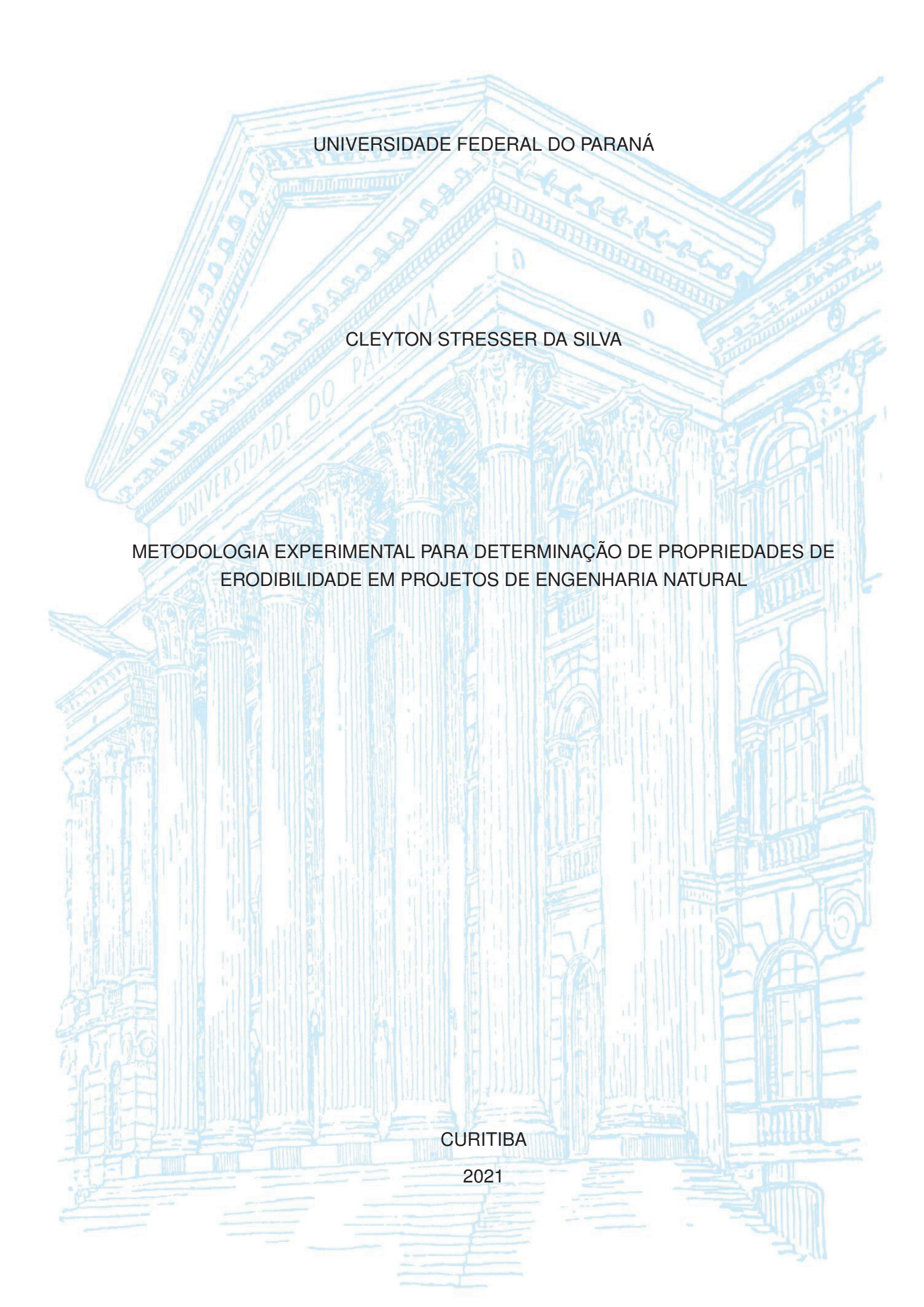




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CLEYTON STRESSER DA SILVA

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE  
ERODIBILIDADE EM PROJETOS DE ENGENHARIA NATURAL

CURITIBA

2021

CLEYTON STRESSER DA SILVA

METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE  
ERODIBILIDADE EM PROJETOS DE ENGENHARIA NATURAL

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a aquisição do título de mestre no Pro-  
grama de Pós Graduação em Engenharia Civil  
do Setor de Tecnologia da Universidade Federal  
do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Larissa de Brum Passini  
Coorientador: Prof Dr Elvidio Gavassoni Neto

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

S586m Silva, Cleyton Stresser da  
Metodologia experimental para determinação de propriedades  
de erodibilidade em projetos de engenharia natural [recurso  
eletrônico] / Cleyton Stresser da Silva – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Larissa de Brum Passini  
Coorientador: Prof Dr Elvidio Gavassoni Neto

1. Solos – erosão. 2. Vegetação. I. Universidade Federal do  
Paraná. II. Passini, Larissa de Brum. III. Gavassoni Neto,  
Elvidio. IV. Título.

CDD: 624.1514

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -  
40001016049P2

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CLEYTON STRESSER DA SILVA** intitulada: **METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DE ERODIBILIDADE EM PROJETOS DE ENGENHARIA NATURAL**, sob orientação da Profa. Dra. LARISSA DE BRUM PASSINI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Abril de 2021.

Assinatura Eletrônica

07/04/2021 17:02:23.0

LARISSA DE BRUM PASSINI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

08/04/2021 12:10:24.0

ANDRÉS MIGUEL GONZÁLEZ ACEVEDO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

07/04/2021 17:17:13.0

ADRIANA AHRENDT TALAMINI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

08/04/2021 16:47:20.0

RINALDO JOSE BARBOSA PINHEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida.

Agradeço a minha mãe, Maria Luiza Machado, por todo o carinho e amor de sempre. Agradeço ao meu pai, Alzemiro Stresser da Silva, pelo exemplo de vida e dedicação.

Aos meus irmãos, Bianca e Rodrigo, e aos meus avós Luci, Antônio e Adelaide, pelos incentivos e carinhos. De forma especial, agradeço a companhia e compreensão durante a "estadia na casa da vó Luci", em virtude da pandemia de 2020, período em que escrevi parte deste documento.

Agradeço a Carolina Holles Tavares, pela ajuda na elaboração deste trabalho, por toda a compreensão e, especialmente, por todo o amor dirigido a mim.

A minha orientadora, Larissa de Brum Passini, pelo aceite do tema, pelo apoio técnico e incentivos durante todo o período de mestrado.

Ao meu coorientador, Elvidio Gavassoni Neto, pelas relevantes sugestões e contribuições ao trabalho.

Um agradecimento especial aos meus amigos Everton Melara, Gabriel Pezzi, Fernando Stipp, Talita Yera, Bruno Kowalzuk, Filipe Ludovico, Tiago Giles, Carla Vieira e Vítor Pereira Faro. De alguma forma, vocês auxiliaram na produção deste trabalho, além de me proporcionarem vários momentos de descontração.

Agradeço a Prefeitura de Curitiba, especialmente a Eng. Lucy Maria Schellin, pela apresentação do local estudado, sugestão de tema e pelo apoio técnico.

Ao Grupo de Estudos em Geotecnia, por me despertar o interesse pela Engenharia Geotécnica. Agradeço pelo empenho de todos em fazer algo melhor e diferente, dentro da escala possível.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, pelas oportunidades de crescimento pessoal e profissional. Aos amigos do PPGECC que pude conhecer durante as disciplinas e que caminharam junto comigo durante a pós-graduação.

Por fim, a Universidade Federal do Paraná, minha casa durante 7 anos, somando graduação e mestrado, por ser a instituição responsável por grandes mudanças e ótimos momentos de minha vida.

*"Great things are done by a series of small things brought together"*  
—Vincent Van Gogh

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia experimental para a investigação de erodibilidade de solos, tendo em vista a aplicação em projetos de Engenharia Natural. Em um cenário de crescimento da população urbana e de novas concepções em sistemas de drenagem, técnicas sustentáveis e de recomposição da vegetação têm importância. No trabalho, é avaliado a erodibilidade de três solos aluvionares, através dos ensaios *crumb test*, capilaridade, erodibilidade específica e Inderbitzen. O erosômetro Inderbitzen foi o principal instrumento de avaliação direta de erodibilidade, sendo propostas modificações ao ensaio convencional, além de um relato da construção do equipamento. Os experimentos foram realizados em três solos distintos, coletados em um canal de drenagem não revestido no bairro Vitória Régia, em Curitiba-PR. A etapa experimental também contempla uma análise da influência de raízes de Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) na redução da erodibilidade do solo. Os resultados obtidos indicaram menor erodibilidade em amostras indeformadas, comparadas a amostras reconstituídas com diferentes teores de raízes. O solo arenoso se mostrou mais erodível, em comparativo com amostras de solos argilosos e pedregulhosos. Quanto a análise da influência das raízes, os teores utilizados reduziram a erosão hídrica, porém os baixos teores de raízes utilizados apresentaram pouca influência nos resultados. São apresentadas propostas para aplicação do Inderbitzen em critérios de erosão e cálculo de parâmetros. O trabalho também apresenta um projeto de estabilização de margens em Engenharia Natural onde, nos parâmetros de projeto, um comparativo entre a taxa de erosão do ensaio Inderbitzen e o fator de erodibilidade  $K_{EUPS}$  da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) foi realizado. Os resultados das duas abordagens foram divergentes, tornando a avaliação de erosão para projetos uma combinação do uso da EUPS e de ensaios de erodibilidade. Os projetos conceituais e básicos da estrutura de estabilização, composta por gabiões, esteiras vivas e paliçadas vivas, são apresentados. A metodologia de ensaios se mostrou importante para análise do comportamento do solo frente à erosão hídrica. O estudo também mostrou relevância no contexto de uma abordagem analítica de projeto em Engenharia Natural, considerando as alterações propostas no equipamento Inderbitzen, a metodologia experimental descrita e a análise dos resultados apresentados.

**Palavras-chave:** Erosão. Vegetação. Cursos d'água. Inderbitzen. EUPS.

## ABSTRACT

This study presents an experimental methodology for soil erodibility evaluation, with the aim to apply this parameter in Soil Bioengineering projects. In a scenario of urban growing population and new concepts in drainage systems, sustainable technics and vegetal restoration have relevance. The study evaluates the erodibility of three alluvial soils, which were studied through the following tests: crumb test, capillarity, specific erodibility and Inderbitzen test. The Inderbitzen erosometer was the main instrument for direct assessment of erodibility and modifications were proposed to the usual test process, in order to have a better evaluation of results. The equipment construction and the proposed modifications are described in details. Three texturally distinct soils were collected in a drainage stream in the Vitória Régia, city of Curitiba, Paraná state, Brazil. The lab stage also evaluated the effect of roots on the soil erodibility. It was used Vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) roots, mixed in reconstituted samples. The obtained results indicate smaller erodibility values for undisturbed samples, when compared to reconstituted samples with different root contents, including samples without roots. The sandy soil proved to be more erodible, compared to clayed and gravel soils. Roots reduced hydric erosion; however, small root taxes had no significant influence on the results. Proposals to applying the results of the Inderbitzen test on literature erosion criteria are presented. For Soil Bioengineering projects, a comparison between the erosion rate from the Inderbitzen test and the Universal Soil Loss Equation  $K_{USLE}$  erodibility factor was carried out. In the evaluated soils, these two parameters showed no clear relation. It is proposed an erosion prediction based on the combination of both the USLE and erodibility test approach. A conceptual and base project for a stabilization structure for the studied channel was developed, consisting of gabions, live fascines and live palisades. The methodology proposed proved to be a feasible approach for the analysis of soil behavior in hydric erosion problems. The study also shows relevance for Soil Bioengineering projects from an analytic perspective, with the adaptations in the conventional Inderbitzen equipment, and the proposal of a methodology for soil testing and data analysis.

**Key-words:** Erosion. Vegetation. Waterways. Inderbitzen Test. USLE.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1.1 – Frequência anual de desastres por enxurradas no Brasil e porcentagem de óbitos relacionados ao tipo de ocorrência no período de 1991 a 2012 . . . . . | 21 |
| FIGURA 2.1 – Efeitos da vegetação no balanço hídrico do solo . . . . .                                                                                             | 28 |
| FIGURA 2.2 – Exemplos de processos erosivos de origem pluvial e fluvial . . . . .                                                                                  | 30 |
| FIGURA 2.3 – Nomograma de Wischmeier (1971) para a determinação do fator $K_{EUPS}$ . . . . .                                                                      | 34 |
| FIGURA 2.4 – Análise de erosão em taludes pelo escoamento superficial uniforme em talude infinito . . . . .                                                        | 38 |
| FIGURA 2.5 – Ábaco de Briaud, com categorias de erosão baseados na relação entre a velocidade do fluxo e a taxa de erosão . . . . .                                | 39 |
| FIGURA 2.6 – Ábaco de Briaud, com categorias de erosão baseados na relação entre a tensão de cisalhamento hidráulica e a taxa de erosão . . . . .                  | 40 |
| FIGURA 2.7 – Dimensões do equipamento original proposto por Inderbitzen (1961)                                                                                     | 42 |
| FIGURA 2.8 – Equipamento utilizado no trabalho de Bastos (1999) . . . . .                                                                                          | 43 |
| FIGURA 2.9 – Curva típica resultado de um ensaio Inderbitzen, com relação entre perda de solo acumulada e tempo . . . . .                                          | 44 |
| FIGURA 2.10–Definição do Fator $K$ e tensão hidráulica crítica nos ensaios Inderbitzen                                                                             | 45 |
| FIGURA 2.11–Ensaio de classificação de erodibilidade na metodologia MCT . . . . .                                                                                  | 47 |
| FIGURA 2.12–Exemplo de curva típica em ensaios de capilaridade . . . . .                                                                                           | 48 |
| FIGURA 2.13–Critério de erodibilidade pela metodologia MCT . . . . .                                                                                               | 49 |
| FIGURA 2.14–Compilação de diversos trabalhos que relacionam a taxa de erosão do solo com a cobertura vegetal . . . . .                                             | 51 |
| FIGURA 2.15–Comparativo entre efeitos de raízes pivotante e laterais na proteção do solo contra erosão . . . . .                                                   | 52 |
| FIGURA 2.16–Tipos de canais de drenagem estabilizados com bioengenharia de solos . . . . .                                                                         | 57 |
| FIGURA 3.1 – Localização da Área de Estudo . . . . .                                                                                                               | 60 |
| FIGURA 3.2 – Bacia do Rio Barigui . . . . .                                                                                                                        | 61 |
| FIGURA 3.3 – Temperaturas e precipitações médias anuais em Curitiba . . . . .                                                                                      | 62 |
| FIGURA 3.4 – Carta geológica da região em estudo . . . . .                                                                                                         | 63 |
| FIGURA 3.5 – Mapa geológico adaptado da região em estudo . . . . .                                                                                                 | 64 |

|                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 3.6 – Localização dos canais dos canteiros centrais das Ruas Arthur Tambosi, Cyro Correia Pereira, Lourdes Betezek, Major Victor Feijó e Giuseppe Covacci Jr e canal extravasor principal nos loteamentos Vitória Régia I, II, III . . . . . | 65 |
| FIGURA 3.7 – Aspectos dos canais de drenagem existentes . . . . .                                                                                                                                                                                   | 67 |
| FIGURA 3.8 – Processos que estão ocorrendo no canal emissário principal do bairro — canal paralelo a rua José Laurindo de Souza . . . . .                                                                                                           | 68 |
| FIGURA 3.9 – Vista do canal da Rua Cyro Correia Pereira . . . . .                                                                                                                                                                                   | 69 |
| FIGURA 3.10–Ocupação das áreas da bacia hidrográfica do canal da rua Cyro Correia Pereira . . . . .                                                                                                                                                 | 70 |
| FIGURA 3.11–Planta e perfil do talvegue . . . . .                                                                                                                                                                                                   | 71 |
| FIGURA 3.12–Processos erosivos do canal da Rua Cyro Correia Pereira . . . . .                                                                                                                                                                       | 72 |
| FIGURA 3.13–Mapeamento dos processos erosivos no canal de drenagem em estudo . . . . .                                                                                                                                                              | 73 |
| FIGURA 3.14–Danos e ocorrências identificadas na faixa crítica do canal da Rua Cyro Correia Pereira . . . . .                                                                                                                                       | 74 |
| FIGURA 3.15–Seleção de técnicas no canal da rua Cyro Correia Pereira a partir do levantamento de campo . . . . .                                                                                                                                    | 75 |
| FIGURA 4.1 – Fluxograma de interdependência das variáveis . . . . .                                                                                                                                                                                 | 77 |
| FIGURA 4.2 – Trechos para coleta de amostras no canal da Rua Cyro Correia Pereira                                                                                                                                                                   | 78 |
| FIGURA 4.3 – Identificação dos solos ensaiados . . . . .                                                                                                                                                                                            | 79 |
| FIGURA 4.4 – Mudança na tonalidade da amostra de Solo 2 submetida ao ensaio de teor de matéria orgânica . . . . .                                                                                                                                   | 81 |
| FIGURA 4.5 – Equipamento utilizado nos ensaios de capilaridade . . . . .                                                                                                                                                                            | 81 |
| FIGURA 4.6 – Ensaio de erodibilidade específica . . . . .                                                                                                                                                                                           | 82 |
| FIGURA 4.7 – Amostras de Capim Vetiver utilizadas nos ensaios e extração de raízes para a confecção de corpos de prova . . . . .                                                                                                                    | 84 |
| FIGURA 4.8 – Imagem do equipamento utilizado nos ensaios Inderbitzen . . . . .                                                                                                                                                                      | 86 |
| FIGURA 4.9 – Esquema do ensaio Inderbitzen com as modificações propostas neste trabalho . . . . .                                                                                                                                                   | 87 |
| FIGURA 4.10–Ligações eletrônicas dos equipamentos utilizados para aumentar a acurácia de resultados . . . . .                                                                                                                                       | 89 |
| FIGURA 4.11–Calibrações dos equipamentos de medição . . . . .                                                                                                                                                                                       | 90 |
| FIGURA 4.12–Vazões medidas e calculadas na realização dos ensaios . . . . .                                                                                                                                                                         | 91 |
| FIGURA 4.13–Equipamento utilizado para compactação estática e produção dos corpos de prova . . . . .                                                                                                                                                | 95 |
| FIGURA 4.14–Exemplos de amostras indeformadas e reconstituídas produzidas para os ensaios Inderbitzen . . . . .                                                                                                                                     | 96 |
| FIGURA 4.15–Procedimento utilizado nos ensaios de erosão direta tipo Inderbitzen                                                                                                                                                                    | 97 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.16–Exemplo da nomenclatura utilizada para identificar os corpos de prova no ensaio . . . . .                                   | 98  |
| FIGURA 5.1 – Síntese dos ensaios realizados em cada tipo de amostra . . . . .                                                           | 99  |
| FIGURA 5.2 – Caracterização e classificação do Solo 1 . . . . .                                                                         | 100 |
| FIGURA 5.3 – Caracterização e classificação do Solo 2 . . . . .                                                                         | 101 |
| FIGURA 5.4 – Caracterização e classificação do Solo 3 . . . . .                                                                         | 102 |
| FIGURA 5.5 – Comparativo entre curvas granulométricas dos três solos analisados                                                         | 102 |
| FIGURA 5.6 – Resultados do ensaio de teor de matéria orgânica . . . . .                                                                 | 103 |
| FIGURA 5.7 – Curvas de compactação dos solos ensaiados . . . . .                                                                        | 104 |
| FIGURA 5.8 – Imagens das amostras indeformadas e reconstituídas submetidas ao ensaio <i>crumb test</i> . . . . .                        | 105 |
| FIGURA 5.9 – Resultados do ensaio de capilaridade . . . . .                                                                             | 107 |
| FIGURA 5.10–Posicionamento dos solos dentro do ábaco erodibilidade da metodologia MCT . . . . .                                         | 108 |
| FIGURA 5.11–Ensaio Inderbitzen no Solo 1 em amostras indeformadas (I) e reconstituídas (R) . . . . .                                    | 110 |
| FIGURA 5.12–Ensaio Inderbitzen no Solo 1 em amostras reconstituídas com raízes (R05 e R10) . . . . .                                    | 111 |
| FIGURA 5.13–Ensaio Inderbitzen no Solo 2 em amostras indeformadas (I) e reconstituídas (R) . . . . .                                    | 113 |
| FIGURA 5.14–Ensaio Inderbitzen no Solo 2 em amostras reconstituídas com raízes (R05 e R10) . . . . .                                    | 114 |
| FIGURA 5.15–Ensaio Inderbitzen no Solo 3 em amostras indeformadas (I) . . .                                                             | 116 |
| FIGURA 5.16–Definição do fator de erodibilidade K para todos os casos do Solo 1                                                         | 118 |
| FIGURA 5.17–Definição do fator de erodibilidade K para todos os casos do Solo 2                                                         | 119 |
| FIGURA 5.18–Definição do fator de erodibilidade K para o Solo 3 . . . . .                                                               | 120 |
| FIGURA 5.19–Influência da inclinação na perda de solo total . . . . .                                                                   | 122 |
| FIGURA 5.20–Comparativo entre o peso específico aparente seco das amostras submetidas ao ensaio Inderbitzen . . . . .                   | 123 |
| FIGURA 5.21–Comparativo entre o teor de umidade inicial e final médio de cada tipo de amostra submetida ao ensaio Inderbitzen . . . . . | 124 |
| FIGURA 5.22–Comparativo de solos retidos na peneira #40 e #200 . . . . .                                                                | 126 |
| FIGURA 5.23–Aplicação dos resultados no critério de erodibilidade proposto por Bastos (1999) . . . . .                                  | 128 |
| FIGURA 5.24–Aplicação dos resultados dos ensaios Inderbitzen no critério de Briaud (2008) . . . . .                                     | 130 |
| FIGURA 5.25–Comparativo entre a definição do Fator $K_{EUPS}$ e o K estimado nos ensaios Inderbitzen . . . . .                          | 133 |

