1288	Solo (g):	1292
Volume (g/cm ³)	1037,39	Volume (g/cm ³)	1037,39	Volume (g/cm ³)	1037,39
Densidade mínima (g/cm ³)	1,24	Densidade mínima (g/cm ³)	1,24	Densidade mínima (g/cm ³)	1,25
e_{max} :	1,22	e_{max} :	1,21	e_{max} :	1,21
Densidades mínimas (g/cm ³) média:				1,24	
Densidade real dos grãos (g/cm ³):				2,75	
Índice de vazios máximo - e_{max} média:				1,21	

Índice de vazios mínimo					
Determinação da densidade máxima do solo (g/cm ³) e do índice de vazios mínimo (e_{min})					
1ª Determinação		2ª Determinação		3ª Determinação	
Solo + cilindro (g):	8858	Solo + cilindro (g):	8860	Solo + cilindro (g):	8864
cilindro (g):	7254	cilindro (g):	7254	cilindro (g):	7254
Solo (g):	1604	Solo (g):	1606	Solo (g):	1610
Volume (g/cm ³)	1037,39	Volume (g/cm ³)	1037,39	Volume (g/cm ³)	1037,39
Densidade máxima (g/cm ³)	1,55	Densidade máxima (g/cm ³)	1,55	Densidade máxima (g/cm ³)	1,55
e_{min} :	0,78	e_{min} :	0,78	e_{min} :	0,77
Densidades máximas (g/cm ³) média:				1,55	
Densidade real dos grãos (g/cm ³):				2,75	
Índice de vazios mínimos - e_{min} média:				0,78	

ANEXO D

Tabela 12 – Dados de compactação

DADOS COMPACTAÇÃO					
Compactação N°	1	2	3	4	5
Cilindro N°	23	30	26	29	34
Ponto N°	1	2	3	4	5
Massa do cilindro (g)	3722	3954	3801	4109	4773
Volume do cilindro (cm ³)	2076,332	2080	2074,414	2063,652	2078,218
Massa cilindro + solo (g)	7618	8022	7986	8274	8974
Cápsula código	11'	12'	21'	16'	66'
	21'	15'	24'	37'	86'
	31'	19'	39'	54'	90'
Massa úmida + cápsula (g)	27,08	25,68	26,77	23,15	25,81
	23,58	26,12	24,87	25,89	19,81
	24,33	21,08	21,64	23,45	27,95
Massa seca + cápsula (g)	25,84	24,24	24,90	21,60	23,43
	22,45	24,75	23,06	23,82	18,43
	23,19	19,85	20,33	21,62	25,29
Cápsula (g)	11,44	10,70	10,77	11,43	9,60
	10,72	10,72	9,92	10,10	10,34
	10,20	8,64	9,75	9,33	9,90
Massa solo úmido (g)	15,64	14,98	16,00	11,72	16,21
	12,86	15,40	14,95	15,79	9,47
	14,13	12,44	11,89	14,12	18,05
Massa solo seco (g)	14,40	13,54	14,13	10,17	13,83
	11,73	14,03	13,14	13,72	8,09
	12,99	11,21	10,58	12,29	15,39
Massa de água (g)	1,24	1,44	1,87	1,55	2,38
	1,13	1,37	1,81	2,07	1,38
	1,14	1,23	1,31	1,83	2,66

Umidade (%)	8,61	10,64	13,23	15,24	17,21			
	9,63	9,76	13,77	15,09	17,06			
	8,78	10,97	12,38	14,89	17,28			
Umidade média (%)	9,01	10,46	13,13	15,07	17,18			
Massa específica γ_d (g/cm³)	1,72	1,77	1,78	1,75	1,73			
Obs.: Processo de preparação da amostra com secagem prévia ao ar, utilizando-se energia normal, cilindro pequeno, sem reuso de material.								
Incrementos de água para Compactação								
Com reuso de material								
Massa total do Material	Umidade				Nº do incremento	Massa de água	Incremento de água	Teor de Umidade Real
	Natural	ótima presumível	Teor de	Higroscópica				
7000	13,57	18	13	0,50	1	1005,747	1005,747	14,367816
7000	13,57	18	15	0,50	2	1194,118	188,3705	17,058823
7000	13,57	18	17	0,50	3	1391,566	197,4486	19,879518
7000	13,57	18	19	0,50	4	1598,765	207,1992	22,839506
7000	13,57	18	21	0,50	5	1816,456	424,8894	25,949367
7000	13,57	18	23	0,50	6	2045,455	446,6891	29,220779
7000	13,57	18	25	0,50	7	2286,667	470,211	32,666667
7000	13,57	18	27	0,50	8	2541,096	495,6413	36,301370
7000	13,57	18	29	0,50	9	2809,859	523,1925	40,140845