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 5.26–Seções transversais das soluções de estabilização das margens do canal da Rua Cyro Correia Pereira . . . . . | 136 |
| FIGURA 5.27–Implantação da solução de estabilização da margem . . . . .                                                  | 137 |
| FIGURA 6.1 – Síntese da metodologia proposta de ensaios e avaliação de parâmetros de erodibilidade . . . . .             | 138 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 2.1 – Efeitos da vegetação nas propriedades do solo e estabilidade de taludes e margens, com base nos trabalhos consultados . . . . .          | 26  |
| TABELA 2.2 – Tensão de erosão máxima para diferentes substratos com e sem coesão . . . . .                                                            | 32  |
| TABELA 2.3 – Principais modelos de previsão de erosão hídrica . . . . .                                                                               | 33  |
| TABELA 2.4 – Principais ensaios de erosão em laboratório . . . . .                                                                                    | 41  |
| <br>                                                                                                                                                  |     |
| TABELA 4.1 – Ensaios propostos na metodologia e documentos de referência . .                                                                          | 76  |
| TABELA 4.2 – Propriedades das raízes da espécie utilizada . . . . .                                                                                   | 84  |
| TABELA 4.3 – Definição das nomenclatura e quantidade de raízes aplicada nos corpos de prova reconstituídos . . . . .                                  | 85  |
| TABELA 4.4 – Problemas e situações encontradas na montagem e execução dos ensaios e providências tomadas . . . . .                                    | 92  |
| TABELA 4.5 – Resumo dos parâmetros utilizados para a confecção dos corpos de prova reconstituídos . . . . .                                           | 94  |
| TABELA 4.6 – Resumo dos tipos e condições aplicadas nos ensaios Inderbitzen .                                                                         | 98  |
| <br>                                                                                                                                                  |     |
| TABELA 5.1 – Resultados dos ensaios de erodibilidade específica . . . . .                                                                             | 108 |
| TABELA 5.2 – Resumo da classificação dos solos dentro dos critérios de erodibilidade MCT . . . . .                                                    | 108 |
| TABELA 5.3 – Comparativo entre os valores de tensão de cisalhamento limite para o início da erosão fluvial e tensões de cisalhamento críticas obtidas | 132 |
| <br>                                                                                                                                                  |     |
| TABELA C.1 – Parâmetros de entrada e resultados da análise de estabilidade global gerada no modelo SLIP4EX . . . . .                                  | 161 |
| TABELA C.2 – Verificações de tombamento, deslocamento horizontal e distância entre pilaretes da paliçada viva . . . . .                               | 161 |
| TABELA C.3 – Verificações de erosão e material carregado na paliçada viva . . . .                                                                     | 162 |
| TABELA C.4 – Verificações hidráulicas e hidrológicas da paliçada viva . . . . .                                                                       | 162 |
| TABELA C.5 – Verificações hidráulicas, hidrológicas e geotécnicas na esteira viva                                                                     | 163 |
| TABELA C.6 – Verificação de distância entre esteiras vivas através da EUPS . . .                                                                      | 164 |
| TABELA C.7 – Verificações hidráulicas e hidrológicas do muro gabião . . . . .                                                                         | 165 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |                                                                                                                   |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT      | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                                          |
| APENA     | Associação Portuguesa de Engenharia Natural                                                                       |
| CEPED     | Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres                                                       |
| DIN       | Instituto Alemão para Normatização<br>(do alemão: <i>Deutsches Institut für Normung</i> )                         |
| EFA       | <i>Erosion Function Apparatus</i>                                                                                 |
| DNER      | Departamento Nacional de Estradas e Rodagem                                                                       |
| EFIB      | Federação Europeia de Bioengenharia de Solos<br>(do alemão: <i>Europäische Föderation für Ingenieurbiologie</i> ) |
| EUPS      | Equação Universal de Perda de Solo                                                                                |
| ME        | Norma Mercosul                                                                                                    |
| MINEROPAR | Minerais do Paraná S.A.                                                                                           |
| NBR       | Norma Brasileira                                                                                                  |
| MCT       | Miniatura-Compacto-Tropical                                                                                       |
| ONU       | Organização das Nações Unidas                                                                                     |
| SI        | Sistema Internacional de Unidades                                                                                 |
| SUCS      | Sistema Unificado de Classificação de Solos                                                                       |
| UFPR      | Universidade Federal do Paraná                                                                                    |
| UFRGS     | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                                                                         |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |                                                  |
|-----------------|--------------------------------------------------|
| $t$             | Tempo                                            |
| $m$             | Massa                                            |
| $Q$             | Vazão                                            |
| $I$             | Intensidade da chuva                             |
| $u$             | Velocidade                                       |
| $d$             | Declividade                                      |
| $Rh$            | Raio hidráulico                                  |
| $c'$            | Intercepto coesivo                               |
| $\phi$          | Ângulo de atrito interno do solo                 |
| $MO$            | Teor de matéria orgânica                         |
| $w$             | Teor de umidade                                  |
| $\gamma_w$      | Peso específico da água                          |
| $\gamma_{sub}$  | Peso específico submerso do solo                 |
| $\gamma_d$      | Peso específico aparente seco                    |
| $\gamma_{nat}$  | Peso específico natural                          |
| $\rho d_{max}$  | Massa específica máxima do ensaio Proctor        |
| $\theta$        | Ângulo de inclinação do talude                   |
| $L$             | Comprimento de trecho inclinado                  |
| $h_l$           | Altura da camada                                 |
| $h$             | Altura da lâmina de fluxo                        |
| $b$             | Largura da calha                                 |
| $AA$            | Área da base do corpo de prova                   |
| $A_r$           | Área da seção transversal das raízes             |
| $R$             | Quantidade aproximada de raízes                  |
| $\tau_a$        | Tensão de cisalhamento aplicada                  |
| $\tau_c$        | Tensão de cisalhamento crítica                   |
| $\tau_0$        | Tensão de arraste                                |
| $\tau_{limite}$ | Tensão limite do substrato                       |
| $v_c$           | Velocidade crítica                               |
| $C_e$           | Coeficiente de escoamento                        |
| $n$             | Coeficiente de rugosidade                        |
| $K$             | Parâmetro de erodibilidade do ensaio Inderbitzen |
| $\varepsilon$   | Taxa de erosão                                   |

|             |                                                                                                           |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_x$       | Taxa de raízes                                                                                            |
| $A$         | Perda média anual de solo                                                                                 |
| $R$         | Fator erosividade da chuva                                                                                |
| $K_{EUPS}$  | Fator erodibilidade do solo da EUPS                                                                       |
| $LS$        | Índice topográfico                                                                                        |
| $C$         | Fator cultivo para cobertura e manejo do solo                                                             |
| $P$         | Fator de práticas conservacionistas                                                                       |
| $M$         | Produto da porcentagem de silte + areia muito fina e porcentagem de todas as frações que não sejam argila |
| $B$         | Fator qualitativo da estrutura do solo                                                                    |
| $C$         | Fator qualitativo de permeabilidade                                                                       |
| $D_g$       | Diâmetro médio geométrico distribuição granulométrica                                                     |
| $\alpha$    | Coeficiente linear de ajuste                                                                              |
| $\beta$     | Coeficiente exponencial de ajuste                                                                         |
| $s'$        | Coeficiente de sorção                                                                                     |
| $p_i$       | Perda de massa por imersão                                                                                |
| $C_v$       | Coeficiente de cobertura vegetal                                                                          |
| $PS_s$      | Perda de solo acumulada                                                                                   |
| $PS_a$      | Perda de solo por área                                                                                    |
| $M_{\#40}$  | Massa de solo seco retida na peneira #40                                                                  |
| $M_{\#200}$ | Massa de solo seco retido na peneira #200                                                                 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                       |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                     | <b>18</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS                                                                             | 19        |
| 1.2      | JUSTIFICATIVA                                                                         | 20        |
| 1.3      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO                                                              | 23        |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                                            | <b>24</b> |
| 2.1      | MOVIMENTOS DE MASSA EM MARGENS DE CURSOS D'ÁGUA E O<br>USO DA VEGETAÇÃO COMO PROTEÇÃO | 24        |
| 2.1.1    | Efeitos mecânicos e hidráulicos da vegetação no solo                                  | 27        |
| 2.2      | FENÔMENOS EROSIVOS E A ERODIBILIDADE DE SOLOS                                         | 30        |
| 2.2.1    | Modelo de previsão de erosão — Equação Universal de Perda de Solo                     | 32        |
| 2.3      | ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE                                          | 37        |
| 2.3.1    | Ensaio de erosão Inderbitzen                                                          | 41        |
| 2.3.1.1  | Parâmetros do ensaio e modificações no equipamento                                    | 44        |
| 2.3.2    | Ensaio de erosão por metodologia MCT                                                  | 46        |
| 2.3.3    | Ensaio de dispersão <i>crumb test</i> e ensaio de teor de matéria orgânica            | 49        |
| 2.4      | FUNÇÃO DA VEGETAÇÃO NO CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS                                 | 50        |
| 2.4.1    | Relação entre taxa de erosão e cobertura vegetal                                      | 50        |
| 2.5      | TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL                                                        | 54        |
| 2.5.1    | Tipos de intervenções e características de projeto                                    | 56        |
| <b>3</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>                                               | <b>60</b> |
| 3.1      | ASPECTOS GERAIS DO BAIRRO VITÓRIA RÉGIA                                               | 60        |
| 3.2      | PROCESSOS EROSIVOS COMUNS NOS CANAIS DA REGIÃO                                        | 66        |
| 3.2.1    | Diagnóstico e dados do trecho do projeto de estabilização das margens                 | 69        |
| 3.3      | PROJETO CONCEITUAL DA ESTRUTURA DE ESTABILIZAÇÃO                                      | 73        |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                            | <b>76</b> |
| 4.1      | DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL                                   | 76        |
| 4.2      | PROGRAMA EXPERIMENTAL                                                                 | 77        |
| 4.2.1    | Extração de amostras e caracterização física                                          | 77        |
| 4.2.2    | Ensaio de compactação                                                                 | 80        |
| 4.2.3    | Ensaio de dispersibilidade <i>crumb test</i> e ensaio de teor de matéria orgânica     | 80        |
| 4.2.4    | Ensaio de erodibilidade por metodologia MCT                                           | 81        |
| 4.2.5    | Caracterização da espécie vegetal em estudo                                           | 83        |
| 4.3      | MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS INDERBITZEN                                        | 86        |

|                   |                                                                                              |            |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.1             | Procedimentos para produção de corpos de prova e ensaios . . . . .                           | 93         |
| <b>5</b>          | <b>RESULTADOS . . . . .</b>                                                                  | <b>99</b>  |
| 5.1               | CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, COMPACTAÇÃO E ENSAIOS QUALITATIVOS DE EROSÃO . . . . .               | 99         |
| 5.1.1             | Caracterização do solo . . . . .                                                             | 99         |
| 5.1.2             | Ensaio de compactação . . . . .                                                              | 103        |
| 5.1.3             | Ensaio de dispersibilidade (crumb test) . . . . .                                            | 104        |
| 5.1.4             | Ensaio de erosão por metodologia MCT . . . . .                                               | 106        |
| 5.2               | ENSAIOS DE EROSÃO INDERBITZEN . . . . .                                                      | 109        |
| 5.2.1             | Aplicação dos resultados em critérios de erosão . . . . .                                    | 127        |
| 5.3               | PROJETO BÁSICO DA ESTRUTURA DE ESTABILIZAÇÃO . . . . .                                       | 133        |
| 5.3.1             | Definição do fator de erodibilidade K-EUPS e demais parâmetros de projeto                    | 133        |
| 5.3.2             | Detalhamento da estrutura de estabilização das margens do canal de drenagem . . . . .        | 135        |
| <b>6</b>          | <b>CONCLUSÕES . . . . .</b>                                                                  | <b>138</b> |
| 6.1               | RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EROSÃO E ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA . . . . .                 | 139        |
| 6.2               | MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS INDERBITZEN . . . . .                                     | 141        |
| 6.3               | ESTIMATIVAS DE EROSÃO E PROJETO DE ENGENHARIA NATURAL                                        | 143        |
| 6.4               | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .                                               | 144        |
|                   | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                                                                 | <b>145</b> |
| <b>APÊNDICE A</b> | <b>CÓDIGO ARDUINO DOS MEDIDORES DE NÍVEL D'ÁGUA E SENSOR DE UMIDADE . . . . .</b>            | <b>157</b> |
| <b>APÊNDICE B</b> | <b>EXEMPLO DE TABELA DE ANOTAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS INDERBITZEN . . . . .</b>             | <b>159</b> |
| <b>APÊNDICE C</b> | <b>MEMORIAL DE CÁLCULO DAS ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO DAS MARGENS DO CANAL DE DRENAGEM</b>  | <b>161</b> |
| <b>APÊNDICE D</b> | <b>SEÇÕES TRANSVERSAIS E IMPLANTAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO DA MARGEM . . . . .</b> | <b>171</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A responsabilidade ambiental é uma questão que acerca a Engenharia. Grande parte das construções causam significativas mudanças na paisagem e alteram a dinâmica natural do ambiente em que estão inseridas. São cada vez mais necessárias medidas de redução dos impactos, alinhando as necessidades da sociedade atual com a preservação do meio ambiente. Nesse sentido, o manejo de bacias hidrográficas dentro do ambiente urbano é uma questão que merece discussão: os impactos do crescimento urbano fizeram com que os cursos d'água perdessem gradativamente seu papel como elemento da paisagem, gerando respostas na forma de prejuízos ambientais e danos socioeconômicos (BAPTISTA; CARDOSO, 2013).

Este trabalho discute o projeto de canais de drenagem, elementos comuns nas cidades e artificialmente construídos para conduzir águas pluviais providas de sistemas de drenagem de menor capacidade. Os canais podem possuir uma condição semelhante a um rio natural, com uma interação entre o canal e o ambiente ao seu redor, desenvolvimento de vegetação ripária e escoamento permanente ou perene.

Uma questão de grande importância nos canais é a erosão hídrica, o processo de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos pela água. É um fenômeno natural que ocorre de maneira contínua, fazendo parte dos ciclos geológicos. No entanto, alterações de origem antrópica podem tornar a erosão um grave problema, com o transporte de grandes volumes de solo, danos à paisagem e deflagração de movimentos de massa. Nesse sentido, é de grande importância no manejo de bacias hidrográficas levar em consideração fenômenos erosivos e, se necessário, utilizar-se de intervenções (FENDRICH et al., 1997).

A vegetação pode exercer um importante papel no controle de processos erosivos em cursos d'água. A camada vegetal reduz significativamente a quantidade de material carregado pela minimização do impacto das gotas de chuva no solo, redução da velocidade e do volume do fluxo superficial e capacidade de ancoramento do solo (GYSSELS et al., 2005).

A utilização de materiais naturais vivos para contenção de processos erosivos é uma técnica bastante antiga, com primeiros relatos de utilização datados do século XVII (EVETTE et al., 2009). Atualmente conhecida como Bioengenharia de Solos ou Engenharia Natural<sup>1</sup>, pode ser definida como a combinação de técnicas que utilizam elementos vivos como material de construção, através do conhecimento da suas

<sup>1</sup> Ambas são as denotações utilizadas para identificar o ramo, sendo que cada país possui um termo mais utilizado. O termo em português, Engenharia Natural, foi adotado pela APENA (Associação Portuguesa de Engenharia Natural). Na literatura internacional, predomina o termo *Soil Bioengineering*.

propriedades mecânicas e biológicas (REY et al., 2019). Em contraste com soluções "tradicionais" de Engenharia, como canais de concreto, os materiais naturais podem reduzir uma série de danos ambientais. A utilização de Engenharia Natural procura emular uma condição de curso d'água natural, com desenvolvimento de vida, harmonia paisagística, flexibilidade para o escoamento de água encontrar posições de equilíbrio dinâmico, com reduções na impermeabilização do solo e velocidade do fluxo, além do baixo impacto ambiental.

Sendo um sistema fortemente pautado na interação entre as plantas e o ambiente no entorno, a Engenharia Natural possui muitos aspectos ligados à Geotecnia. Associando-se materiais inertes e vegetação, podem ser produzidas soluções de contenção, ancoragem de taludes, drenagem, dissipadores de energia e elementos para controle de processos erosivos. A utilização de vegetação para finalidades de Engenharia passa por um entendimento técnico das características e processos envolvidos. Nesse sentido, o estudo da erosão no solo — tema bastante discutido nas áreas de Geografia e Geologia, mas que deveria ser mais discutido na Geotecnia — pode servir para a otimização e sucesso de projetos. A propriedade geotécnica investigada neste trabalho é a erodibilidade, definida como o parâmetro que retrata a facilidade com que as partículas de solo são carregadas por um fluxo hidráulico (BASTOS, 1999; BRIAUD et al., 2019).

Dentro do contexto apresentado, são temas da presente pesquisa: o estudo da erodibilidade de solos aluvionares presentes em um curso d'água artificial; a proposta de uma metodologia experimental para levantamento de propriedades geotécnicas de erodibilidade e a aplicação da metodologia proposta em um projeto de estabilização em Engenharia Natural.

Além da etapa experimental e teórica, o trabalho apresenta a caracterização de canais de drenagem do bairro Vitória Régia, em Curitiba-PR, onde processos erosivos e movimentos de massa foram verificados. As informações sobre a região foram utilizadas para duas finalidades: (a) coleta de amostras de solo de um dos canais e realização de ensaios de caracterização e ensaios de erodibilidade e (b) apresentação da concepção de um projeto conceitual e básico de contenção em Engenharia Natural, utilizando informações provenientes da etapa experimental.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho propõe uma metodologia experimental para a investigação de propriedades geotécnicas relacionadas à erodibilidade, através de ensaios qualitativos e quantitativos de erosão, tendo aplicação em estruturas de estabilização de margens em Engenharia Natural.

Como objetivos específicos, a pesquisa busca:

- Avaliar os resultados de ensaios quantitativos de erosão (Inderbitzen) e qualitativos (*crumb test* e erodibilidade por metodologia MCT<sup>2</sup>) em solos de diferentes características obtidos no canal em estudo;
- Propor alterações no ensaio de erosão Inderbitzen, de forma a quantificar a tensão hidráulica cisalhante e facilitar a obtenção de parâmetros;
- Verificar influência da reconstrução da amostra com a adição de raízes na forma de fibras aleatórias nos resultados de ensaios de erosão;
- Caracterizar um canal de drenagem de uma região sujeita à processos erosivos e projetar uma solução básica de estabilização em Engenharia Natural.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As cidades têm concentrado grande parcela da população global. Segundo o relatório da World Urbanization Prospects (ONU, 2018), 54% da população mundial vive atualmente em espaços urbanos, com forte perspectiva de crescimento: estima-se que essa percentagem seja de 68% em 2050. A situação brasileira acompanha a tendência global de maneira mais acelerada. Estima-se que 87% da população atual do país viva em cidades (ano de 2021), percentagem que era de apenas 36% na década de 1950.

O acentuado crescimento da população urbana gera grandes desafios para o desenvolvimento das cidades, sobretudo em países menos desenvolvidos. No âmbito da Engenharia, evitar a ocupação de áreas inapropriadas, como encostas íngremes, áreas sujeitas à inundações, áreas de proteção permanente ou geologicamente instáveis, levar saneamento aos habitantes, prover habitação e infraestrutura são notórios desafios. Água tratada, esgoto, coleta de resíduos sólidos e drenagem — serviços bases do saneamento — são pontos essenciais para se garantir uma adequada condição de vida às pessoas.

Um problema fortemente ligado à urbanização são as enxurradas<sup>3</sup>. A impermeabilização dos terrenos, alterações nos cursos naturais dos rios, descarte inadequado de resíduos sólidos e sistemas de drenagem inadequados provocam grandes vazões durante precipitações, que extravasam leitos, invadem lotes, ruas e estabelecimentos, gerando prejuízos financeiros e danos humanos.

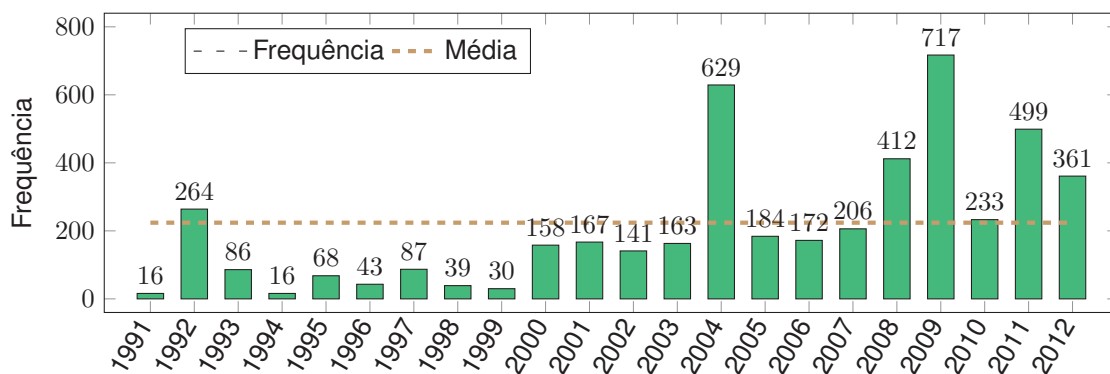
Os danos socioeconômicos das enxurradas nas cidades vêm aumentando nos últimos anos, o que reduz a qualidade de vida, afeta a população e o valor das

<sup>2</sup> Miniatura, compacto, tropical

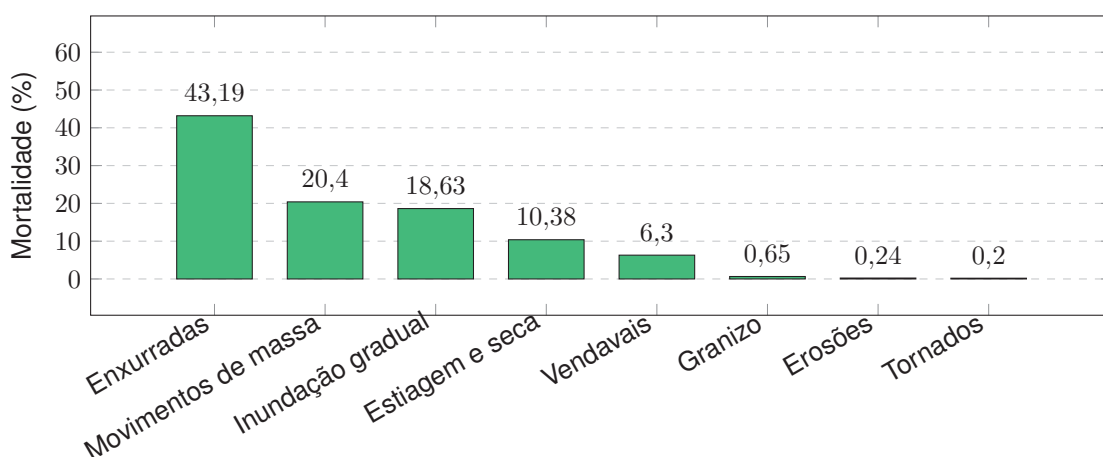
<sup>3</sup> Segundo a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), as inundações urbanas súbitas em pequenas bacias são denominadas enxurradas, uma tentativa de padronização de nomenclatura (CEPED, 2012).

propriedades. Como exemplo, conforme mensuração do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2012), ocorreram 4.691 desastres relacionados à enxurradas entre os anos de 1991 e 2012 no Brasil (Figura 1.1(a)), sendo a causa de cerca de 43,19% dos óbitos humanos relacionados à desastres no país (Figura 1.1(b)).

FIGURA 1.1 – Frequência anual de desastres por enxurradas no Brasil e porcentagem de óbitos relacionados ao tipo de ocorrência no período de 1991 a 2012



(a) Frequência anual de desastres por enxurradas no período estudado



(b) Óbitos humanos associados ao tipo de desastre, em porcentagem

FONTE: Adaptado de CEPED (2012)

A ocorrência de enxurradas é condicionada por fatores naturais, como precipitações intensas ou fenômenos meteorológicos, como o *El Niño* (CEPED, 2012). Porém, os acontecimentos ocorrem quase sempre em centros urbanos, locais com alta impermeabilização dos terrenos. Nos séculos XIX e XX, período inicial da urbanização, foram tomadas medidas para evitar a disseminação de doenças, baseadas em "afastar" os corpos hídricos dos centros urbanos, evitando a estagnação de águas contaminadas. Essas ações ficaram conhecidas como medidas higienistas (BAPTISTA; CARDOSO, 2013). A canalização de cursos d'água, construção de valas, galerias subterrâneas e drenagem de áreas de várzea foram exemplos de medidas adotadas. No contexto atual, essas ações impedem que os rios se integrem à paisagem urbana e respondam naturalmente a situações de cheias, gerando diminuições no tempo de concentração

das bacias hidrográficas, morte de espécies aquáticas, aumento de velocidades de fluxo e enxurradas.

Para Tucci (1995), os modelos de drenagem baseados em escoar o volume de água o mais rápido possível estão se mostrando ineficientes e perigosos. Segundo Silveira (2002), o período atual é uma transição entre essas concepções do século XIX, para um modelo de drenagem que possui uma abordagem ambiental, baseado em retenção, convivência com corpos hídricos e aumento nas taxas de infiltração. Além de uma ocupação racional, mantendo condições de permeabilidade dos terrenos, um sistema de drenagem eficiente é essencial para prevenir enxurradas, erosões e movimentos de massa, evitando prejuízos econômicos e sociais.