ANEXO E

Tabela 13 – Dados de permeabilidade à carga variável

Identificação									
Amostra					AD-01				
Tipo de amostra					Deformada				
Método utilizado					B				
Água utilizada					Bruta deaerada				
Índices físicos									
Ms (g) = 386,69			γ_d (g/cm ³) = 1,75		e_i = 0,58		Sr (%) = 58,43		V_v (g/cm ³) = 192,18
Constantes do equipamento					Dados da moldagem				
Seção	do C.P.	(A)	(cm ²)	20,11	Conjunto Nº:	1	Massa CP (g)	433,9	
	da bureta	(a)	(cm ²)	0,95	Volume do CP (cm ³)	221,2	Densidade úmida (g/cm ³)	1,96	
Altura	do C.P.	(H)	(cm)	11,00	Tara molde (g)	2540,52	Umidade (%)	12,21	
	da carga inicial	(h ₁)	(cm)	130	Molde + CP (g)	2974,42	γ_w (g/cm ³):	1,00	
Umidade de moldagem					Umidade após ensaio				
Cápsula Nº		12'	19'	Média	Cápsula Nº		63	64	Média
Solo úmido + cápsula (g)		19,79	19,23	19,51	Solo úmido + cápsula (g)		300,85	225,78	263,32
Solo seco + cápsula (g)		18,80	18,08	18,44	Solo seco + cápsula (g)		263,72	199,12	231,42
Cápsula (g)		10,71	8,64	9,68	Cápsula (g)		50,39	55,19	52,79
Massa de água (g)		0,99	1,15	1,07	Massa de água (g)		37,13	26,66	31,895
Solo seco (g)		8,09	9,44	8,77	Solo seco (g)		213,33	143,93	178,63
Umidade (%)		12,24	12,18	12,21	Umidade (%)		17,40	18,52	17,96
Grau de Saturação inicial (%)			58,43		Grau de Saturação final (%)			76,59	
Tempo (h/m/s)	Leitura (cm)			h ₁ /h ₂	ln(h ₁ /h ₂)	Δ_t (s)	T(°C)	Permeabilidade (cm/s)	
	Alt. carga	Simplex	Acumulada					k	K ₂₀
	00:00:00	130	0	0	1,0	0	120	24,5	-
	00:02:00	129,4	0,6	0,6	1,00464	0,00463	120	24,5	2,0E-05
00:04:00	128,8	0,6	1,2	1,00932	0,00927	120	24,5	4,0E-05	

00:06:00	128,6	0,2	1,4	1,01089	0,01083	120	24,5	4,7E-05	4,2E-05
00:08:00	127,5	1,1	2,5	1,01961	0,01942	120	24,5	8,4E-05	7,6E-05
00:10:00	127	0,5	3,0	1,02362	0,02335	120	24,5	1,0E-04	9,1E-05
00:12:00	126,4	0,6	3,6	1,02848	0,02808	120	24,5	1,2E-04	1,1E-04
00:14:00	125,8	0,6	4,2	1,03339	0,03284	120	24,5	1,4E-04	1,3E-04
00:16:00	125,2	0,6	4,8	1,03834	0,03762	120	24,5	1,6E-04	1,5E-04
00:18:00	124,7	0,5	5,3	1,04250	0,04162	120	24,5	1,8E-04	1,6E-04
00:20:00	124,1	0,6	5,9	1,04754	0,04645	120	24,5	2,0E-04	1,8E-04
00:22:00	123,6	0,5	6,4	1,05178	0,05048	120	24,5	2,2E-04	2,0E-04
K₂₀ = 1,3E-04 cm/s									
Corpo de prova reconstituído a partir de 98% do Proctor Normal e teor de umidade ótima de 12,2%.									