Sendo assim, existe um grande desafio para cidades em crescimento: drenar grandes áreas ocupadas considerando, além da parte técnica, aspectos sociais, econômicos, políticos e ambientais (BURIAN; EDWARDS, 2002). Para melhorar o ecossistema urbano, a tendência deve ser de adotar estratégias que conciliem a questão ambiental e social, permitindo um crescimento sustentável da cidade, mantendo ao máximo o aspecto ambiental natural (LU et al., 2015).

O estudo da erosão urbana tem significativa importância no contexto da drenagem sustentável e da convivência com corpos hídricos. No parcelamento do solo, loteamento e construção, a camada superficial do solo tem sua estrutura alterada, devido à retirada da cobertura vegetal e à movimentações de terra, tornando-se mais suscetível a ser movimentada por agentes erosivos (TUCCI; COLLISCHONN, 1998). Com a chuva, as partículas carregadas nos lotes se depositam em rios ou canais, assoreando a seção e reduzindo a capacidade de escoamento. Os sedimentos nas áreas urbanas são gerados na maioria das vezes em lotes particulares, tornando-se um problema público quando atingem o sistema de drenagem (GUY, 1970).

Na redução de processos erosivos, proteção natural de riscos e revitalização de cursos d'água, uma das mais reconhecidas técnicas é a Engenharia Natural, conhecida também como Bioengenharia de Solos. A principal característica das técnicas é o uso de vegetação como material de construção, trazendo benefícios ecológicos e paisagísticos. A utilização de materiais vivos é esteticamente agradável e permite um manuseio de cursos d'água de maneira sustentável. Rey et al. (2019) citam que a Engenharia Natural combina técnica e prática para o manejo da natureza, tendo como norte a maximização dos benefícios para os humanos e o meio ambiente.

A Engenharia Natural ainda é pouco conhecida e empregada no Brasil. Segundo Durlo e Sutili (2014), não existe conhecimento suficiente que possibilite a implantação ampla das obras. Mesmo em âmbito internacional a Engenharia Natural encontra-se em um estágio descritivo de desenvolvimento (SUTILI; GAVASSONI, 2017). Somente com uma visão sistemática, decorrente de estudos, experimentos e

observações, será possível o emprego dessas técnicas em nosso meio. A ideia é a mesma apresentada por Rey et al. (2019), que propõem que o desenvolvimento da técnica demanda pesquisa interdisciplinar, conhecimento prático, documentos para referência e construção de obras para análise de sucessos e falhas.

A atribuição de parâmetros de Engenharia a um sistema natural e heterogêneo é um desafio, pois existem pontos poucos resolvidos na literatura que precisam ser estudados (SUTILI; GAVASSONI, 2017). Nesse sentido, a Engenharia Geotécnica pode contribuir para projetos de sucesso através de ferramentas de análise, estimativas de comportamento do solo e avaliação de processos geológicos. A interação entre solo e plantas é um dos temas mais relevantes de recentes pesquisas na área de Geotecnia Ambiental e de significativa importância para a Engenharia Natural.

Sendo assim, justifica-se o trabalho como uma contribuição para a realização de projetos de estabilização de margens de canais de drenagem em Engenharia Natural. A metodologia proposta visa estimar parâmetros necessários em análises de erosão através de ensaios de baixo custo, realizando-se um comparativo entre abordagens empíricas e experimentais.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada no seguintes capítulos:

- Capítulo 1 - Breve introdução e exposição do problema de pesquisa, apresentação dos objetivos gerais, objetivos específicos e a justificativa da pesquisa;
- Capítulo 2 - Referencial teórico sobre o tema e a revisão bibliográfica, abordando conceitos e pesquisas relevantes na área;
- Capítulo 3 - Caracterização do local em estudo, descrição de processos erosivos avaliados através de mapeamento da área e projeto conceitual de estabilização para o canal de drenagem avaliado;
- Capítulo 4 - Materiais e métodos desenvolvidos durante a etapa experimental;
- Capítulo 5 - Resultados dos ensaios realizados, comparativos, apresentação do projeto de estabilização e análise dos resultados obtidos;
- Capítulo 6 - Conclusões obtidas e recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, são apresentadas as referências citadas e os apêndices, um conjunto de documentos complementares ao trabalho e produzidos pelo autor.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um levantamento de literatura sobre aspectos relevantes ao desenvolvimento do trabalho e fundamentos teóricos sobre o tema. A primeira seção exibe uma revisão sobre movimentos de massa em margens de cursos d'água e pesquisas relacionadas à interação entre solo e vegetação (seção 2.1). As seções 2.2 e 2.3 tratam do tema processos erosivos, apresentando conceitos sobre origem e modelagem do fenômeno na primeira parte e ensaios de laboratório para determinação da erodibilidade do solo na segunda. A seção 2.4 tem como tema a discussão da função da vegetação no controle de processos erosivos. O capítulo finaliza com a seção 2.5, que discute técnicas de Engenharia Natural empregadas em canais de drenagem e aspectos de projeto.

### 2.1 MOVIMENTOS DE MASSA EM MARGENS DE CURSOS D'ÁGUA E O USO DA VEGETAÇÃO COMO PROTEÇÃO

Os cursos d'água podem ser descritos como sistemas dinâmicos, o que significa que estão sempre em um constante estado de mudança (HOLANDA; ROCHA, 2011). Nos taludes marginais aos rios e canais, os processos que causam movimentos de massa são resultados da interação entre forças gravitacionais e forças hidráulicas (POLLEN-BANKHEAD; SIMON, 2010). Segundo Simon et al. (2000), uma margem pode se tornar instável por cinco mecanismos:

- Aumento do peso específico do solo devido ao acréscimo do teor de umidade por infiltração e acúmulo de água;
- Queda da sucção matricial, que diminui ou anula completamente a coesão aparente do solo;
- Geração de poropressão positiva e queda ou perda total da resistência ao cisalhamento;
- Arraste de material da base da margem por erosão e consequente desconfinamento;
- Redução no nível d'água após situações de precipitação intensa — o nível d'água alto age como contrapeso e estabiliza a margem.

Dependendo da geometria, do tipo de solo, da estratigrafia, das condições do entorno e do regime de chuva, cada canal é mais ou menos propenso a um desses efeitos em específico. Os efeitos também podem ser sazonais, sendo que um mecanismo pode ser mais crítico em uma determinada parte do ano, devido a

períodos chuvosos ou secos (POLLEN-BANKHEAD; SIMON, 2010). Uma condição de instabilidade causada por uma combinação de mecanismos também pode ocorrer.

Quanto ao formato, as rupturas das margens ocorrem de maneira rotacional ou planar. As rupturas rotacionais são mais danosas, apesar de raras (SIMON et al., 2000). A maioria das rupturas ocorrem de maneira planar e rasa, com retirada de material da base da margem por forças hidráulicas (SIMON, 1989). As rupturas de margens têm sido mais frequentemente reportadas logo após períodos de chuvas intensas, quando o nível de água no canal diminui. Essa situação pode ser interpretada como análoga à condição de rebaixamento rápido de nível freático, já que o nível de água no canal, quando alto, atua de maneira contrária à tendência de movimento do talude (Thorne, 1990 apud Simon et al. (2000)).

É comum que margens de canais apresentem ângulos de inclinação bem superiores aos ângulos de atrito típicos de solos, que usualmente variam entre 20° e 32°, sem apresentar perda de estabilidade. Explica-se o fato pela presença de forças coesivas entre partículas de solo, forças que podem ser oriundas de ligações químicas, efeitos de sucção e/ou ancoragens externas (GABRIELI et al., 2012).

A vegetação ripária, encontrada nas proximidades de cursos d'água, desempenha um importante papel na proteção do solo e prevenção de movimentos de massa (DURLO; SUTILI, 2014). Porém, a interação entre as características mecânicas da vegetação e os mecanismos de movimentação de margens é muito complexa, pois existe uma grande quantidade de variáveis envolvidas, relacionadas a arquitetura e tipo do sistema de raízes e parâmetros físicos e mecânicos dos solos (LOADES et al., 2010; POLLEN-BANKHEAD; SIMON, 2010).

Diversos trabalhos vêm quantificando os efeitos da vegetação no solo e o seu papel na redução de movimentos de massa em margens e taludes, como, por exemplo, Gray e Leiser (1982), Coppin e Richards (1990), Morgan e Rickson (2003) e Norris et al. (2008). Como a parcela relativa à raízes e à presença da parte folhosa das plantas influenciam nas características hidráulicas e de resistência do solo, os autores diferenciam os efeitos em mecânicos e hidráulicos. Na maioria dos casos, são efeitos positivos que aumentam a resistência do solo e conferem resistência à erosão.

Entretanto, a cobertura vegetal pode apresentar alguns efeitos desfavoráveis na estabilidade dos taludes. Pode-se citar, por exemplo, o aumento da sobrecarga nos taludes pelo peso da vegetação, a carga de vento no corpo de árvores altas, acréscimos de poropressão causados pelo aumento de infiltração e o eventual apodrecimento de raízes no solo, criando vazios que acumulam água e são propensos à erosão (SIMON; COLLISON, 2002). Porém, os efeitos favoráveis da vegetação são superiores aos desfavoráveis para a estabilização na grande maioria dos casos (MORGAN; RICKSON,

2003; CAZZUFFI et al., 2014). Esses efeitos podem ser classificados em três grupos: efeitos mecânicos, efeitos hidráulicos e efeitos na redução da erosão.

Com base nos trabalhos de Coppin e Richards (1990), Morgan e Rickson (2003), Durlo e Sutili (2014), Norris et al. (2008) e Sousa (2015), é apresentado na Tabela 2.1 um resumo dos efeitos geotécnicos da vegetação. Para dar ênfase aos efeitos relativos à erosão, foi utilizado no presente trabalho uma classificação em três categorias: mecânicos, hidráulicos e erosivos.

TABELA 2.1 – Efeitos da vegetação nas propriedades do solo e estabilidade de taludes e margens, com base nos trabalhos consultados

| Tipo        | Efeito                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mecânicos   | <p>(+) Aumento da resistência ao cisalhamento devido à contribuição da parcela de resistência das raízes.</p> <p>(+) Ancoragem, arqueamento e escoramento com a penetração de raízes em camadas profundas do solo, que possuem efeitos semelhantes a grampos.</p> <p>(+) Confinamento de partículas de solo na região das raízes, impedindo movimentos que não sejam em conjunto.</p> <p>(+) Redistribuição de tensões e ancoragem de fraturas e vazios no solo.</p> <p>(-) Acréscimo de cargas normais e tangentes na margem devido ao peso próprio da vegetação.</p> <p>(-) Ação de forças de vento em árvores.</p>                                                                                                                                                                           |
| Hidráulicos | <p>(+) Interceptação da chuva, retenção na parte folhosa e tronco e infiltração no solo com menor pico.</p> <p>(+) Evaporação de parte da água retida na planta, que acaba não alcançando o solo, o que reduz a infiltração efetiva.</p> <p>(+) Redução do teor de umidade do solo devido à transpiração e aumento na sucção matricial.</p> <p>(+) Escoamento superficial e valor de <i>runoff</i> menor em um comparativo com o solo exposto, pelo conjunto de ações de interceptação, infiltração e aumento de rugosidade do solo.</p> <p>(-) Ação biológica que cria macroporos e aumenta a permeabilidade do solo, contrabalanceado pelo aumento da sucção, que causa redução da permeabilidade do solo.</p>                                                                                |
| Erosivos    | <p>(+) Proteção do solo contra ação erosiva do impacto mecânico de gotas de chuva e outros agentes, como vento e temperatura.</p> <p>(+) Redução da altura de queda das gotas de chuva devido a interceptação e retenção, o que diminui a energia cinética.</p> <p>(+) Ancoramento do solo e redução da erosão subsuperficial causada pelo escoamento de água na superfície do talude/margem.</p> <p>(-) Aumento do tamanho das gotas de chuva, o que causa maior impacto localizado.</p> <p>(-) Criação de caminhos preferencias para o escoamento com maior energia erosiva no caso de cobertura vegetal não uniforme.</p> <p>(-) Extração prolongada de água pelas raízes pode causar a dissecação e formação de fissuras de retração, efeitos semelhantes a casos de solos expansíveis.</p> |

A seção 2.1.1 apresenta alguns aspectos dos efeitos mecânicos e hidráulicos da vegetação do solo. O uso da vegetação para proteção de processos erosivos, pela importância dos conceitos para o desenvolvimento do presente trabalho, é apresentado com destaque na seção 2.2.

### 2.1.1 Efeitos mecânicos e hidráulicos da vegetação no solo

A ação das raízes no solo é análoga a adição de fibras, onde o conjunto solo e raízes forma um material composto, de resistência superior a condição do solo sem raízes (GRAY; LEISER, 1982). Quando solicitadas, as raízes desenvolvem tração, resistência praticamente inexistente no solo. Continuamente solicitadas, as raízes chegam a um limite, que acontecerá através de arrancamento ou ruptura. A resistência do conjunto depende então da resistência à tração das raízes e das forças de atrito e coesivas no solo. Segundo Cazzuffi et al. (2014), a heterogeneidade do crescimento das raízes faz com que seus incrementos de resistência variem espacialmente, com efeitos mais pronunciados na superfície.

Existe uma série de estudos que quantificam o papel das raízes na resistência do solo, com modelos analíticos, baseados em ensaios de laboratório ou campo (p. ex. Wu et al. (1988), Coppin e Richards (1990), Wu (2013) e Maffra (2018). Wu (2013) apresenta uma revisão de modelos de interação solo-raízes, com diversos resultados de ensaios que quantificam variáveis de entrada importantes, como profundidade, resistência à tração, quantidade por unidade de área de raízes e ensaios de arrancamento e cisalhamento.

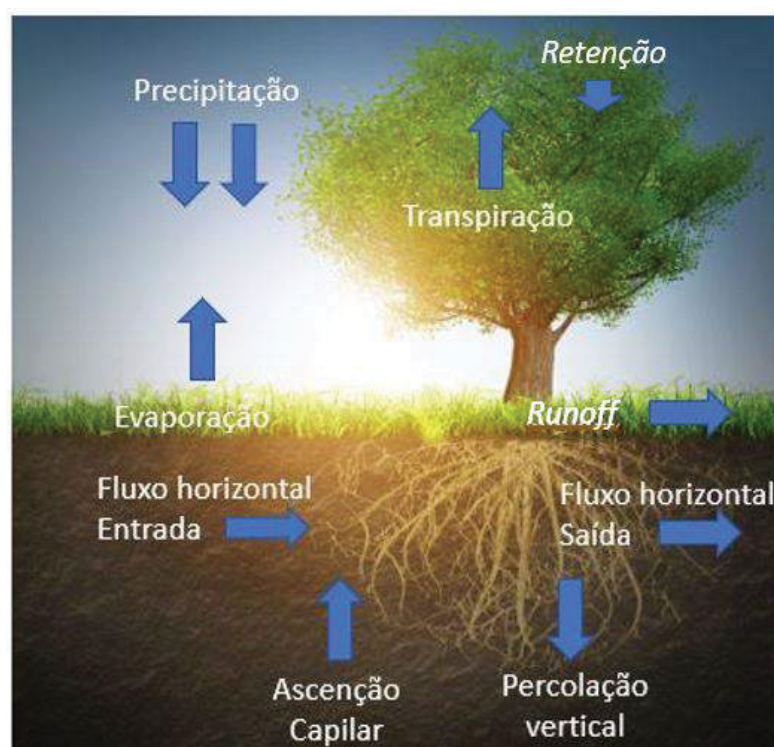
Os modelos analíticos incorporam a parcela relativa às raízes nas equações constitutivas que representam a resistência ao cisalhamento do solo (CAZZUFFI et al., 2014). Experimentalmente, verifica-se que a contribuição das raízes se dá, majoritariamente, nos parâmetros de coesão, não possuindo muitos efeitos no ângulo de atrito interno (COPPIN; RICHARDS, 1990; OPERSTEIN; FRYDMAN, 2000; MAFFRA, 2018).

Além disso, as raízes geram efeitos localizados, que, em conjunto, agem conferindo mais resistência ao solo e confinando partículas, impedindo movimentos isolados (SOUSA, 2015). Essas raízes possuem efeito de esteira ou manta, o que é especialmente importante em estabilidade de margens fluviais, por conter escorregamentos rasos e diminuição da ação erosiva (COPPIN; RICHARDS, 1990).

Em um comparativo com os efeitos mecânicos, os efeitos hidráulico-hidrológicos da vegetação no solo são menos quantificados, apesar de bastante discutidos. Esse fato é decorrente da dificuldade de obter dados e parâmetros do conjunto solo raiz (SIMON; COLLISON, 2002; POLLEN-BANKHEAD; SIMON, 2010). Os efeitos hidrológicos são majoritariamente decorrentes da influência da vegetação no balanço hídrico no solo (THOMPSON et al., 2010; COMEGNA et al., 2013).

Conforme Dingman (2001), consultado em Pollen-Bankhead e Simon (2010), quando a água atinge a superfície do solo, alguns caminhos são possíveis: a água pode infiltrar no solo, alimentando o lençol freático; escoar superficialmente como *runoff* ou ficar retida na camada de vegetação e evaporar. Na subsuperfície, pode também ocorrer um fluxo de entrada ou saída de água (movimento horizontal) ou ascensões capilares na zona de solo não saturada. Como resumo, na Figura 2.1 são ilustrados os efeitos da vegetação no balanço hídrico do solo, tendo como base os trabalhos de Simon e Collison (2002), Pollen-Bankhead e Simon (2010) e Comegna et al. (2013).

FIGURA 2.1 – Efeitos da vegetação no balanço hídrico do solo



FONTE: O autor

A parte aérea da vegetação é responsável por interceptar as gotas de chuva, retendo-as na parte folhosa e liberando mais lentamente no solo, atrasando o pico de infiltração (DUNKERLEY, 2000). Essa parte também é responsável por atuar na evapotranspiração (soma da transpiração da vegetação com a água que evapora na superfície do solo) e retenção.

Na parte subterrânea, a distribuição da água infiltrada depende de forças gravitacionais e de capilaridade, além das propriedades do solo, como distribuição granulométrica, conectividade entre poros e quantidade de água já existente (SIMON; COLLISON, 2002). Ainda segundo os autores, quando o solo está mais seco, a água ascende pelos processos de transpiração e evaporação das plantas, pela necessidade biológica das mesmas, tendo influência no aumento da sucção do solo, pelo

aumento das tensões capilares. Ng et al. (2016) e Yildiz et al. (2019) avaliaram que a evapotranspiração é menor quanto maior foi a cobertura vegetal do solo, devido a redução da radiação solar diretamente na superfície do solo e, conseqüentemente, menor evaporação.

A habilidade das plantas de manter a sucção e criar uma proteção superficial do solo são importantes no estudo de fenômenos erosivos. As forças capilares podem evitar a desagregação de partículas em alguns casos. Ciclos de secagem e umedecimento e alterações no estado de tensões podem causar efeitos de desagregação e deslocamento, tornando-os mais propensos a ser carregados por agentes erosivos (GABRIELI et al., 2012).

Como efeitos hidráulicos da vegetação no solo, têm-se o aumento da infiltração e permeabilidade. A depender de características como quantidade de matéria orgânica, forma do sistema radicular, canais ou fissuras formados por raízes em processo de apodrecimento e aumentos na porosidade do solo, estudos indicam que áreas vegetadas podem ter taxas de infiltração mais altas se comparadas com áreas não cobertas (COPPIN; RICHARDS, 1990; SOUSA, 2015).

Dada a complexidade do sistema solo-vegetação apresentada nos parágrafos anteriores, a quantificação dos efeitos da vegetação na estabilidade de massas de solo não costuma ser realizada. Segundo Cazzuffi et al. (2014), observações de campo mostram que a remoção da vegetação e árvores de taludes naturais geralmente leva a um aumento de movimentos de massa. A redução da solicitação do talude (ação do vento e peso das árvores) é insignificante perto do da redução de resistência ao cisalhamento, ausência do efeito de retardo da infiltração e efeitos das plantas na redução do material carregado (COPPIN; RICHARDS, 1990). Quando as árvores são cortadas, o apodrecimento de raízes causa o aparecimento de vazios na massa de solo, facilitando a erosão.

Portanto, na grande maioria dos casos, a vegetação exerce um importante papel na estabilidade de taludes (COPPIN; RICHARDS, 1990; CAZZUFFI et al., 2014; BOLDRIN et al., 2017).

## 2.2 FENÔMENOS EROSIVOS E A ERODIBILIDADE DE SOLOS

A erosão é um processo de desagregação, transporte e deposição de solos e rochas, tendo como agente de transporte a água, vento ou geleiras (SUGUIO, 2003). Os processos erosivos são responsáveis por grande parte da modelagem do relevo terrestre e o principal responsável pela forma e extensão dos cursos d'água (CASSOL et al., 2018).

O termo erosão geológica identifica os processos lentos, que ocorrem sem a consequência da intervenção humana (FENDRICH et al., 1997; SUGUIO, 2003). Todavia, ações antrópicas têm influência no sentido de acelerar os processos erosivos, definindo assim a erosão acelerada — pequenas ou grandes alterações humanas que aumentam a velocidade do fenômeno, modificando paisagens e gerando quantidades significativas de sedimentos. A erosão acelerada é considerada um dos mais significativos problemas de cunho socioeconômico e ambiental da atualidade (WANG et al., 2013).

Os processos investigados no presente trabalho são as erosões hidráulicas de origem pluvial e fluvial. Na sequência do trabalho, o termo erosão refere-se à esses processos. A erosão causa prejuízos em cursos d'água, na forma de perda de seção transversal, remoção da camada superficial da superfície da bacia hidrográfica e susceptibilidade à movimentos de massa. Exemplos de erosões pluviais e fluviais são retratados na Figura 2.2. Cabe citar que a Figura 2.2 (b) retrata o canal principal da região em estudo<sup>1</sup>.

FIGURA 2.2 – Exemplos de processos erosivos de origem pluvial e fluvial



(a) Ravinamento profundo em saprólito de Gnaiss-Migmatito, com exposição de tubulação sulcos e verticalização do talude em solo aluvionar hidráulica e cobertura de solo remanescente, no topo do terreno

FONTE: (a) Mineropar (2014); (b) O autor.

<sup>1</sup> Região apresentada no Capítulo 3

A erosão pluvial é causada por consequências da energia cinética das gotas de chuva e pelo escoamento superficial. Segundo Guerra et al. (2007), os estágios de evolução do processo erosivo pluvial são: infiltração de toda a água precipitada, formação de poças, início do escoamento superficial, escoamento em lençol (*sheetflow*) e desenvolvimento de microrravinas. No início da precipitação, a água encontra facilidade para infiltrar, assim que encontra a superfície do solo. Quando as gotas encontram um talude, ocorre um impacto, conhecido como *splash*. A energia cinética da gota de água (tamanho e altura de queda) é o fator que controla a energia do impacto (COPPIN; RICHARDS, 1990). Como consequência, o solo se desagrega com essa energia, podendo ficar solto e sujeito à movimentação.

No ponto em que a precipitação supera a capacidade de infiltração do solo, parte da água passa a escoar superficialmente, processo conhecido como *runoff*. As partículas desagregadas pelo *splash* podem preencher poros da camada superficial do solo e reduzir a capacidade de infiltração. O fenômeno de preenchimento dos poros superficiais do solo, conhecido como "selagem" aumenta o *runoff* em elevadas precipitações, pois reduz as taxas de infiltração (CHAMECKI, 2002).

O próximo estágio da erosão pluvial, conhecido como erosão linear, é o surgimento de pequenos canais paralelos, posicionados no sentido da seção transversal do talude (microrravinas). Esse fenômeno ocorre com elevados vazões um *runoff* escoando de forma turbulenta, devido à rugosidade da superfície (GUERRA et al., 2007). O solo exposto não apresenta resistência à erosão e o escoamento de água no talude transporta partículas de solo, podendo provocar evoluções para ravinas e/ou vossorocas (DNIT, 2015).

Ao passo que a erosão pluvial tem origem na energia cinética da chuva e no processo de infiltração, a erosão de origem fluvial é causada pela energia do escoamento de água em um rio ou canal (DURLO; SUTILI, 2014). Ainda segundo os autores, as forças de cisalhamento nas margens oriundas do movimento da água escavam o leito se maiores que a resistência à erosão oferecida pelo solo, desagregando partículas e incorporando-as ao fluxo.

Em um curso d'água ocorrem processos de erosão, transporte e sedimentação de materiais (DOS SANTOS; STEVAUX, 2017). A origem pode ser do próprio rio ou dos materiais intemperizados que alcançam o fluxo de água. Materiais de maiores diâmetros (como areias grossas, cascalhos e pedregulhos) possuem sua resistência ao movimento de carreamento pelo fluxo apenas devido ao peso próprio, por não possuírem coesão, diferentemente de siltes e argilas (DURLO; SUTILI, 2014).

Se a tensão aplicada for maior que um valor limite ( $\tau_a > \tau_{limite}$ ), considerado diferente para cada tipo de solo, ocorre movimento das partículas. Alguns valores de tensão de cisalhamento limite para materiais de margens são quantificados. A Tabela

2.2 apresenta a tensão máxima de erosão para materiais coesivos e não coesivos, tabela consultada em Durlo e Sutili (2014), com referência à norma alemã DIN 19 661 (DIN, 1998).

TABELA 2.2 – Tensão de erosão máxima para diferentes substratos com e sem coesão

| Substrato                      | Granulometria     | $\tau$ (limite) |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|
| Areia fina                     | 0,06 a 0,02 mm    | 1,0 Pa          |
| Areia média                    | 0,2 a 0,6 mm      | 2,0 Pa          |
| Areia grossa                   | 0,6 a 1 mm        | 3,0 Pa          |
| Areia muito grossa             | 1,0 a 2,0 mm      | 4,0 Pa          |
| Cascalho médio                 | 6,3 a 20,0 mm     | 15,0 Pa         |
| Cascalho grosso                | 20 a 63,0 mm      | 45,0 Pa         |
| Solo areno-argiloso com coesão | -                 | 2,0 Pa          |
| Deposições argilosas           | >0,002 mm (ABNT*) | 2,5 Pa          |
| Argila rija                    | >0,002 mm (ABNT*) | 12,0 Pa         |

\* Segundo a **NBR5202:2016**, argilas são solos de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.

FONTE: Adaptado de Durlo e Sutili (2014).

Enquanto que a ocorrência de erosão fluvial pode ser analisada através da determinação de tensão de erosão máxima que determinado substrato pode suportar, estimativas de material carregado por erosão pluvial tem um caráter empírico. A equação mais amplamente aplicada nas geociências para estimativa de material carregado por erosão é a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)<sup>2</sup>, conforme cita Rowlands (2019). A seção 2.2.1 apresenta uma discussão sobre o uso da Equação com um enfoque geotécnico.

### 2.2.1 Modelo de previsão de erosão — Equação Universal de Perda de Solo

Existem vários modelos de previsão de erosão, que avaliam o fenômeno tanto na escala geológica da ocorrência, quanto na escala acelerada. Esses modelos diferem muito em termos de complexidade, parâmetros de entrada, espaço e escala temporal, sendo alguns empíricos e simples, enquanto outros são calculados através de complexos métodos computacionais. A abordagem e a escolha do modelo a ser empregado deve levar em consideração a necessidade e a disponibilidade de parâmetros (BOSCO et al., 2015). De forma ilustrativa, a Tabela 2.3 apresenta alguns dos principais modelos de simulação da erosão hídrica do solo da literatura, conforme levantamento de Santos et al. (2010).

<sup>2</sup> Do inglês *Universal Soil Loss Equation* (USLE)

TABELA 2.3 – Principais modelos de previsão de erosão hídrica

| Modelo                                                                    | Autores                        |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| USLE (EUPS) - Universal Soil Loss Model                                   | Wischmeier & Smith, 1958; 1978 |
| WEPP - Water Erosion Prediction Project                                   | Flanagan et al., 1995          |
| Soil and Water assessment Tool                                            | SCS, 1972                      |
| ANSWERS - Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation | Beasley et al., 1980           |
| EUROSEM - Soil Erosion Model for Europe                                   | Morgan et al., 1998            |
| KINEROS - Kinematic Erosion                                               | Goodrich et al., 2000          |
| HMS - Hydrologic Model Syste                                              | Yu, 2000                       |

NOTA: Não foram consultadas as referências originais de todos os modelos de previsão, por diferir dos objetivos do presente trabalho. Os modelos são apresentados para fins de referência.

FONTE: Adaptado de Santos et al. (2010)

A Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), é a formulação de modelagem de erosão mais empregada de todo o mundo (AUERSWALD et al., 2014). A equação foi desenvolvida para estimar perdas de solo a longo prazo, com base em análises experimentais de várias áreas nos Estados Unidos (ROWLANDS, 2019).

A EUPS é um modelo que utiliza a multiplicação de cinco fatores, que expressam a ação de erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, um índice topográfico de inclinação e comprimento do trecho considerado e dois fatores adimensionais, sendo o primeiro relativo à cobertura do solo e o segundo sobre a adoção de práticas conservacionistas. A formulação é apresentada na Equação 2.1.

$$A = R \cdot K_{EUPS} \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2.1)$$

onde:  $A$  = perda média anual de solo (t/ha.ano);  $R$  = fator erosividade da chuva (MJ.mm/h.ha.ano);  $K_{EUPS}$  = fator erodibilidade do solo (T.h/MJ.mm);  $LS$  = Índice topográfico, adimensional;  $C$  = fator cultivo para cobertura e manejo do solo;  $P$  = Fator de práticas conservacionistas, adimensional.

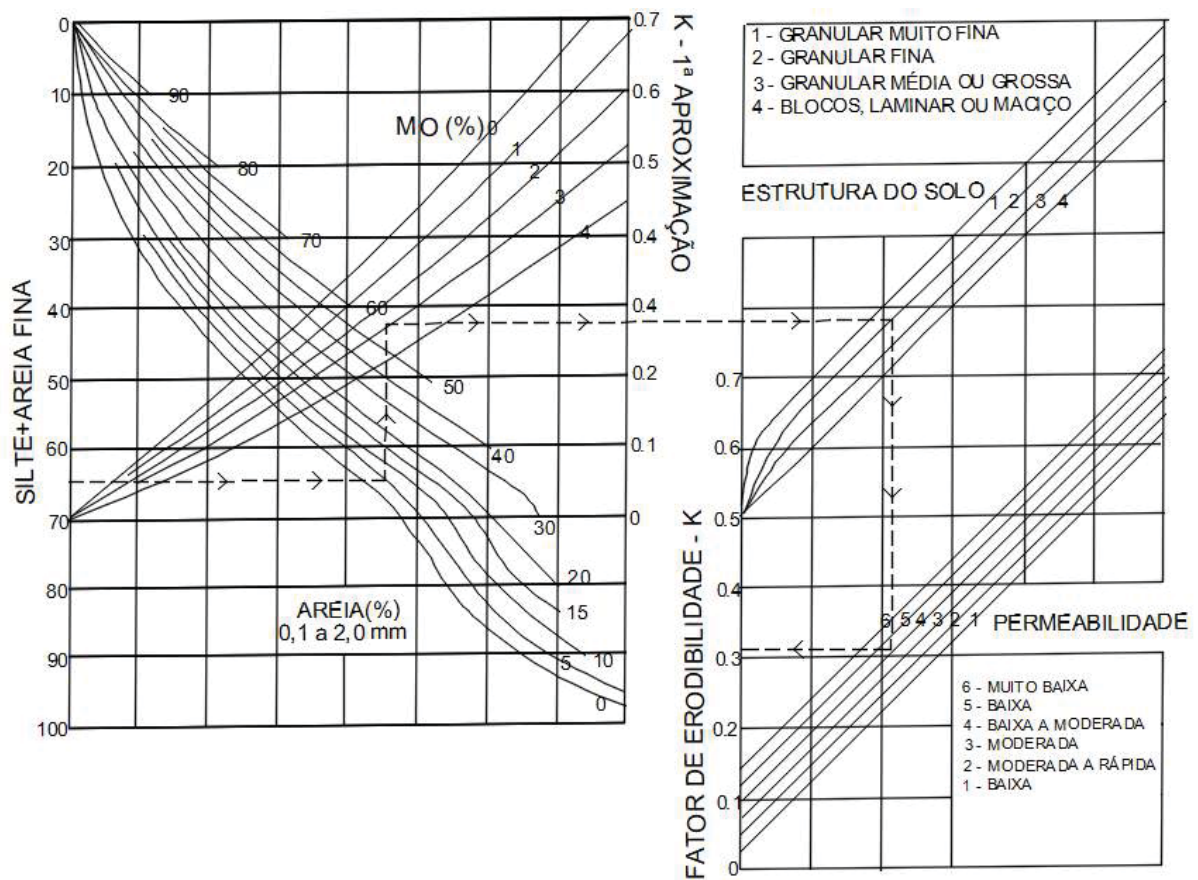
Na equação, o parâmetro  $LS$  leva em consideração as características geométricas do terreno, com formulações para a estimativa do parâmetro (p. ex. Römken et al. (1997) e Bertoni e Lombardi Neto (2005)). Os parâmetros  $C$  e  $P$  são adimensionais, refletem a cobertura vegetal, manejo do solo e a adoção de práticas conservacionistas, sendo os valores tabelados (p. ex. Carvalho (2008)). O coeficiente  $R$  é relativo a energia erosiva da chuva na região considerada, tendo formulações para o seu cálculo, baseadas em séries históricas de precipitação, com mapas, equações e ábacos. O

parâmetro  $K_{EUPS}$  representa a resistência do solo frente à erosão e possui diferentes abordagens e formulações para a sua determinação.

O fator  $K_{EUPS}$  representa a perda de solo para fator chuva unitário, para um talude com declividade igual a 9% e comprimento de 22,1 m, valores arbitrários, que foram adotados para comparação (CASSOL et al., 2018). A determinação desse parâmetro envolve um monitoramento de um talude com essas características por um longo período de tempo (GOMEZ, 2012). Como o processo de monitoramento é longo e custoso, outras abordagens podem ser empregadas para sua determinação.

Uma das primeiras formulações simplificadas para estimativa do fator  $K_{EUPS}$  foi um nomograma, apresentado em Wischmeier et al. (1971). No nomograma, são relacionadas as propriedades do solo com o fator de erodibilidade em duas aproximações (Figura 2.3). Sua utilização requer cinco parâmetros do solo: porcentagem de silte e areia fina (0,02 a 0,1 mm), porcentagem de areia, porcentagem de matéria orgânica, classificação da estrutura e permeabilidade.

FIGURA 2.3 – Nomograma de Wischmeier (1971) para a determinação do fator  $K_{EUPS}$



FONTE: Traduzido de Wischmeier et al. (1971).

Posteriormente, Wischmeier e Smith (1978) apresentaram uma equação empírica para facilitar a estimativa do  $K_{EUPS}$  sem a utilização do nomograma. A Equação 2.2 apresenta a formulação, com os fatores convertidos para o SI, conforme consultado e adaptado dos trabalhos de Auerswald et al. (2014) e Cassol et al. (2018).

$$K_{EUPS} = 2,77 \cdot 10^5 \cdot M^{1,14} \cdot \frac{(12 - MO)}{10} + 0,043(B - 2) + 0,033(C - 3) \quad (2.2)$$

onde  $K_{EUPS}$  = fator de erodibilidade (T.h/MJ.mm);  $M$  = produto da porcentagem de silte + areia muito fina e porcentagem de todas as frações de solo que não sejam argila (%) [ $M = \text{silte}(\%) + \text{areia fina (0,002 a 0,1 mm)}(\%) \cdot (100 - \text{argila}(\%))$ ];  $MO$  = teor de matéria orgânica (%);  $B$  = estrutura do solo (de 1 a 4, segundo classes do nomograma (Figura 2.3));  $C$  = permeabilidade (de 1 a 6, segundo classes do nomograma (Figura 2.3)).

Römkens et al. (1997) apresentaram uma equação ajustada a partir de valores de  $K_{EUPS}$  de 225 solos de várias partes do mundo, onde é possível obter o fator apenas com um fator de média de tamanho de grãos  $D_g$ . A Equação 2.3 apresenta o cálculo do  $K_{EUPS}$  e a Equação 2.4 a formulação para determinação do diâmetro médio  $D_g$ .

$$K_{EUPS} = 7,594 \left\{ 0,0034 + 0,0405 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log(D_g) + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.3)$$

onde: ( $D_g$ ) = Diâmetro médio geométrico distribuição granulométrica (mm).

$$D_g = \exp \left( 0,01 \sum f_i \ln m_i \right) \quad (2.4)$$

onde  $f_i$  = principal faixa da distribuição granulométrica em %;  $m_i$  = média de diâmetro do limite inferior e superior da categoria considerada (mm).

Auerswald et al. (2014) criaram um conjunto de equações para o cálculo de  $K_{EUPS}$  em limites não cobertos pela formulação de Wischmeier e Smith (1978). Solos com porcentagens grandes de silte e areia fina, solos com alto teor de matéria orgânica, solos pedregulhosos e solos com erodibilidade muito baixa não encontram fator correspondente dentro da formulação original. Para a inserção da faixa de solos não contemplada, os autores apresentam uma formulação baseada no cálculo do fator em quatro etapas (2.5).

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 2,77 \cdot 10^5 \cdot M^{1,14} && \text{p/ } N < 70\% \\
 K_1 &= 1,75 \cdot 10^5 \cdot M^{1,14} + 0,0024 \cdot N + 0,016 && \text{p/ } N > 70\% \\
 K_2 &= (12 - MO) / 10 && \text{p/ } MO < 4\% \\
 K_2 &= 0,8 && \text{p/ } MO > 4\% \\
 [H]K_3 &= K_1 \cdot K_2 + 0,043 \cdot (B - 2) + 0,033 \cdot (C - 3) && \text{p/ } K_1 \cdot K_2 > 0,2 \quad (2.5) \\
 K_3 &= 0,091 - 0,34 \cdot K_1 \cdot K_2 + 1,79 \cdot (K_1 \cdot K_2)^2 \\
 &\quad + 0,24 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot B + 0,033 \cdot (C - 3) && \text{p/ } K_1 \cdot K_2 < 0,2 \\
 K_{EUPS} &= K_3 && \text{p/ } R < 1,5\% \\
 K_{EUPS} &= K_3 \cdot (1,1 \cdot \exp(-0,024 \cdot R) - 0,06) && \text{p/ } R > 1,5\%
 \end{aligned}$$

onde:  $K_{EUPS}$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  = fatores de erodibilidade do solo (T.h/MJ.mm);  $M$  = produto da porcentagem de silte + areia muito fina e porcentagem de todas as frações de solo que não sejam argila (%) [ $M = (\text{silte}(\%) + \text{areia fina (0,002 a 0,1 mm)}(\%)) \cdot (100 - \text{argila}(\%))$ ];  $N$  = porcentagem de silte + areia fina;  $MO$  = teor de matéria orgânica (%);  $B$  = estrutura do solo (de 1 a 4, segundo classes do nomograma (Figura 2.3));  $C$  = permeabilidade (de 1 a 6, segundo classes do nomograma (Figura 2.3));  $R$  = porcentagem de pedregulho (>2 cm).

Um comparativo entre o fator  $K_{EUPS}$  e o parâmetro  $K$  determinado através de ensaios diretos de erosão foi realizado por Bastos (1999). O autor encontrou uma relação direta entre os fatores  $K_{EUPS}$  e  $K$  obtido com o ensaio Inderbitzen. Segundo o autor, os solos são potencialmente erodíveis quando  $K_{EUPS}$  determinado no nomograma de Wischmeier et al. (1971) for maior que 0,20.

Na abordagem da EUPS e demais modelagens de erosão, a resistência do solo é um fator interveniente interno, tendo como fatores externos a chuvas, clima e topografia e alterações humanas. A resistência do solo frente à erosão (erodibilidade) é um fator que depende de várias variáveis. A erodibilidade de solos e ensaios para sua determinação são temas da seção 2.3.

### 2.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE

A erodibilidade pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade, em função dos grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes (BASTOS et al., 2000). Segundo Briaud et al. (2019), a erodibilidade não é um parâmetro único, mas depende da relação entre a taxa de erosão do solo e a tensão hidráulica aplicada.

Diversos trabalhos correlacionam a erodibilidade do solo com propriedades básicas de Engenharia Geotécnica, como distribuição granulométrica (BRIAUD, 2008), limites de Atterberg (ARULANANDAN; PERRY, 1983), peso específico (ARULANANDAN; PERRY, 1983; WYNN, 2004; GHEBREIYESSUS et al., 1994), teor de umidade e resistência ao cisalhamento (GHEBREIYESSUS et al., 1994; BRIAUD, 2008; GABRIELI et al., 2012). Para solos granulares, as correlações entre essas propriedades e taxas de erosão são geralmente bem sucedidas, porque a erosão nesses casos é comandada por forças gravitacionais. Porém, em siltes e argilas, outras forças químicas são predominantes e tornam difícil a correlação com outras propriedades (BRIAUD et al., 2019).

Durante um fluxo d'água, uma camada de solo muito superficial é solicitada. Nessa situação, a resistência ao cisalhamento do solo fica expressa pela coesão e peso próprio, visto que praticamente não há confinamento (BASTOS et al., 2000).

A relação entre coesão e resistência à erosão foi estudada por diversos trabalhos. Nascimento e Castro (1976), consultado em Bastos (1999), apresentam um modelo de forças baseado no método de talude infinito, onde uma camada é sujeita a uma tensão cisalhante  $\tau_a$  (Figura 2.4). A tensão é definida pela Equação 2.6.

$$\tau_a = C_e \cdot \gamma_w \cdot \left( \frac{I}{u} \right) \cdot L \cdot \sin \theta \quad (2.6)$$

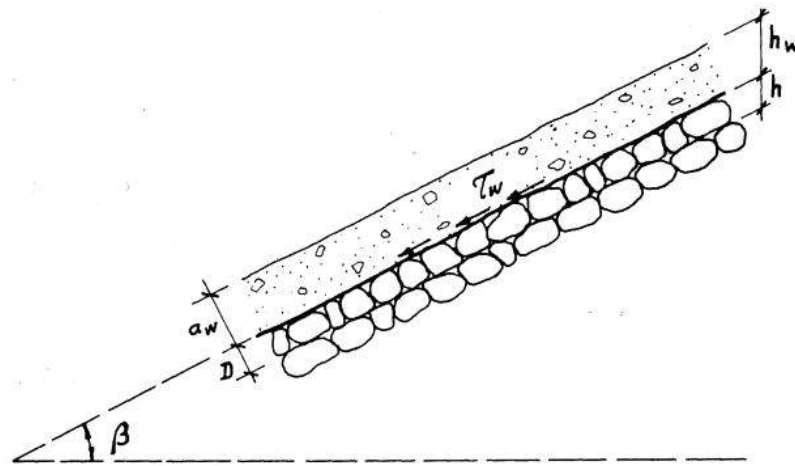
onde:  $C_e$  = coeficiente de escoamento;  $\gamma_w$  = peso específico da água (kN/m³);  $I$  = intensidade da chuva (cm/s);  $u$  = velocidade do escoamento superficial (cm/s);  $L$  = distância da crista do talude (m);  $\theta$  = ângulo de inclinação do talude.

Já a resistência do solo frente à erosão é dada pela resistência ao cisalhamento, calculada através do critério de Mohr-Coulomb (Equação 2.7).

$$\tau = c' + C_e \cdot \gamma_{\text{sub}} \cdot h_l \cdot \cos \beta^2 \cdot \tan \phi \quad (2.7)$$

onde:  $c'$  = intercepto coesivo (kPa);  $C_e$  = coeficiente que representa o tipo de escoamento (laminar ou turbulento) e varia de 0 a 1;  $\gamma_{\text{sub}}$  = peso específico submerso do solo (kN/m<sup>3</sup>);  $h_l$  = altura da camada (m);  $\beta$  = ângulo de inclinação do talude;  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo.

FIGURA 2.4 – Análise de erosão em taludes pelo escoamento superficial uniforme em talude infinito



FONTE: Nascimento e Castro (1976) apud Bastos (1999)

O modelo é simplificado e de fácil implementação, além de permitir considerar a sucção ou efeitos da vegetação através de incrementos no intercepto coesivo. Apesar disso, não considera que o coeficiente  $C_e$  (Equação 2.6) possa ser variável devido ao efeito de preenchimento dos poros e redução da infiltração. Em um posterior trabalho, Nascimento (1981), conforme Bastos (1999), considera que as forças hidráulicas solicitantes podem ser variáveis, atribuindo uma função probabilística.

A igualdade das Equações 2.6 e 2.7 representa o início do processo de desprendimento de partículas do solo. Após esse início, o solo ainda apresenta resistência à erosão. Abordagens mais recentes buscam relacionar a taxa de erosão ( $\varepsilon$ ) com a tensão de cisalhamento hidráulica crítica ( $\tau_c$ ) e a tensão de cisalhamento aplicada ( $\tau_a$ ). Conforme apresentado por Wynn (2004), a taxa de erosão fluvial em margens pode ser estimada com essa abordagem, conforme a Equação 2.8. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\tau_c$  são estimados através de ensaios de erodibilidade do solo.

$$\varepsilon = \alpha (\tau_a - \tau_c)^\beta \quad (2.8)$$

onde:  $\varepsilon$  = taxa de erosão;  $\alpha$  = parâmetro de ajuste;  $\tau_a$  = tensão de cisalhamento aplicada;  $\tau_c$  = tensão de cisalhamento crítica;  $\beta$  = coeficiente exponencial de ajuste.

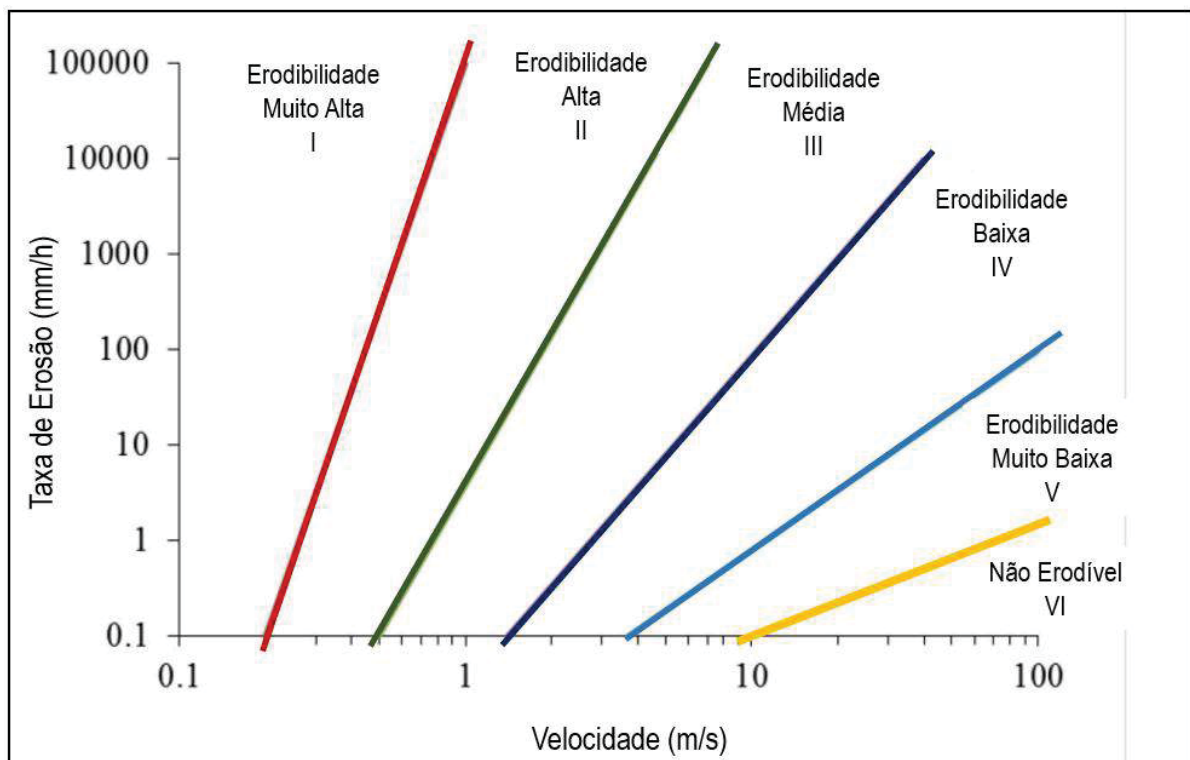
Uma abordagem semelhante àquela apresentada pela Equação 2.8, que relaciona a taxa de erosão à tensão de cisalhamento hidráulica aplicada, é apresentada por Shafii et al. (2016). Os autores utilizaram uma série de ensaios, inserindo dois coeficientes de ajuste que levam em consideração o tipo de solo. A formulação também insere a velocidade crítica associada à tensão de cisalhamento crítica. Segundo Briaud et al. (2019), a Equação 2.9 é definida como a lei constitutiva de problemas de erosão.

$$\frac{\varepsilon}{v_c} = \alpha \left( \frac{\tau_a - \tau_c}{\tau_c} \right)^\beta \quad (2.9)$$

onde:  $\varepsilon$  = taxa de erosão;  $v_c$  = velocidade crítica;  $\tau_a$  = tensão de cisalhamento aplicada;  $\tau_c$  = tensão de cisalhamento crítica;  $\alpha$  e  $\beta$  = parâmetros de ajuste.

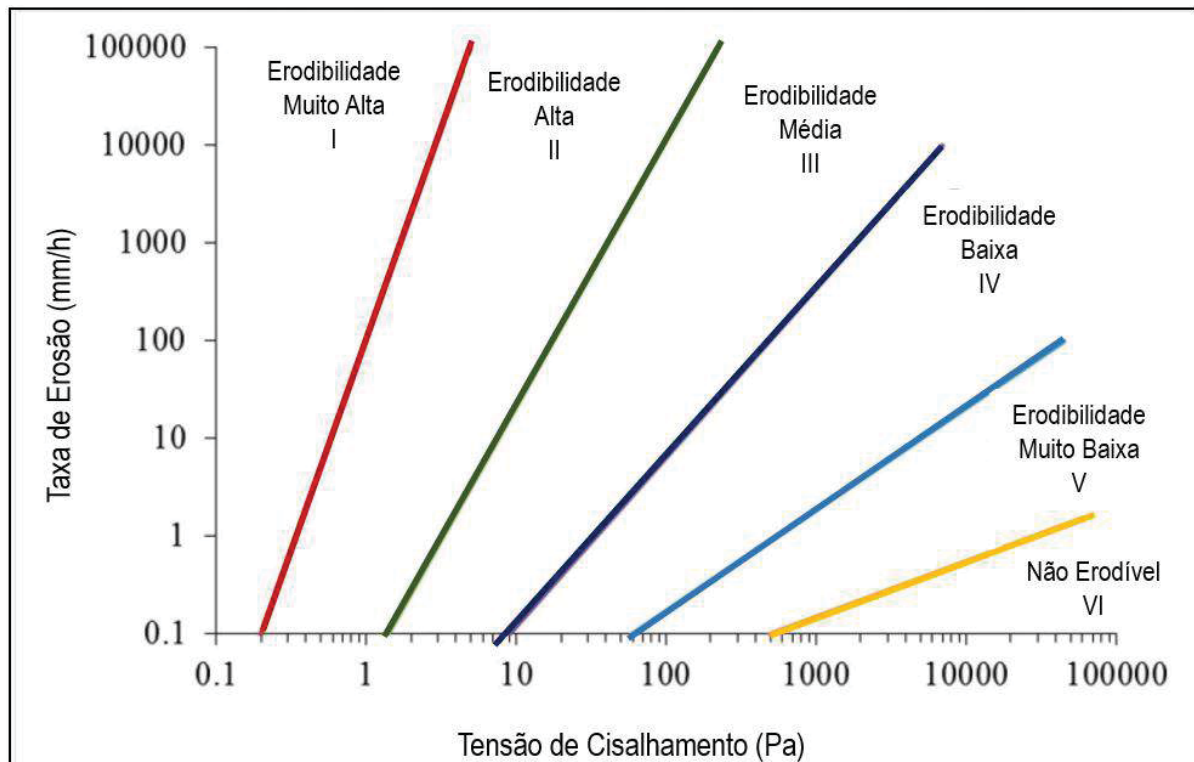
Briaud (2008) apresentou um ábaco de categorias para erodibilidade do solo, que relacionam a taxa de erosão (mm/h) com a velocidade do fluxo (m/s) (Figura 2.5) e a tensão hidráulica aplicada (Pa) (Figura 2.6). As linhas que definem os contornos das categorias foram originadas de ensaios em vários tipos de solos e rochas.

FIGURA 2.5 – Ábaco de Briaud, com categorias de erosão baseados na relação entre a velocidade do fluxo e a taxa de erosão



FONTE: Adaptado de Briaud (2008)

FIGURA 2.6 – Ábaco de Briaud, com categorias de erosão baseados na relação entre a tensão de cisalhamento hidráulica e a taxa de erosão



FONTE: Adaptado de Briaud (2008)

A determinação da erodibilidade do solo é realizada através da execução de ensaios laboratoriais, que determinam de maneira qualitativa ou quantitativa o potencial erosivo do solo. Existem diversos ensaios que visam simular a erosão em laboratório, cada um deles para um tipo ou fim específico. Alguns ensaios possuem resultados apenas qualitativos, de rápida execução, para ensaios preliminares (CHAMECKI, 2002), outros ensaios quantificam as variáveis, com uma série de ensaios complexos propostos nos últimos anos (BRIAUD et al., 2019). Na Tabela 2.4 apresenta-se os principais ensaios de erosão em laboratório, tabela elaborada com base nos trabalhos de Bastos et al. (2000), Chamecki (2002) e Briaud et al. (2019).

Dentre os ensaios da Tabela 2.4, alguns possuem um elevado custo de montagem dos equipamentos, tais como os ensaios EFA, HET e JET, com valores estimados de aquisição superiores a 15.000 dólares (BRIAUD et al., 2019). No sentido de realizar ensaios quantitativos de baixo custo, um ensaio que merece destaque é o Inderbitzen, teste com vários relatos em pesquisas brasileiras, apresentado com destaque na seção 2.3.1.

TABELA 2.4 – Principais ensaios de erosão em laboratório

| Ensaio                                           | Tipo                         | Característica Principal                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ensaio de dispersão ( <i>crumb test</i> )        | Qualitativo                  | Dispersão Rápida - Avaliação de torrões de solo imersos em água destilada ou solução de hidróxido de sódio                                                                    |
| Ensaio sedimentométrico comparativo              | Qualitativo                  | Avaliação da dispersão de solos argilosos por ensaio de sedimentação sem agitação mecânica e defloculante                                                                     |
| Ensaio do furo de agulha ( <i>Pinhole Test</i> ) | Qualitativo                  | Fluxo de água através de um pequeno furo axial ao corpo de prova cilíndrico - Medição da vazão, tamanho do furo e verificação da coloração da água;                           |
| Desagregação ( <i>Slaking Test</i> )             | Qualitativo                  | Ruína de uma amostra cúbica de solo não confinada e imersa em água                                                                                                            |
| Erodibilidade por metodologia MCT                | Qualitativo                  | Ensaio de ascensão capilar e ensaio de erodibilidade específicas, com resultados classificados através de ábacos;                                                             |
| Ensaio Inderbitzen                               | Quantitativo/<br>Qualitativo | Determinação do material coletado em uma amostra posicionada em uma rampa inclinada e submetida a um escoamento superficial                                                   |
| <i>Hole Erosion Test</i> (HET)                   | Quantitativo                 | Ensaio baseado no teste do furo de agulha, com instrumentação da carga hidráulica e medidas analíticas da dimensão do furo. Simula uma erosão tipo <i>piping</i> ;            |
| <i>Jet Erosion Test</i> (JET)                    | Quantitativo                 | Jato hidráulico com carga constante aplicada a amostra e medição do material desagregado. Pode ser feito <i>in situ</i> ou em laboratório;                                    |
| <i>Erosion Function Apparatus</i> (EFA)          | Quantitativo                 | Ensaio feitos com amostras obtidas com tubos <i>Shelby</i> , submetidas a um fluxo horizontal e transversal a amostra, com elevação vertical da amostra através de um pistão. |

Outros dois ensaios de erosão que merecem destaque dentro do contexto brasileiro são a determinação da erodibilidade através da metodologia MCT e o ensaio de dispersibilidade *crumb test*. Os ensaios de capilaridade e erodibilidade específica, utilizados na classificação de erosão MCT, foram propostos por Nogami e Villibor (1979) e detalhadamente expostos em Nogami e Villibor (1995), sendo apresentados na seção 2.3.2. Na seção 2.3.3 são apresentados os conceitos do ensaio de dispersibilidade *crumb test*.

### 2.3.1 Ensaio de erosão Inderbitzen

O ensaio Inderbitzen, também conhecido como erosômetro, foi idealizado para determinar a erosão de um talude de aterro, para uma inclinação e condição de chuva constante (INDERBITZEN, 1961). Posteriormente, em outros trabalhos o aparelho foi modificado para a realização de ensaios com diferentes inclinações e dimensões da rampa. Apesar de seu objetivo inicial específico, o ensaio se difundiu, sendo empregado em uma diversidade de situações, com várias alterações já propostas.

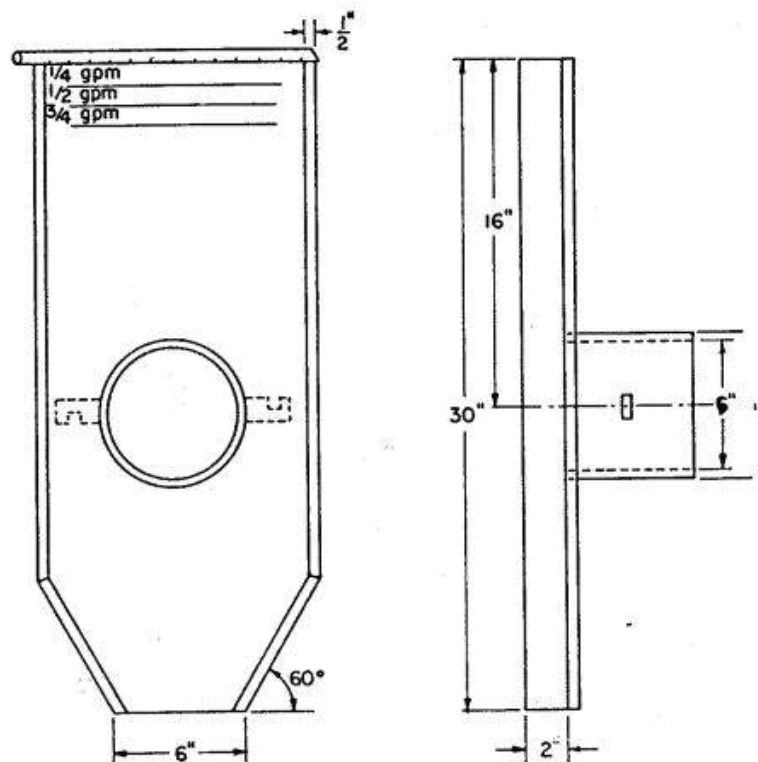
Na sua execução, é possível considerar vários fatores, obtendo-se uma medida direta e comparativa do volume erodido em cada caso. Dentre as possíveis opções a serem consideradas, destaca-se:

- Grau de compactação do solo;
- Inclinação;
- Vazão;
- Duração do escoamento;
- Ação das gotas de chuva (Inderbitzen Modificado).

No ensaio, uma amostra cilíndrica é posicionada em uma rampa inclinada. Recipientes e peneiras são dispostos na extremidade inferior para coleta do material erodido. Um fluxo de água partindo da parte superior da rampa é imposto ao corpo de prova, por um tempo pré-estabelecido, que gera erosão da amostra. Os resultados do ensaios se dão em perda de solo por tempo decorrido.

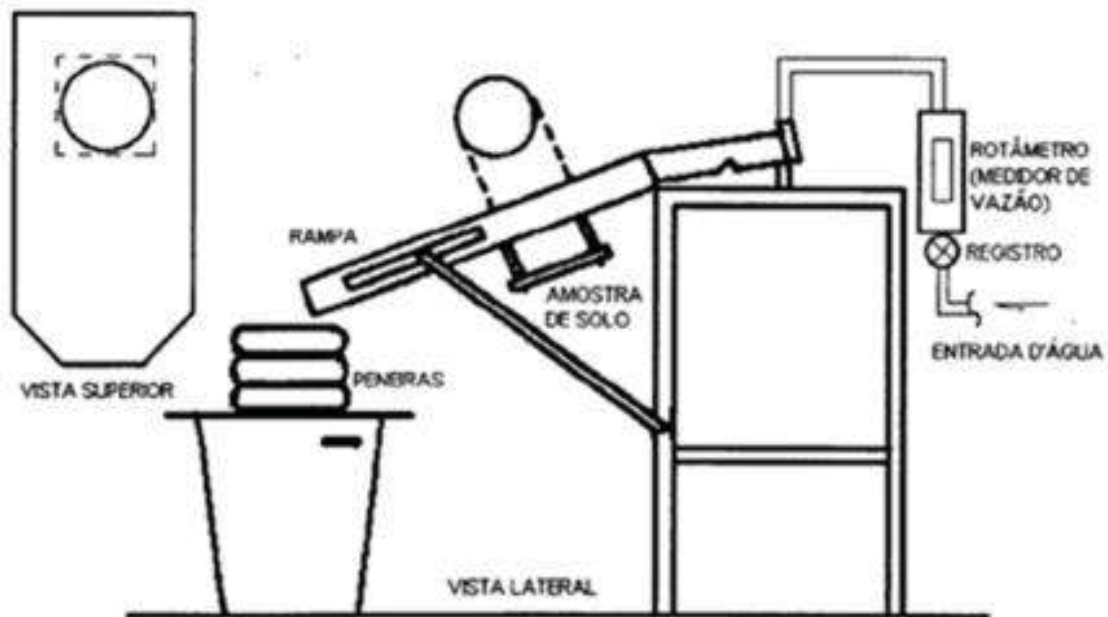
A Figura 2.7 apresenta um esquema do modelo original proposto por Inderbitzen (1961). O modelo utilizado no trabalho de Bastos (1999), um dos mais relevantes sobre aplicação do Inderbitzen no Brasil, é apresentado na Figura 2.8.

FIGURA 2.7 – Dimensões do equipamento original proposto por Inderbitzen (1961)



FONTE: Inderbitzen (1961)

FIGURA 2.8 – Equipamento utilizado no trabalho de Bastos (1999)



FONTE: Silva e Melo (2016)

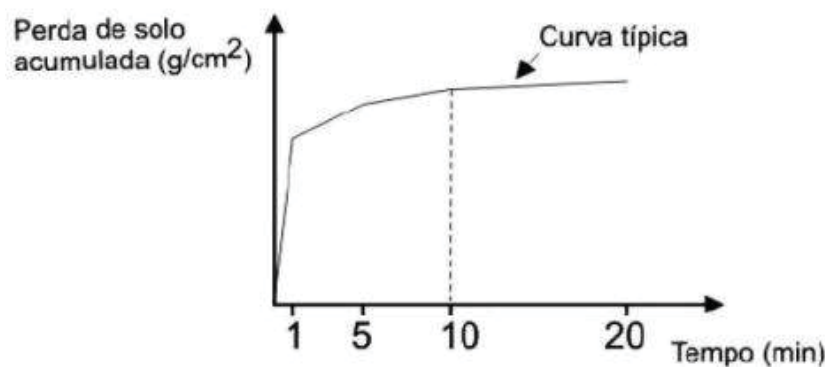
A vazão que escoar causa erosão na amostra, quantificada através da coleta de partículas na base com um sistema de peneiras. Segundo Fácio (1991), o material erodido no ensaio Inderbitzen é significativamente maior nos primeiros 5 minutos de ensaios, produzindo a parte com maior inclinação da curva volume erodido por tempo. O autor ainda cita outras conclusões obtidas na realização de seus ensaios: a perda de solo aumenta quando o grau de saturação inicial diminui e o aumento da vazão e da declividade da rampa aumentam a quantidade de material carregado.

Dentre os trabalhos brasileiros que já utilizaram o aparelho Inderbitzen, distintas finalidades foram empregadas e tipos de solos avaliados. Destaca-se os trabalhos de Fácio (1991), que avaliou solos granulares de Brasília/DF, determinando diretrizes para padronização do equipamento; Bastos (1999), que estudou solos residuais não saturados da região de Porto Alegre/RS; Camapum de Carvalho et al. (2006), que apresentaram resultados de uma série de trabalhos que avaliam a erodibilidade de solos no Centro-Oeste; Chamecki (2002), que analisou a erodibilidade de solos da formação Guabirotuba, em Curitiba/PR; Lemos et al. (2007), que avaliaram solos aluvionares próximos a um curso d'água na região metropolitana de Curitiba/PR; Campos (2014), que avaliou um solo não saturado na região de Bauru/SP através do equipamento e Venturini (2019), que estudou a influência de fibras de raízes de uma gramínea no volume erodido durante o ensaio para um solo arenoso de São João do Polêsine/RS.

### 2.3.1.1 Parâmetros do ensaio e modificações no equipamento

Durante a execução do ensaio Inderbitzen, cada troca de peneira corresponde a um ponto do gráfico, resultando, ao fim do ensaio, em uma curva de perda de solo por área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) por tempo decorrido (minutos). A Figura 2.9 apresenta uma curva típica do ensaio Inderbitzen, onde pode-se perceber uma estabilização após um certo tempo, posterior a um rápido pico inicial.

FIGURA 2.9 – Curva típica resultado de um ensaio Inderbitzen, com relação entre perda de solo acumulada e tempo



FONTE: Bastos (1999)

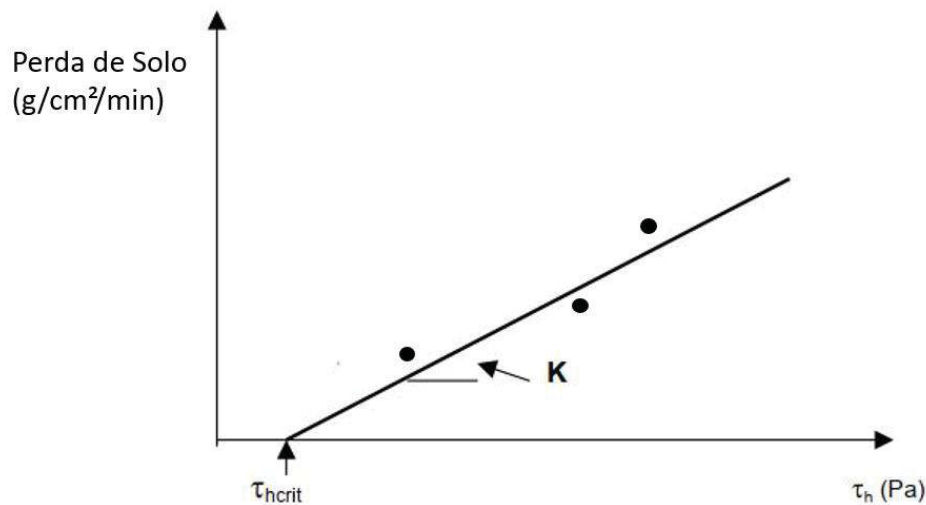
A tensão cisalhante aplicada na amostra pode ser calculada em cada ensaio pela Equação 2.10, oriunda da hidráulica de canais (BASTOS, 1999).

$$\tau_a = \gamma_w \cdot h \cdot d \quad (2.10)$$

onde:  $\tau_a$  = tensão cisalhante aplicada (Pa);  $\gamma_w$  = peso específico do fluído ( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $h$  = altura da lâmina de fluxo (m) e  $d$  = declividade do escoamento.

Para utilização da Equação 2.10, é necessária a estimativa da altura da lâmina d'água na rampa. Pode-se realizar a medida diretamente através de réguas ou com a velocidade do fluxo, determinando também a vazão de entrada. Esse procedimento é utilizado nos trabalhos de Bastos (1999) e Venturini (2019).

Em posse da massa de solo erodida acumulada durante o ensaio e tensão cisalhante aplicada, pode-se plotar os resultados em um gráfico, relacionando a tensão cisalhante aplicada à perda de solo acumulada. Através da realização de 3 ou mais ensaios, ajusta-se uma reta aos pontos, como apresentado na Figura 2.10.

FIGURA 2.10 – Definição do Fator  $K$  e tensão hidráulica crítica nos ensaios Inderbitzen

FONTE: Adaptado de Bastos (1999).

Essa reta constitui a Equação de Duboys (Equação 2.11), desenvolvida para erosão em sulcos, com um gradiente da perda de solo por tensão aplicada (BASTOS, 1999). A Equação tem forma semelhante a apresentada por Wynn (2004) (Equação 2.8), com coeficiente  $\beta$  igual a unidade.

$$\varepsilon = K (\tau_a - \tau_c) \quad (2.11)$$

onde:  $\varepsilon$  = taxa de erosão (g/cm²/min);  $K$  = parâmetro de erodibilidade (g/cm²/min/Pa);  $\tau_a$  = tensão de cisalhamento aplicada (Pa) e  $\tau_c$  = tensão de cisalhamento crítica aplicada (Pa).

No gráfico da Figura 2.10 e na Equação 2.11, aparece o conceito de tensão de cisalhamento crítica ( $\tau_c$ ), tensão onde inicia-se o processo de erosão e relatada por diversos autores na definição de equações constitutivas de problemas de erosão (p. ex. Wynn (2004), Briaud (2008) Shafii et al. (2016)).

Quanto aos parâmetros do ensaio, a inclinação da rampa, a vazão e a duração do escoamento definem características básicas de cada experimento. Segundo o levantamento de Chamecki (2002), os valores de vazão empregados, com unidade convertida, variam entre 1,8 l/min a 18,4 l/min, com predominância de valores abaixo de 6 l/min. Os valores de inclinação compreendem ao intervalo de 10° a 59° e os tempos de 20 min, 30 min e 120 min.

No trabalho de Fácio (1991), foram propostas algumas alterações no equipamento original, sendo esse trabalho um dos precursores do uso do Inderbitzen no Brasil. O autor propõe a utilização de três calhas para ensaios simultâneos, bacias de uniformização do fluxo, roscamento para fixar as amostras e um conjunto de peneiras,

de maneira a se obter a classificação granulométrica do material erodido. O autor adotou uma inclinação de 10°, vazão de 3 l/min e duração de 20 minutos.

Na dissertação de Santos (1997) foram propostas algumas alterações, como o uso de uma rampa de largura semelhante ao diâmetro do furo central (10 cm), vazão de 1,056 l/min, tempo de 30 minutos e coleta de material com peneira de abertura 0,075 mm (#200). Os resultados do autor e de outros trabalhos no centro-oeste brasileiro são apresentados em Camapum de Carvalho et al. (2006).

Bastos (1999) realizou diversas alterações em seus ensaios, como a análise de amostras na umidade natural, secas e úmidas, adoção de um conjunto de peneiras para análise da granulometria e sedimentação do material erodido passante na peneira #200. O autor utilizou inclinações de 10°, 26°, 45° e 54° e vazões de 3 l/min a 6 l/min.

Freire (2001) propôs modificações para verificar o efeito de salpicamento de gotas de chuva na erosão do solo, com a colocação de um sistema de "chuveiramento" para simular as gotas de chuva. Essa modificação constitui o chamado ensaio Inderbitzen Modificado, onde a amostra fica apoiada em uma grelha inclinada, com o chuveiro acima. No ensaio, determina-se um parâmetro de "Grau de Erodibilidade do Solo – GES", que leva em consideração o impacto de gotas de água no solo.

Fragassi e Marques (2001) desenvolveram um equipamento para evitar a concentração do fluxo na rampa, regularização de baixas vazões e utilização de inclinações grandes no aparelho.

Venturini (2019) realizou ensaios em amostras reconstituídas, com a colocação de raízes na forma de fibras aleatórias. A autora utilizou um equipamento com largura de 25 cm, comprimento de 60 cm e peneiras de abertura de 0,42 mm (#40) e 0,075 mm (#200).

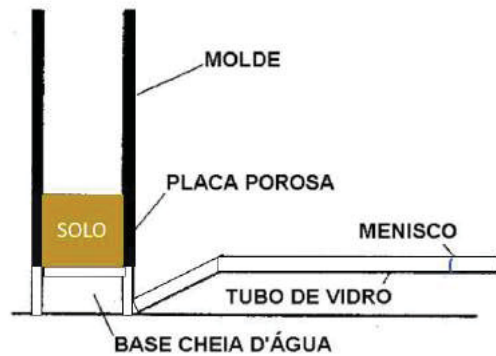
### 2.3.2 Ensaio de erosão por metodologia MCT

O sistema de classificação MCT (miniatura, compacto, tropical) foi proposto por Nogami e Villibor (1979) e desenvolvido para cobrir lacunas dos sistemas de classificação tradicionais e incluir os solos oriundos dos processos de laterização. O sistema surgiu do ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) em dimensões reduzidas, utilizado na pavimentação para se obter a capacidade de suporte de maneira mais prática. A partir do ensaio Mini-CBR, de estudos de propriedades de contração, permeabilidade e infiltrabilidade, criou-se uma sistemática que permite obter informações completas sobre solos tropicais (NOGAMI; VILLIBOR, 1981).

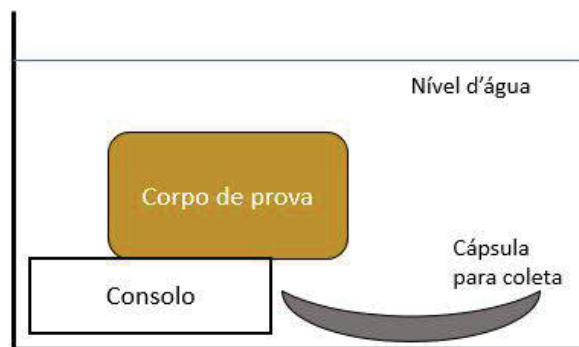
Além da classificação MCT para solos, Nogami e Villibor (1995) apresentaram critérios para avaliação da erodibilidade a partir de amostras compactadas. Os critérios são empíricos e foram determinados a partir de ensaios em solos de vários taludes

de corte em São Paulo. Para a determinação da erodibilidade, são necessários dois ensaios, o de capilaridade (Figura 2.11 (a)) e de erodibilidade específica, também conhecido como perda por imersão modificado (Figura 2.11 (b)).

FIGURA 2.11 – Ensaios de classificação de erodibilidade na metodologia MCT



(a) Ensaio de capilaridade

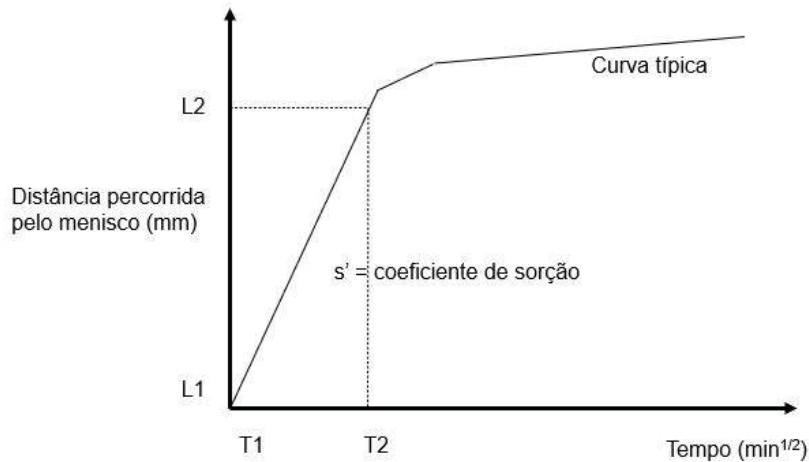


(b) Erodibilidade específica

FONTE: (a) Adaptado de Nogami e Villibor (1995); (b) O autor

Segundo Nogami e Villibor (1995), o ensaio de capilaridade avalia a condutividade hidráulica de solos não saturados, através do volume de água que infiltra por unidade de tempo. É controlado principalmente pelas tensões de sucção. No ensaio, uma amostra cilíndrica confinada lateralmente é submetida a um fluxo ascendente causado por ascensão capilar. Esse fluxo é medido através do menisco do tubo ligado a amostra, tubo associado a uma régua graduada. A curva de resultados representa o deslocamento de água no tubo pela raiz quadrada do tempo (Figura 2.12).

FIGURA 2.12 – Exemplo de curva típica em ensaios de capilaridade



FONTE: Adaptado de Nogami e Villibor (1995)

Através do ensaio é possível obter o coeficiente de sorção ( $s'$ ), definido pelo coeficiente angular do trecho inicial do gráfico de resultados (BASTOS, 1999). A equação que expressa o cálculo do coeficiente de sorção é apresentada na Equação 2.12.

$$s = \frac{(L_2 - L_1) a_m}{10 (t_2 - t_1) AA} \quad (2.12)$$

onde:  $s'$  = coeficiente de sorção ( $\text{ml}/\sqrt{\text{min}}$ );  $L_2$  = leitura no tempo 2 (ml);  $L_1$  = leitura no tempo 1 (ml);  $T_2$  = tempo na leitura 2 ( $\sqrt{\text{min}}$ );  $T_1$  = tempo na leitura 1 ( $\sqrt{\text{min}}$ );  $a_m$  = área do menisco ( $\text{cm}^2$ );  $AA$  = área da base do corpo de prova ( $\text{cm}^2$ ).

No ensaio de erodibilidade específica, avalia-se de forma quantitativa a desagregação de uma amostra submersa em água. Uma amostra confinada lateralmente, livre em uma extremidade e com uma pedra porosa e papel filtro na outra, é posicionada em um apoio de forma que fique horizontal. Um recipiente para coletar o material desagregado do corpo de prova é colocado na extremidade livre. Todo o conjunto é submerso em água. Após um período de 24 horas, o material coletado no recipiente é retirado para ser seco em estufa e posteriormente determinado sua massa. O parâmetro  $pi$  é obtido no ensaio, determinado através da relação 2.13.

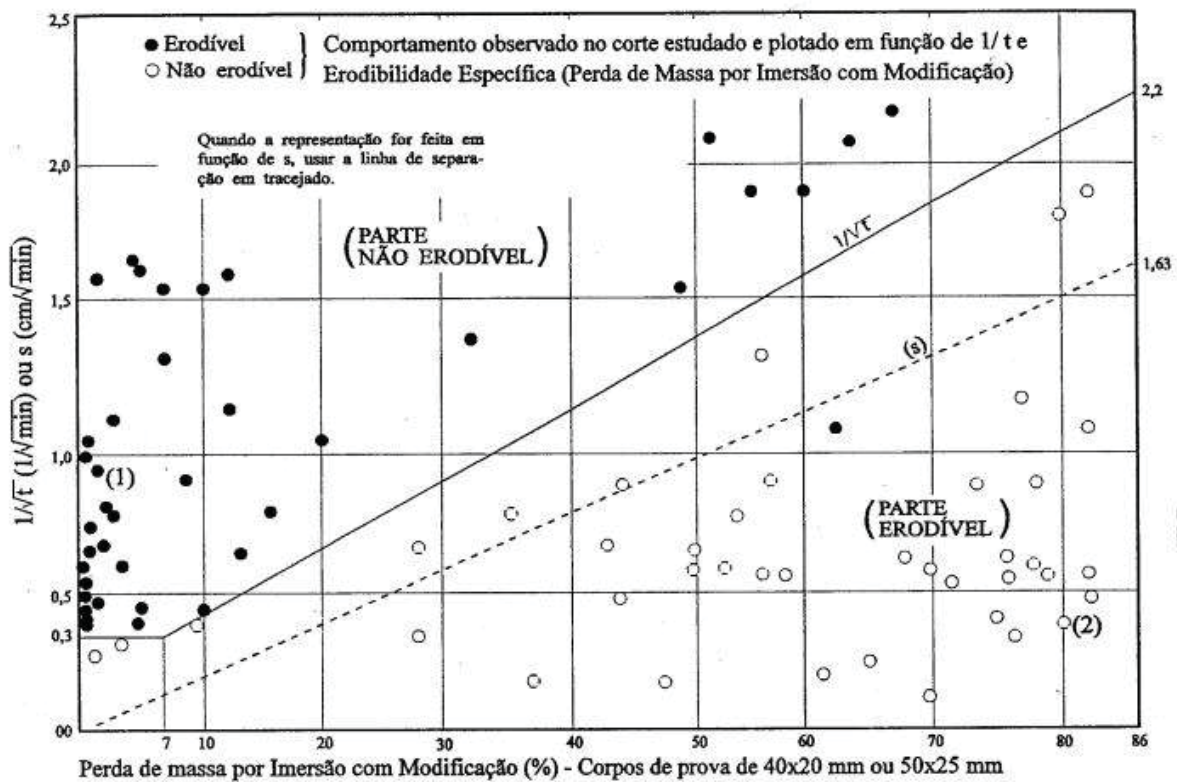
$$pi = \frac{P_d}{P_t} \cdot 100 \quad (2.13)$$

onde:  $pi$  = Perda de massa por imersão (%);  $P_d$  = Peso de solo seco desagregado (g);  $P_t$  = Peso de solo total da amostra (g).

Os resultados da classificação utilizam um ábaco, baseado na desigualdade  $pi/s' < 52$ , que divide os limites de erodível e não erodível. Solos com relação acima

desse valor tendem a apresentar alta erodibilidade. Pejon (1992) propõe um critério  $pi/s' < 40$ . No trabalho de Nogami e Villibor (1995) é apresentado o critério na forma de ábaco com exemplos de diversos ensaios (Figura 2.13).

FIGURA 2.13 – Critério de erodibilidade pela metodologia MCT



FONTE: Nogami e Villibor (1995)

### 2.3.3 Ensaio de dispersão *crumb test* e ensaio de teor de matéria orgânica

O ensaio de dispersão *crumb test* é normatizado pela NBR 13601 (ABNT, 2020), recentemente revista, e tem como princípio um processo conhecido como dispersão ou defloculação. O ensaio foi proposto por Sheraed et al. (1976) para solos argilosos. Consiste na colocação de um torrão de solo indeformado ou reconstituído em um béquer com água destilada e a avaliação visual da dispersão do torrão por 1 hora. Os resultados se dão em 4 classes de dispersibilidade, com características descritas na NBR 13601 (ABNT, 2020). Realiza-se o ensaio em três amostras idênticas.

Devido à avaliação visual e subjetiva dos resultados, o ensaio é empregado apenas em avaliações preliminares. Porém, a sua rapidez e facilidade de execução torna a sua realização em análises prévias conveniente. O *crumb test* permite comparações entre diversos casos, no sentido da condição inicial do solo ou tipo de líquido utilizado (CHAMECKI, 2002). Pode-se comparar amostras indeformadas, reconstituídas, com ou sem raízes e em diferentes teores de umidade de maneira facilitada e simultânea. Além

disso, o ensaio permite a visualização da dispersão do torrão em diferentes líquidos, como água, solução defloculante, poluente ou efluentes do local em estudo.

Já o ensaio de teor de matéria orgânica indica o teor de material de origem vegetal ou animal presente no solo, em diferentes estágios de decomposição. No Brasil, o ensaio é normatizado pela NBR 1360 (ABNT, 1996) e consiste na queima de uma porção de solo previamente seco em estufa a 440 °C. São realizados dois ensaios com cada amostra, para se obter uma média. O teor de matéria orgânica é um dado de entrada do nomograma de Wischmeier (Figura 2.3) para estimativa de fator de erodibilidade do solo.

## 2.4 FUNÇÃO DA VEGETAÇÃO NO CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS

Além das características e propriedades do solo, a vegetação pode ter grande influência na erodibilidade. A função da vegetação na redução da erodibilidade e estudos relacionados a quantificação experimental dos efeitos das plantas nas taxas de erosão é tema desta seção.

### 2.4.1 Relação entre taxa de erosão e cobertura vegetal

A vegetação funciona como um anteparo contra o *splash* causado pelas gotas de água da chuva, interceptando-as e reduzindo a erosão pluvial. Quando as gotas caem no solo, possuem menor energia e menos capacidade de desagregar partículas (GOLDSMITH et al., 2001). Além disso, o sistema de raízes pode atuar efetivamente na erosão causada por fluxo superficial, "amarrando" o solo e aumentando a sua resistência.

A vegetação pode reduzir também os processos erosivos de origem fluvial nas margens dos cursos d'água, pois a presença de plantas aumenta a rugosidade do canal, direciona o fluxo para o centro do leito, reduz a velocidade do fluxo e a tensão de cisalhamento ao longo da margem (WYNN, 2004).

Sobre os efeitos hidromecânicos da vegetação no solo, a vegetação reduz a quantidade de material erodido através da interceptação de gotas de chuva, permitindo infiltração e promovendo uma rugosidade maior na superfície, que reduz a energia do escoamento superficial (MORGAN, 2009). O aumento de coesão do solo e a amarração proporcionada pelas raízes também reduzem a erosão.

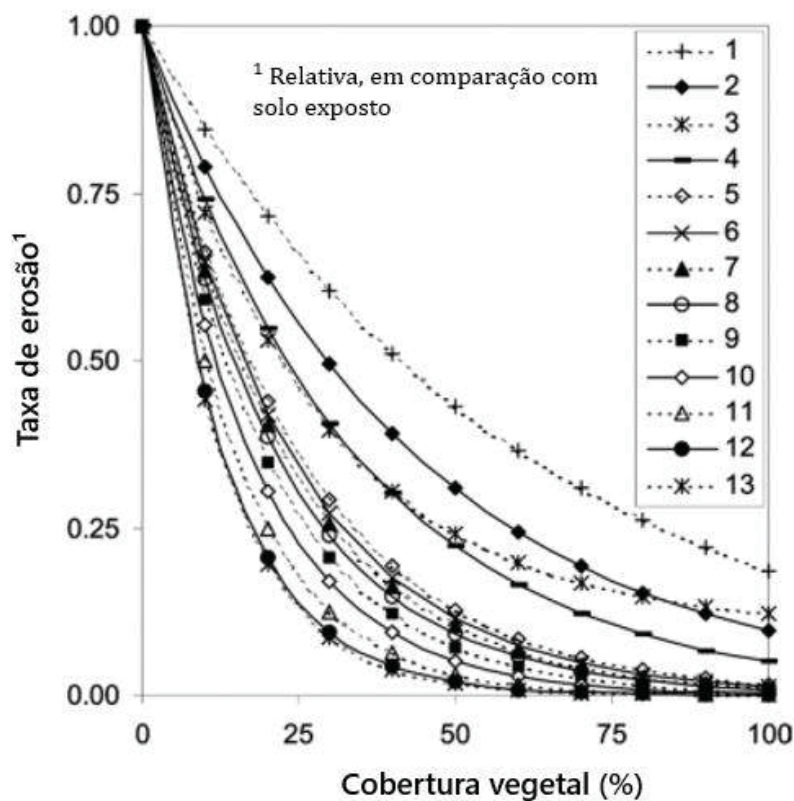
Conforme o trabalho de Gyssels et al. (2005), a taxa de erosão hídrica e a cobertura vegetal possuem uma relação inversa e exponencial, da forma apresentada na Equação 2.14.

$$\varepsilon = e^{-\beta \dot{C}_v} \quad (2.14)$$

onde:  $\varepsilon$  = taxa de material erodido;  $C_v$  = cobertura vegetal;  $\beta$  = parâmetro exponencial de ajuste.

Vários estudos selecionados pelos autores corroboram esse mesmo comportamento, como pode ser observado na Figura 2.14. As curvas refletem a combinação dos efeitos da parte aérea das plantas e as raízes.

FIGURA 2.14 – Compilação de diversos trabalhos que relacionam a taxa de erosão do solo com a cobertura vegetal



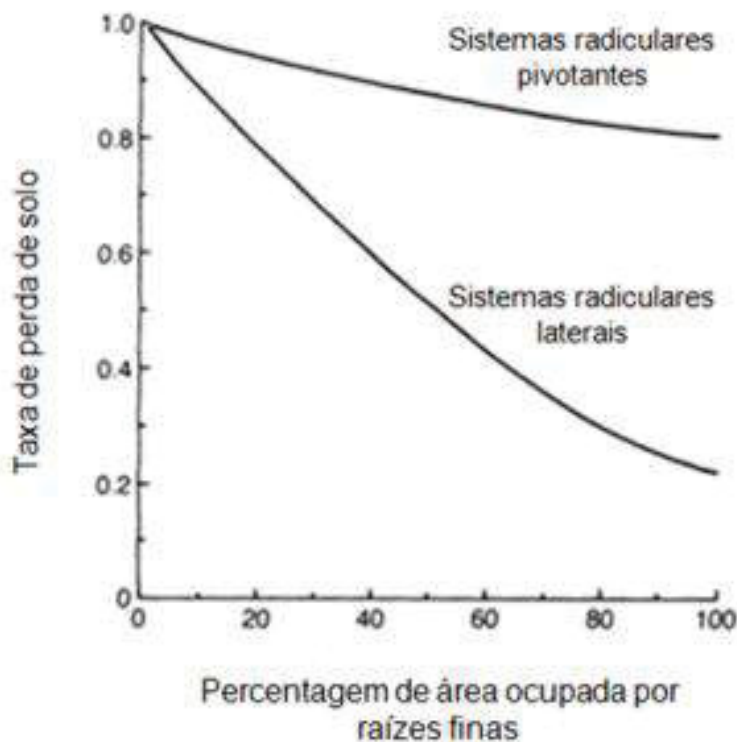
NOTA: Taxa de erosão relativa (erosão com cobertura vegetal/erosão do solo exposto), valor 1,00 representa o solo todo exposto.

FONTE: Adaptado de Gyssels et al. (2005).

Na grande maioria dos casos, a presença de vegetação diminui as taxas de erosão do solo. Porém, considerando algumas situações, o volume de solo erodido pode ser maior devido à presença vegetação, em comparativo com solo exposto. Um exemplo são as árvores altas que interceptam as gotas de chuva, que se concentram e aumentam de tamanho durante a retenção na parte folhosa e chegam ao solo (sem cobertura vegetal rasteira) com maior tamanho, portanto com maior energia cinética. Outro caso são as falhas na cobertura vegetal em determinado trecho, que concentram o *runoff*, criando uma espécie de canal onde o fluxo ocorre com maior velocidade e maior poder erosivo (MORGAN, 2007).

O uso de gramíneas, pelo pequeno porte e possibilidades de cobrimento mais uniforme, se mostra adequado para redução da erosão. Plantas com sistemas de raízes laterais bem desenvolvidas e com maior área ocupada por raízes finas, são mais efetivas na redução da erosão superficial e na perda de solo, em um comparativo com plantas com sistemas de raiz estruturados verticalmente com raízes pivotantes (SOUSA, 2015). Na Figura 2.15 é exibido um comparativo entre a ação de raízes pivotante e laterais nas taxas de erosão. As espécies vegetais de cobertura uniforme podem proteger o solo de impactos causados por humanos, animais e veículos, absorvendo os impactos mecânicos e evitando a desagregação (COPPIN; RICHARDS, 1990).

FIGURA 2.15 – Comparativo entre efeitos de raízes pivotante e laterais na proteção do solo contra erosão



FONTE: Sousa (2015), originalmente apresentado por Coppin e Richards (1990).

Wynn (2004) estudou os efeitos de espécies lenhosas e herbáceas na erosão de margens no estado da Virgínia, EUA através de ensaios tipo *Jet Erosion Tests*. Os dados investigados foram as características físicas e químicas dos solos, a erodibilidade e a tensão de cisalhamento hidráulica crítica ( $\tau_c$ ). Através de regressões lineares, a autora concluiu que o parâmetro que mais afeta os resultados de erosão é o peso específico do solo, tendo também influência sobre os resultados o teor de umidade, quantidade de argila, atividade, densidade de raízes e diâmetro de raízes.

Em experimentos de laboratório para a determinação da contribuição de raízes de gramíneas na redução da erodibilidade do solo, Venturini (2019) realizou ensaios diretos e indiretos de erosão com um solo arenoso, com a presença de raízes extraídas de uma gramínea (*Zoysia japonica*) e misturadas aleatoriamente ao solo. Os resultados nos ensaios Inderbitzen indicaram que a taxa de erodibilidade se reduziu em até 90% quando comparada ao solo sem raízes, com o valor de 600 raízes por corpo de prova.

No trabalho de Ghebreiyessus et al. (1994), foi estudada a relação entre peso específico, resistência ao cisalhamento da superfície, tempo de escoamento, tensão de cisalhamento hidráulica e a taxa de erosão, definindo equações empíricas para solos siltosos da cidade do México. Os autores utilizaram um canal hidráulico horizontal de 3,2 m de comprimento, lâmina de água de 2,5 cm, amostra circular de 10,2 cm de diâmetro, concluindo que a erodibilidade dependia principalmente do peso específico das amostras e tensão de cisalhamento hidráulica aplicada.

De Baets et al. (2008) utilizaram um canal hidráulico com 2 m de comprimento para determinar a erosão de amostras de solo sem presença de vegetação, com vegetação na forma de gramíneas e na forma de raízes pivotantes. Os autores utilizaram solos arenosos e siltosos oriundos de um cultivo das espécies em condições controladas. Os resultados indicaram que a redução das taxas de erosão foi maior em solos siltosos do que em solos arenosos; que a taxa de erosão depende da densidade de raízes; que as espécies pivotantes apresentaram desempenho inferior no controle da erosão (comparadas as gramíneas) e que os efeitos de redução da taxa de erosão dependem da distribuição das raízes.

Os resultados de experimentos de erosão com a presença de vegetação realçam a importância da cobertura vegetal na proteção contra erosão. A escolha de espécies adequadas, com condições de desenvolvimento, podem mitigar os processos erosivos. Contudo, a aplicação de plantas para estabilização de taludes e controle de erosão deve ser planejada. Substratos pobres, inclinações inadequadas ou falta de nutrientes podem impedir o crescimento de raízes (BARBOSA, 2012). Além desses fatores, as plantas não se desenvolvem em solos muito compactados, que podem inibir o desenvolvimento correto de espécies vegetais (GOLDSMITH et al., 2001). Por outro lado, solos com índice de vazios altos apresentam alta erodibilidade.

A seção 2.5 apresenta uma discussão sobre técnicas de Engenharia Natural, abordando como a vegetação pode ser projetada para evitar a ocorrência de movimentos de massa e reduzir processos erosivos. Também são temas da próxima seção o estágio atual das técnicas e formas analíticas de dimensionamento.

## 2.5 TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL

A utilização de materiais vegetais para fins de Engenharia, conhecida como Bioengenharia ou Engenharia Natural, é uma técnica antiga. O uso de vegetação, na forma de grama, arbustos e árvores, possui relatos de utilização desde os séculos XIII e XIV para controle de erosão e estabilização de escorregamentos rasos (CAZZUFFI et al., 2014). O desenvolvimento da técnica teve lacunas durante a história, períodos com maior ou menor utilização, além de alguns países utilizarem de maneira mais pronunciada que outros (EVETTE et al., 2009; BISCHETTI et al., 2014). Apesar disso, consolidou-se como disciplina técnica nas décadas recentes, agregando conhecimentos de diversas áreas, com teorias e estudos para a quantificação e simulação dos efeitos da vegetação (SIMON; COLLISON, 2002; FERNANDES; GUIOMAR, 2016).

As técnicas de Engenharia Natural têm sido utilizadas em praticamente todo o mundo, aplicadas em diferentes contextos e buscando-se distintas finalidades: estabilização de taludes; proteção de margens e terrenos úmidos; recuperação de áreas pós incêndios; contenções e proteção contra processos erosivos (FERNANDES; GUIOMAR, 2016).

Das diversas vantagens que a técnica possui, podem se destacar: amistosidade com o meio ambiente; custo competitivo; consumo energético muito baixo; deformabilidade e capacidade de regeneração; simplicidade de execução; e aspecto estético agradável (MAFFRA, 2014; REY et al., 2019). Em comparação com técnicas tradicionais de Engenharia, a Engenharia Natural possui vantagem de aumentar sua resistência com o passar do tempo, devido ao desenvolvimento das plantas, tornando-se parte das estruturas e estabilizando o solo (LEWIS, 2000; MENEGAZI; PALMERI, 2013; MAFFRA, 2014).

O principal elemento que caracteriza a técnica é o uso de vegetação como material de construção. Com frequência, associa-se a vegetação a materiais inertes, como rochas, madeira, concreto, alvenaria, geossintéticos ou aço. É preferível o uso de materiais degradáveis, como biomantas e madeira, que com o tempo se deterioram e se incorporam ao sistema biogeoquímico natural (FERNANDES; GUIOMAR, 2016). Deve-se ter como base na escolha de materiais inertes as características técnicas, a disponibilidade na região e o custo (DURLO; SUTILI, 2014).

A escolha correta das espécies vegetais é o componente chave na implantação de um projeto de sucesso (LEWIS, 2000). Os requisitos das plantas podem ser definidas pelas características biotécnicas, propriedades de interesse da vegetação como: cobertura vegetal; sistema radicial; porte; facilidade de propagação; rusticidade (resistência a danos causados por fatores externos) e flexibilidade dos ramos (SOUSA, 2015; MAFFRA, 2018). A correta escolha das espécies deve levar em consideração essas

características, além da adaptabilidade ao ambiente e o aspecto estético. É possível utilizar a cobertura vegetal como substituto de intervenções tradicionais quando as capacidades técnicas e biológicas das plantas sejam suficientes, tendo ainda capacidade de propagação e desenvolvimento (EFIB, 2015).

É importante citar que a Engenharia Natural possui alguns limites de utilização, circunstâncias em que as capacidades da vegetação são insuficientes para estabilizar determinado processo. Alguns casos em que isso ocorre são: (a) quando os esforços mecânicos são elevados e a vegetação não tem capacidade de absorvê-los; (b) quando os movimentos de massa são profundos e raízes não conseguem penetrar até a profundidade requerida de maneira suficiente; (c) quando a vegetação não tem condição de se desenvolver por falta de nutrientes no solo, solos jovens com baixo grau de intemperismo, inclinações muito grandes ou regiões que ficam longo períodos submersas (GRAY; LEISER, 1982; EFIB, 2015). Prioriza-se, nesses casos, o uso de soluções tradicionais de Engenharia Geotécnica, que podem ser integradas a algum uso de vegetação para melhoria dos aspectos paisagísticos e harmonia com o ambiente (LEWIS, 2000).

De maneira a empregar as técnicas com sucesso, atingindo os fins para que elas foram designadas, é importante observar todas as características e etapas de projeto. A Engenharia Natural ainda possui um caráter empírico, com poucos métodos analíticos de dimensionamento (SUTILI; GAVASSONI, 2017). Os autores sugerem que o desenvolvimento das técnicas de forma analítica deve ocorrer na forma de hierarquização das etapas.

Maffra (2014) propõe a realização do projeto em três etapas: (a) projeto conceitual, identificando a área e possíveis alternativas; (b) projeto básico, com a escolha da abordagem, dimensionamento, orçamento e avaliação de riscos e (c) projeto executivo, com detalhamento que permita a execução da intervenção e plano de manutenções.

Para a estabilização de margens ou taludes, deve-se considerar os aspectos geológico-geotécnicos, hidráulicos, hidrológicos e ecológicos. Um projeto analítico passa por levantamentos de campo, ensaios em laboratório, análise hidráulico-hidrológica, dimensionamento de componentes e verificação das etapas legais de implantação (MENEGAZI; PALMERI, 2013; MAFFRA, 2014).

Dando ênfase ao campo da Geotecnia, a seção 2.5.1 apresenta algumas características a serem observadas uma estabilização de canal utilizando Engenharia Natural.

### 2.5.1 Tipos de intervenções e características de projeto

Para estabilização de margens de canais de drenagem, pode-se utilizar técnicas tradicionais ou de Engenharia Natural. São técnicas tradicionais os enrocamentos, os gabiões e as canalização com peças de concreto. Essas técnicas podem ser consideradas soluções eficientes, porém onerosas e com necessidades grandes de material e energia. Em contraponto, as técnicas de Engenharia Natural demandam pouco material inerte, possuem facilidade acesso à locais de construção e têm simplicidade de execução. Devem ser consideradas em locais onde haja disponibilidade de material vegetal e condições de fixação deste no solo (HOLANDA; ROCHA, 2011).

De maneira a produzir condições adequadas para o crescimento da vegetação, evitando que deslizamentos, erosões ou fluxos d'água retirem a vegetação, é necessário o uso de técnicas construtivas de Engenharia Natural. Essas técnicas são responsáveis por uma estabilização à curto prazo, resistindo aos esforços enquanto a vegetação se desenvolve. Conforme os trabalhos de Fernandes (2011) e Menegazi e Palmeri (2013), dividiu-se as técnicas de Engenharia Natural em cinco classes, segundo características semelhantes, descritas abaixo:

- (A) Construções de suporte, construídas geralmente com o uso de materiais inertes (concreto, pedra, alvenaria, madeira, geotêxteis e outros) e vegetação;
- (B) Construções de drenagem, utilizando plantas com elevada capacidade de evapotranspiração, valas, trincheiras, e materiais inertes (como geossintéticos) para interceptação e destino do fluxo d'água superficial e subterrâneo;
- (C) Construções de estabilização, como forma de reduzir ações mecânicas, geralmente utilizando-se plantas lenhosas e árvores. Um exemplo é o plantio em banquetas, que visa "amarrar" o terreno e reduzir fontes de instabilidade;
- (D) Construções de cobertura, de forma a assegurar uma eficiente proteção da superfície. Coberturas com gramíneas e biomantas se encaixam nesta categoria, onde as obras têm como principal objetivo controlar a infiltração e conter a erosão;
- (E) Construções complementares, para condução e aceleração do crescimento da cobertura vegetal pretendida.

Na estabilização de um canal de drenagem, as construções do tipo suporte (A) predominam, com o uso de estruturas como paredes krainer ou grades vivas. O entorno do canal também é importante, onde obras do tipo drenagem (B), estabilização (C) e cobertura (D) são empregadas. O uso de construções complementares tipo (E) e a combinação de técnicas pode fazer com que a vegetação desempenhe diferentes funções e assim atenda aos requisitos necessários.

Tratando da seção do canal em si, a Figura 2.16 apresenta alguns tipos de construção para a seção transversal. Essas possibilidades não são únicas, outras formas de construção podem ser utilizadas para estabilização de margens.

FIGURA 2.16 – Tipos de canais de drenagem estabilizados com bioengenharia de solos



(a) Estabilização com troncos transversais e rochas, com vegetação nas margens



(b) Muro de suporte tipo paliçada viva



(c) Esteira de ramos



(d) Tranças vivas



(e) Muro de suporte tipo parede krainer



(f) Estabilização com geotêxteis e geomantas vivas

FONTE: (a) De Antonis e Molinari (2007); (b) Menegazi e Palmeri (2013); (c) Fernandes (2011) ; (d) Fernandes (2011); (e) De Antonis e Molinari (2007); (f) Fernandes (2011).

Durlo e Sutili (2014) classificam as técnicas de estabilização em cursos d'água em obras longitudinais e transversais. Segundo os autores, obras longitudinais são instaladas para recomposição de margens, onde se inclui a estabilização mecânica e proteção contra processos erosivos, como os exemplos da Figura 2.16. As intervenções transversais visam alterar a direção do fluxo de água, de forma a reduzir a velocidade ou ação erosiva nas margens, sendo exemplos as instalações de ramprôlas e espigões. Essas estruturas podem se estender por toda a seção transversal ou serem inseridas próximas a margem, para direcionar o fluxo para o centro.

Na utilização de estruturas de suporte e escoramento (contenções), como os casos (a), (b), (d) e (e) da Figura 2.16, pode-se utilizar guias de construção baseados em casos de sucesso ou teorias de empuxo de terra e estabilidade de taludes para um dimensionamento analítico (GARCIA-VEGA et al., 2014; ACHARYA, 2018). As paliçadas vivas (b) e paredes krainer (e) (estruturas semelhantes às contenções tipo *crib-wall*) funcionam como muros à flexão e à gravidade, respectivamente, sendo analisadas com as teorias comumente utilizadas. Tratando-se de estruturas que utilizam madeira expostas ao ambiente, é de se esperar que a sua resistência diminua com o tempo, transferindo essa função para a vegetação, que incrementa a resistência do solo e o consolida com o desenvolvimento radicular (FERNANDES, 2011).

Um modelo para dimensionamento de estrutura de estabilização em Engenharia Natural é análogo a de uma análise geotécnica e estrutural comum, considerando-se as forças instabilizantes e estabilizantes, com o acréscimo das especificações relacionadas à parte viva. A massa de solo, o peso da vegetação, a sobrecarga das estruturas à montante e esforços de origem hidráulica (escoamento transversal, poropressão e infiltração) são os esforços instabilizantes (MENEGAZI; PALMERI, 2013; EFIB, 2015). Além desses, a ação da corrente de água gera uma tensão de arraste <sup>3</sup> ( $\tau_0$ ), quantificada em N/m<sup>2</sup>. A velocidade do fluxo (m/s) também é um parâmetro para caracterizar a ação hidráulica.

Já as forças estabilizantes são devidas ao peso próprio dos elementos, a resistência ao cisalhamento do solo e resistência de elementos externos. Pode-se empregar análises de estabilidade de taludes com métodos consolidados, como talude infinito, Fellenius ou Bishop, considerando efeito de raízes (GREENWOOD, 2006) e teorias de empuxo de terra, como a de Coulomb (GARCIA-VEGA et al., 2014).

Além das análises de estabilidade, deve-se levar em conta os processos erosivos. Segundo Fernandes (2011), análises relacionadas à erosão podem levar em consideração a erodibilidade do solo, com uma avaliação experimental, ou equações

<sup>3</sup> A tensão de arraste ocorre transversalmente ao elemento de contenção, devido ao movimento do fluxo d'água, tendendo a carregar os componentes da estrutura (MENEGAZI; PALMERI, 2013)

empíricas de estimativa de material erodido por unidade de tempo, como a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) (Equação 2.1), discutida na seção 2.2.1.

Na Engenharia Natural, a vegetação pode ser projetada para o controle da erosão, através da redução da erodibilidade do solo, da redução da ação erosiva de gotas de chuva com a cobertura vegetal e da redução de declives e comprimentos de trajetos de escoamento (FERNANDES, 2011). O uso de estruturas permanentes ou provisórias pode ser necessário como suporte, assim como o uso de malhas metálicas, geossintéticos poliméricos, biomantas degradáveis ou banquetas — estruturas na forma de pequenos degraus com materiais vivos que interceptam os sedimentos. Para o cálculo de erosão na abordagem da EUPS, a vegetação altera os fatores adimensionais da equação e o Fator  $K_{EUPS}$  de erodibilidade do solo (DE BAETS et al., 2006; FERNANDES, 2011).

As espécies que proporcionem uma boa cobertura superficial, de maneira densa e contínua, com raízes superficiais são as mais adequadas para uso no controle da erosão (FERNANDES, 2011). Ainda segundo o autor, o uso de herbáceas é o recomendado nesse tipo de aplicação, podendo ser utilizadas também plantas lenhosas, pelas suas capacidades mecânicas e de cobertura. As plantas utilizadas devem tolerar solos com drenagem rápida, encostas íngremes e locais expostos, sem necessitar grandes cuidados com manutenção. É preferível o uso de espécies nativas, principalmente arbustos, uma vez que são compatíveis com os ecossistemas locais e com o solo, tendo custos mais baixos por haver disponibilidade. As espécies exóticas podem ser consideradas em determinadas circunstâncias, se suas características biotécnicas sejam relevantes e reconhecidas (HOLANDA; ROCHA, 2011).

Intervenções como as apresentadas na Figura 2.16, que visam a estabilização mecânica do terreno e estruturas de controle de processos erosivos, têm como resultado sistemas vivos que irão se desenvolver e atingir uma situação de equilíbrio dinâmico. Através da escolha adequada do tipo de intervenção construtiva, assim como os materiais de construção vivos e inertes, consegue-se uma intervenção sustentável e efetiva.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este capítulo aborda a caracterização da região em estudo, um diagnóstico de processos erosivos e um projeto conceitual de estrutura de estabilização para um dos canais de drenagem do bairro.

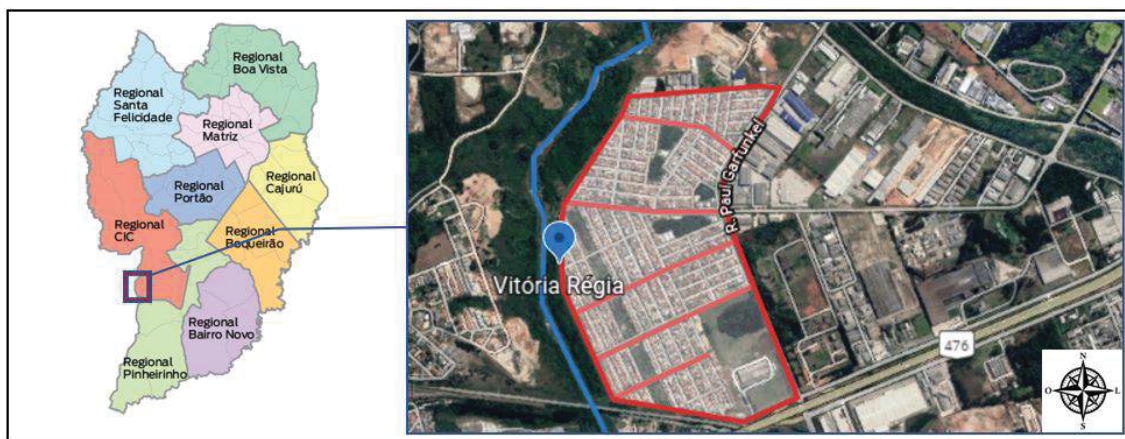
A seção 3.1 exibe aspectos geográficos, geológicos, hidrológicos, de ocupação, clima e bioma da região. A seção 3.2 apresenta o diagnóstico dos processos que estão ocorrendo nos canais de drenagem, dando ênfase ao canal da Rua Cyro Correia Pereira, trecho escolhido para avaliação no presente trabalho. A etapa conceitual do projeto para o canal é apresentada na seção 3.3.

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS DO BAIRRO VITÓRIA RÉGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida no bairro conhecido como Vitória Régia, na cidade de Curitiba, estado do Paraná. Com uma recente ocupação, os três loteamentos que compõem o bairro foram instalados em área de cheia do rio Barigui, um dos principais rios da capital paranaense. Os loteamentos Vitória Régia I, II e III foram aprovados em 2002, com implantação em 2003. Foram construídos canais de drenagem nos canteiros centrais das principais ruas do bairro, além de um canal paralelo à calha do rio para abrigar eventuais cheias extravasantes.

O bairro possui três loteamentos, com uma área total de 1.271.468,76 m<sup>2</sup> e 3.121 lotes. A ocupação da área é predominantemente residencial e classificada como Setor Especial de Habitação de Interesse Social (SE-HIS), segundo o plano diretor da cidade (CURITIBA, 2015). O conjunto faz parte da regional CIC (Cidade Industrial de Curitiba), próximo da divisa entre os municípios de Curitiba e Araucária (Figura 3.1).

FIGURA 3.1 – Localização da Área de Estudo



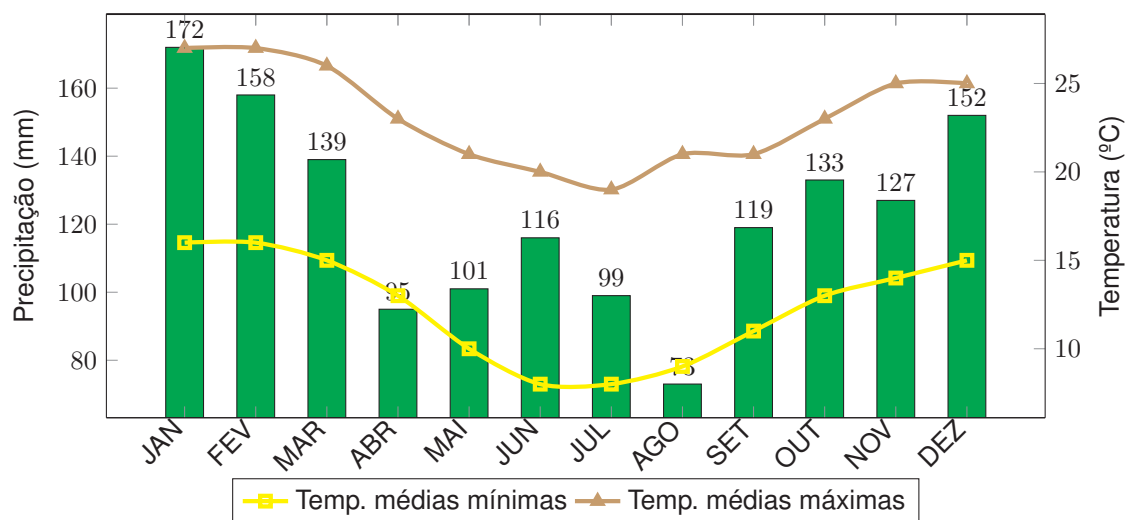
FONTE: O autor



A bacia do rio Barigui sofreu com um processo rápido de urbanização, com crescimento da população na sua área de influência (SUDERHSA, 2002). O rio possui um projeto de revitalização denominado Viva Barigui, que desde 2007 vem desenvolvendo medidas de preservação e reversão da degradação já existente. É um desafio, tratando-se de um rio que está em ambiente urbano em quase toda sua extensão. Dentre os objetivos do projeto, há a recomposição da vegetação de margem, controle da erosão acelerada e recuperação de afluentes (FRÓES, 2019).

O Vitória Régia possui vizinhança com trechos de mata, concentrados à oeste do rio Barigui. O bioma da região é classificado como Mata Atlântica — Floresta Ombrófila Mista (FRÓES, 2019). Predominam no bioma vegetações de climas úmidos e plantas ripárias, com boa presença de araucárias (*Araucaria angustifolia*). Esse tipo de bioma é característico de regiões de clima ameno e elevada precipitação média anual. O clima de Curitiba é subtropical, com precipitações o ano todo, mais concentradas no verão. As temperaturas médias variam entre 10 °C (mínima no inverno) e 28 °C (máxima no verão), como pode ser observado na Figura 3.3.

FIGURA 3.3 – Temperaturas e precipitações médias anuais em Curitiba



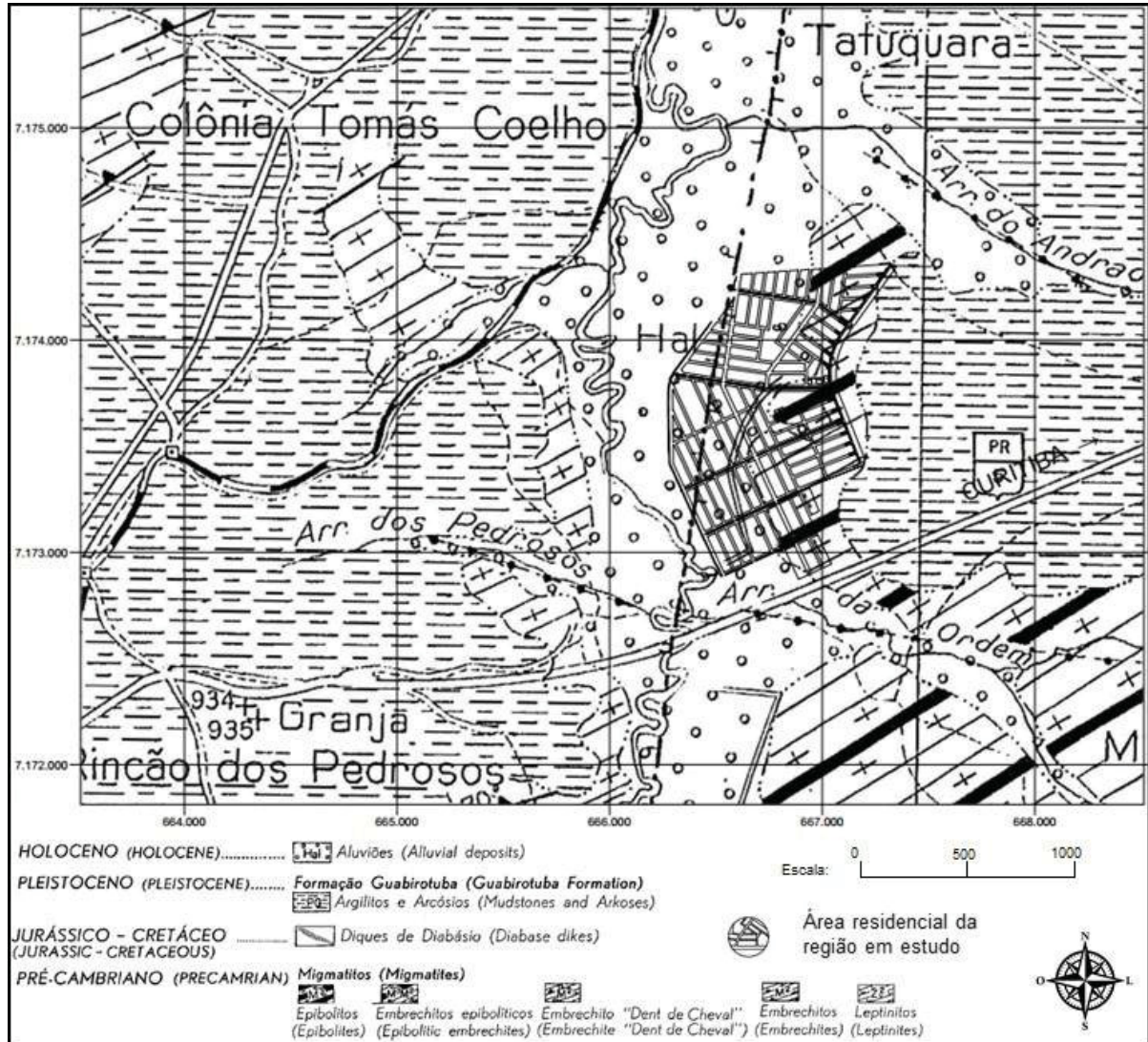
FONTE: Adaptado de ClimaTempo (2020)

Quanto à geologia da região, foram consultados dois mapeamentos geológicos que representam a área: a carta geológica produzida por Bigarella et al. (1966) e o mapa geológico da Mineropar (2015).

A Figura 3.4 apresenta a carta geológica da região do bairro Vitória Régia, originalmente produzida por Bigarella et al. (1966) e adaptada para a apresentação da região em destaque. Para adaptação da imagem, a malha das ruas do bairro foram inseridas na carta geológica, através de um *software* de georreferenciamento. A carta de Bigarella et al. (1966) foi o levantamento geológico de menor escala e mais detalhado

encontrado da região, apesar de pequenas distorções nas coordenadas observadas no processo de manipulação no *software*.

FIGURA 3.4 – Carta geológica da região em estudo



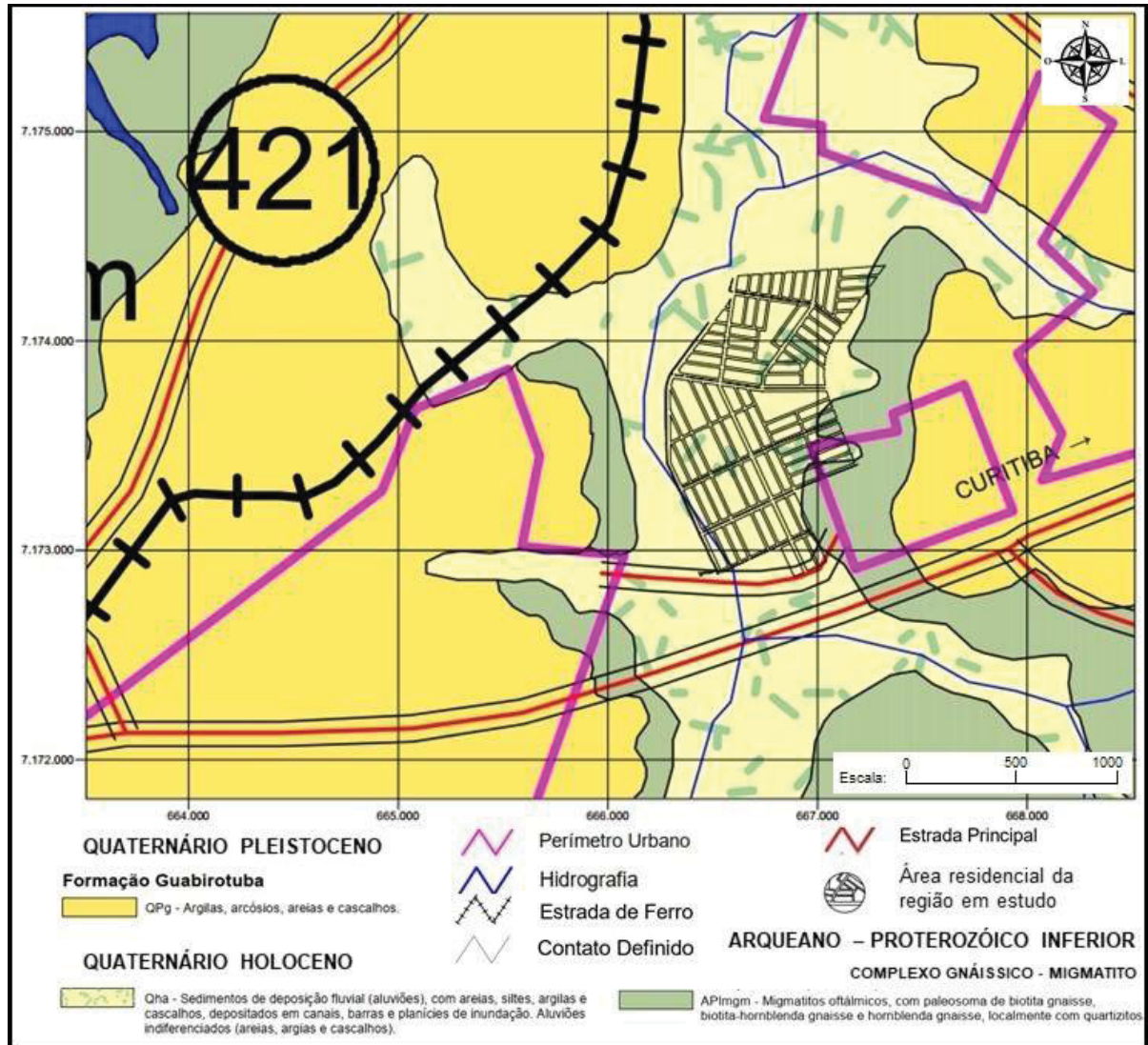
FONTE: Adaptado de Bigarella et al. (1966)

Como pode ser observado na Figura 3.4, o bairro se encontra, na sua maior parte, em uma região de aluviões atuais. À leste da ocupação há uma presença de uma região com Migmatitos e uma região identificada como formação Guabirotuba. Pode-se observar também que na época de concepção do mapa, havia um córrego na região do canal, indicando um fundo de vale. O córrego teve sua posição alterada e seu volume de escoamento foi transferido para os canais artificiais do bairro.

Na Figura 3.5, apresenta-se a localização do bairro dentro do mapa geológico produzido pela Mineropar (2015), em escala 1:250.000. A produção da figura seguiu o mesmo processo descrito acima, com manipulação em *software* georreferenciado. Neste levantamento, a região também fica posicionada, na sua maior parte, dentro de

uma região de solo aluvionar, influenciada pelo rio Barigui. À leste existe uma região identificada como Migmatitos oftálmicos, pertencente ao complexo Gnáissico-Migmatito. Os contatos geológicos são definidos e coincidentes em ambos os levantamentos.

FIGURA 3.5 – Mapa geológico adaptado da região em estudo



FONTE: Adaptado de Mineropar (2015)

Comparando-se as Figuras 3.4 e 3.5, pode-se observar nas representações que o rio Barigui passava em uma calha diferente da atual. Na carta de Bigarella et al. (1966), observa-se uma calha mais à oeste, com vários meandros e um trajeto sinuoso. Já no mapa da Mineropar (2015), feito 49 anos depois, observa-se um trajeto mais retilíneo, com poucos meandros. As movimentações do rio e mudanças na calha justificam a criação de depósitos de aluviões na região do entorno.

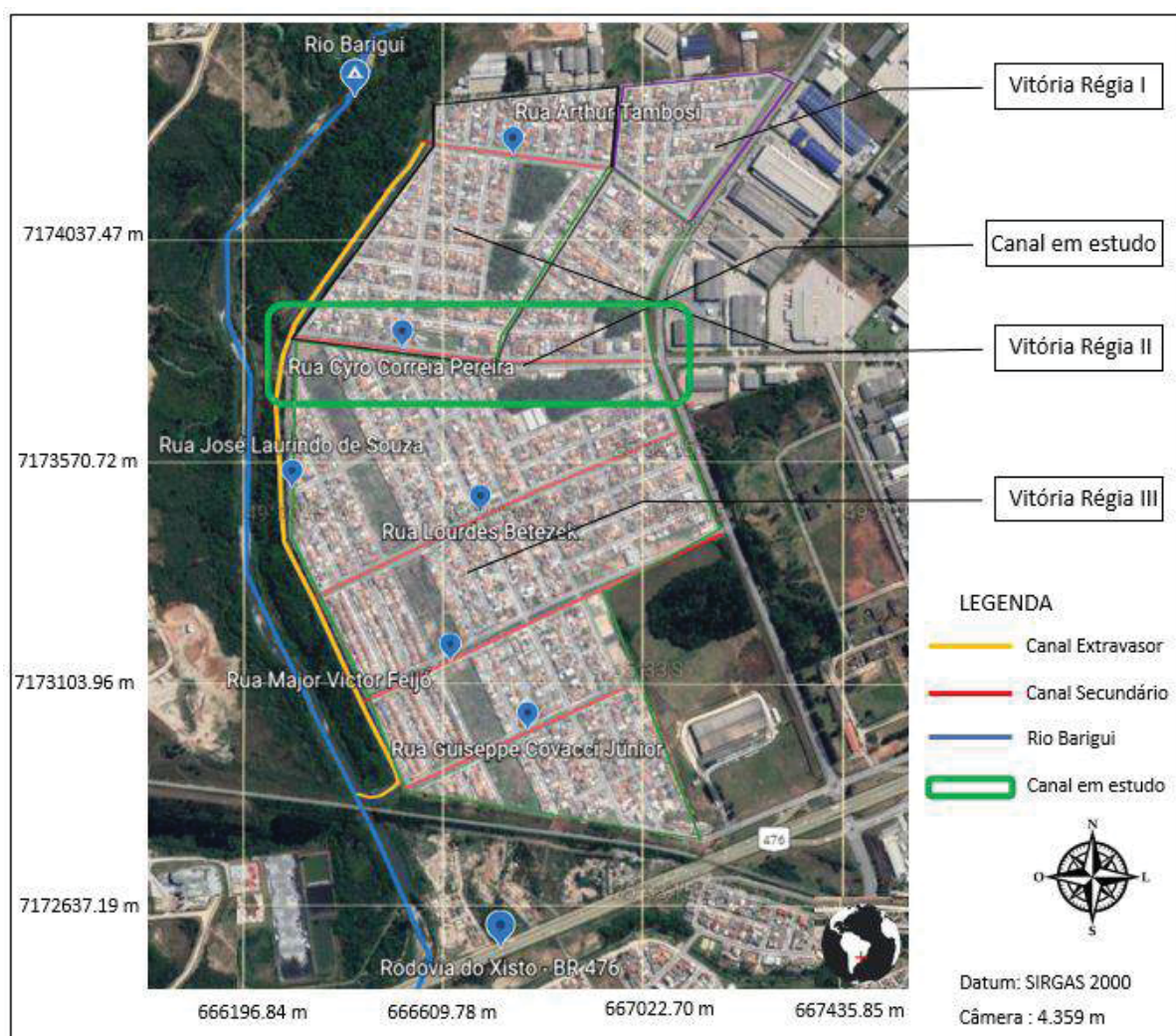
A maior escala do levantamento da Mineropar (2015) gerou uma falta de precisão no posicionamento da área residencial, com uma pequena parte de ruas posicionadas em cima da calha do rio. Também comparando as duas representações,

o mapa da Mineropar (2015) exhibe ferrovias e rodovias não existentes na época da produção da carta de Bigarella et al. (1966).

Essas análises das cartas geológicas permitem concluir que os canais possuem solos sedimentares, oriundos principalmente de regiões de Migmatitos e formação Guabirotuba e depositados na região. A construção de aterros durante a implantação do bairro trouxe solos de diferentes características para a região. A classificação de três solos distintos coletados no canal em estudo é explorada na seção 4.2.1.

A ocupação da área se tornou possível com a construção de um sistema de drenagem, composto por cinco canais que recebem a chuva coletada pelas bocas de lobo e galeria e as direcionam a um canal principal. A Figura 3.6 apresenta a disposição dos 3.102 m de canais da região e os limites do bairro.

FIGURA 3.6 – Localização dos canais dos canteiros centrais das Ruas Arthur Tambosi, Cyro Correia Pereira, Lourdes Betezek, Major Victor Feijó e Giuseppe Covacci Jr e canal extravasor principal nos loteamentos Vitória Régia I, II, III



FONTE: O autor, utilizando imagens do Google Earth (GOOGLE, 2020).

Os canais de drenagem foram posicionados nas principais ruas do bairro e servem como emissários de águas pluviais coletadas em outros locais, além do transporte da água coletada do próprio bairro. O canal principal serve como emissário, tendo largura superior aos outros, seguindo paralelo a calha do Barigui e encontrando o leito do rio em um ponto à jusante do Vitória Régia. A sua posição paralela ao leito do Rio Barigui permite que o excesso de vazão se acomode na sua seção transversal e não chegue aos lotes. O canal principal é delineado pela cor amarela na Figura 3.6.

Na presente pesquisa, escolheu-se para avaliação o canal da rua Cyro Correia Pereira, destacado na Figura 3.6 por um quadro verde. O canal fica na região central do bairro e foi selecionado por apresentar problemas com processos erosivos e instabilidades nas margens.

Realizou-se também um levantamento de características e ocorrências de erosões em todos os canais do bairro, com o objetivo de identificar semelhanças e pontos críticos. Esse levantamento é apresentado na seção 3.2.

### 3.2 PROCESSOS EROSIVOS COMUNS NOS CANAIS DA REGIÃO

Os canais de drenagem do Vitória Régia são artificiais e vêm apresentando problemas com crescimento de vegetação inadequada, perda de seção de escoamento, fenômenos erosivos e verticalização das margens. Como o bairro encontra-se em uma região de planície, com baixas variações de altitude, a água precipitada no bairro encontra dificuldades para escoar rapidamente, tanto nos lotes quanto nos canais de drenagem. Apesar da baixa impermeabilização dos lotes, as inundações são um risco na região, além do transporte de sedimentos para dentro dos canais. As margens dos canais têm sinais de processos erosivos de origem pluvial e fluvial, que verticalizam as margens e reduzem a seção de vazão.

A Figura 3.7 exhibe a seção de todos os canais do bairro, fotos retiradas na região próxima ao fim da extensão de cada um dos leitos.

Os canais das ruas Cyro Correia Pereira (Figura 3.7(a)), Arthur Tambosi (Figura 3.7(b)), Lourdes Betezek (Figura 3.7(c)) e Major Victor Feijó (Figura 3.7(d)) apresentam movimentações de materiais e perdas de seção útil. Merece destaque a Figura 3.7(b), onde existem árvores com acentuada inclinação, indicando possível instabilidade do talude, e a Figura 3.7(c), onde há afundamentos e a parte fixa de solo se encontra apenas na região de influência do sistema radicial das árvores.

FIGURA 3.7 – Aspectos dos canais de drenagem existentes



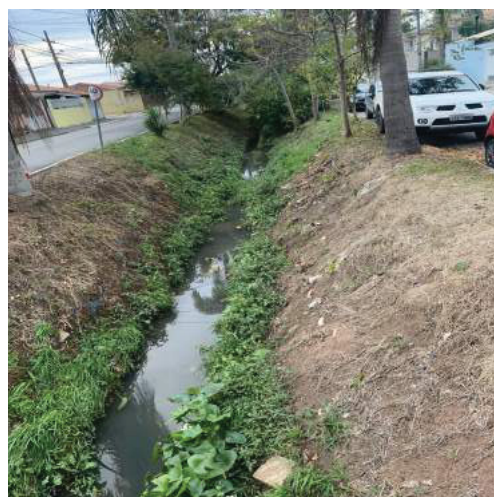
(a) Canal da rua Cyro Correia Pereira



(b) Canal da rua Arthur Tambozi



(c) Canal da rua Lourdes Betezek



(d) Canal da rua Major Victor Feijó



(e) Canal da rua Giuseppe Covacci Jr.



(f) Canal principal, paralelo a rua José Laurindo de Souza

NOTA: Fotografias obtidas no dia 18/07/2020

FONTE: O autor

Na Figura 3.7(d), o talude não apresenta mais grama como cobertura, o que pode acelerar uma erosão de origem pluvial. O canal da Rua Giuseppe Covacci Jr.(Figura 3.7(e)) e canal principal (Figura 3.7(f)) apresentam crescimento de espécies que preenchem toda a parte inferior do leito, reduzindo a capacidade de vazão da calha. Essas espécies são comuns em ambientes de alta umidade.

Os processos erosivos são bem perceptíveis no canal principal do bairro, pelo seu porte e maior vazão escoante. A Figura 3.8 apresenta o aspecto do canal principal e algumas formas típicas de erosão presentes, na forma de sulcos e corrosões<sup>1</sup>, além de movimentos de massa que estão ocorrendo em sua extensão.

FIGURA 3.8 – Processos que estão ocorrendo no canal emissário principal do bairro — canal paralelo a rua José Laurindo de Souza



(a) Panorama geral do canal



(b) Sulcos transversais a seção, oriundos de erosões pluviais e corrosão da base da margem devido à erosão fluvial



(c) Presença de espécies vegetais de ambientes de alta umidade no fundo do leito



(d) Movimento de massa por descalçamento e verticalização

NOTA: Fotografias obtidas no dia 10/07/2020

FONTE: O autor

<sup>1</sup> O processo de corrosão das margens é descrito por Durlo e Sutili (2014) como a erosão junto ao nível d'água, que causa retirada de material do sopé da margem.

Pode-se observar a presença de plantas típicas de ambientes de alta umidade na calha menor do canal (Figura 3.8(a) e Figura 3.8(c)), processos erosivos pluviais na forma de sulcos em trecho da margem sem vegetação (Figura 3.8(b)) e a presença de um processo denominado corrosão: o fluxo d'água retira material do pé da margem e o descalçamento causa ruptura do talude (Figura 3.8(b) e Figura 3.8(d)).

O canal da rua Cyro Correia Pereira fica na região central do bairro, sendo o segundo a desaguar no canal principal. Devido a menor seção transversal, comparada ao canal principal, um projeto de recuperação teria um menor custo de implantação. Por essas razões, este foi o canal escolhido para a presente pesquisa. Os trechos do canal vêm apresentando movimentações e sinais de processos erosivos, além de danos em estruturas já existentes, como drenagens e gabiões. A descrição de aspectos do canal é apresentada na seção 3.2.1.

### 3.2.1 Diagnóstico e dados do trecho do projeto de estabilização das margens

O canal da Rua Cyro Correia Pereira é responsável por drenar uma área de cerca de 83,4 ha, constituído por um trecho canalizado e um trecho escavado em escoamento livre. O canal inicia-se em uma área industrial, tendo um trecho canalizado até a parte localizada no Vitória Régia. A Figura 3.9 apresenta uma vista do canal.

FIGURA 3.9 – Vista do canal da Rua Cyro Correia Pereira



FONTE: O autor

A Figura 3.10 apresenta um levantamento das características de ocupação da área da bacia hidrográfica do canal. Verifica-se que a maior parte da ocupação é residencial de baixa densidade e industrial. Áreas gramadas e florestais ocupam cerca de 15% da área total.

FIGURA 3.10 – Ocupação das áreas da bacia hidrográfica do canal da rua Cyro Correia Pereira

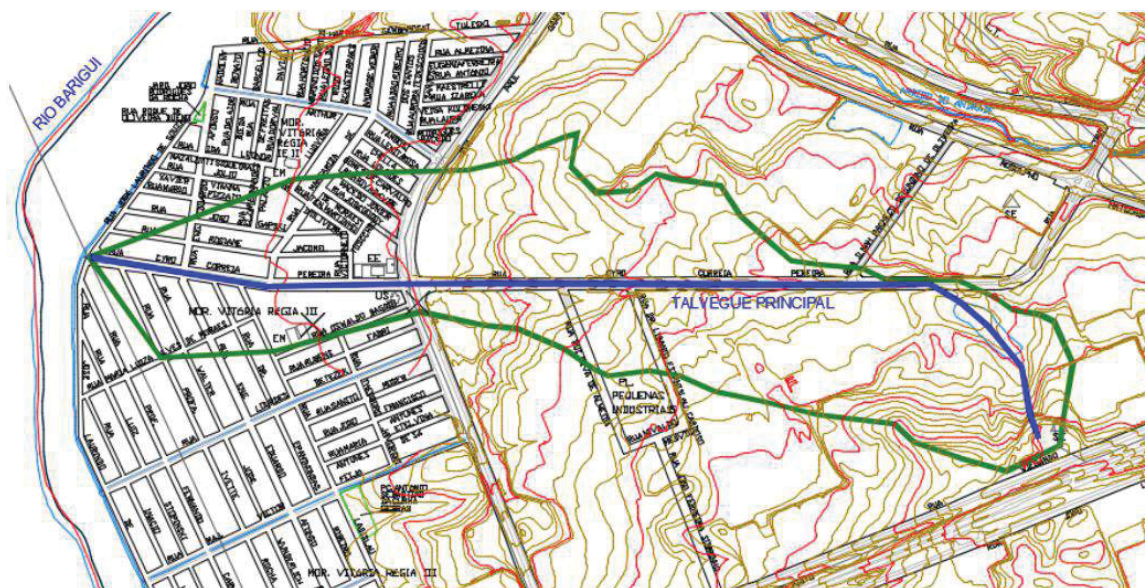


FONTE: O autor, utilizando imagens do Google (2020).

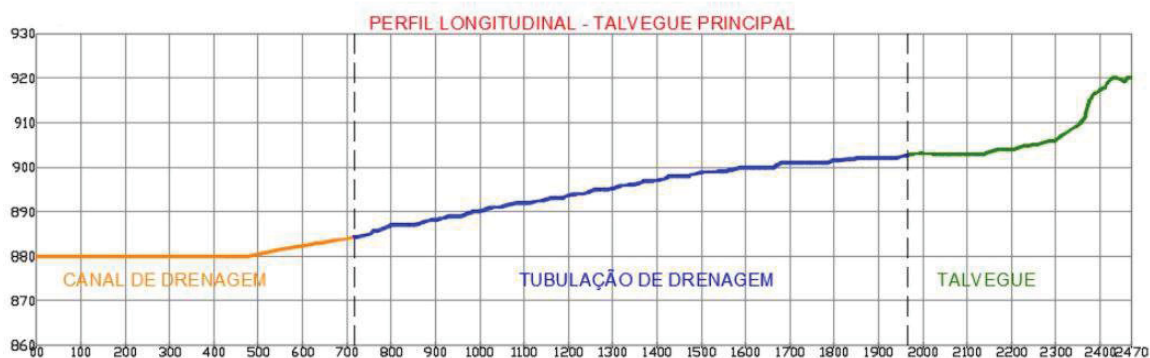
Considerando o talvegue principal do canal, pode-se dividi-lo em três trechos: um talvegue em região mista de área de vegetação e industrial; uma parte canalizada e com escoamento em tubulação em concreto e uma parte no bairro Vitória Régia, construído em canal artificial escavado, sem revestimento. O trecho industrial tem cerca de 505 m de extensão, a parte tubulada e canalização contém cerca de 1.250 m e a região dentro do bairro, objeto principal de estudo, tem 754 m de extensão.

A Figura 3.11 apresenta a planta de localização do talvegue principal (Figura 3.11 (a)) e a Figura 3.11 (b) contém o perfil de elevação do canal, com escala vertical 10 vezes maior que a escala horizontal. A declividade média do talvegue principal é de 2,00%.

FIGURA 3.11 – Planta e perfil do talvegue



(a) Planta



(b) Perfil de elevação

FONTE: (a) IPPUC (2019); (b) O autor

Os processos erosivos do trecho possuem origem pluvial (impacto das gotas de água da chuva) e fluvial (ao aumento de velocidade no fluxo em situações de cheias). A retirada de material da base e corrosão das margens leva a instabilidades e verticalização das margens, com inclinação de árvores, subsidências e movimentos de massa. A Figura 3.12 apresenta alguns registros fotográficos de ocorrências verificadas no canal. A situação é semelhante, em menor ou maior escala, nos demais canais do bairro.

FIGURA 3.12 – Processos erosivos do canal da Rua Cyro Correia Pereira



(a) Verticalização da margem no canal e queda de material

(b) Jerivá (*Syagrus romanzoffiana*) inclinado por movimentações

(c) Obstrução do leito vazante



(d) Movimentos de massa



(e) Subsidiências



(f) Verticalização da margem

FONTE: O autor

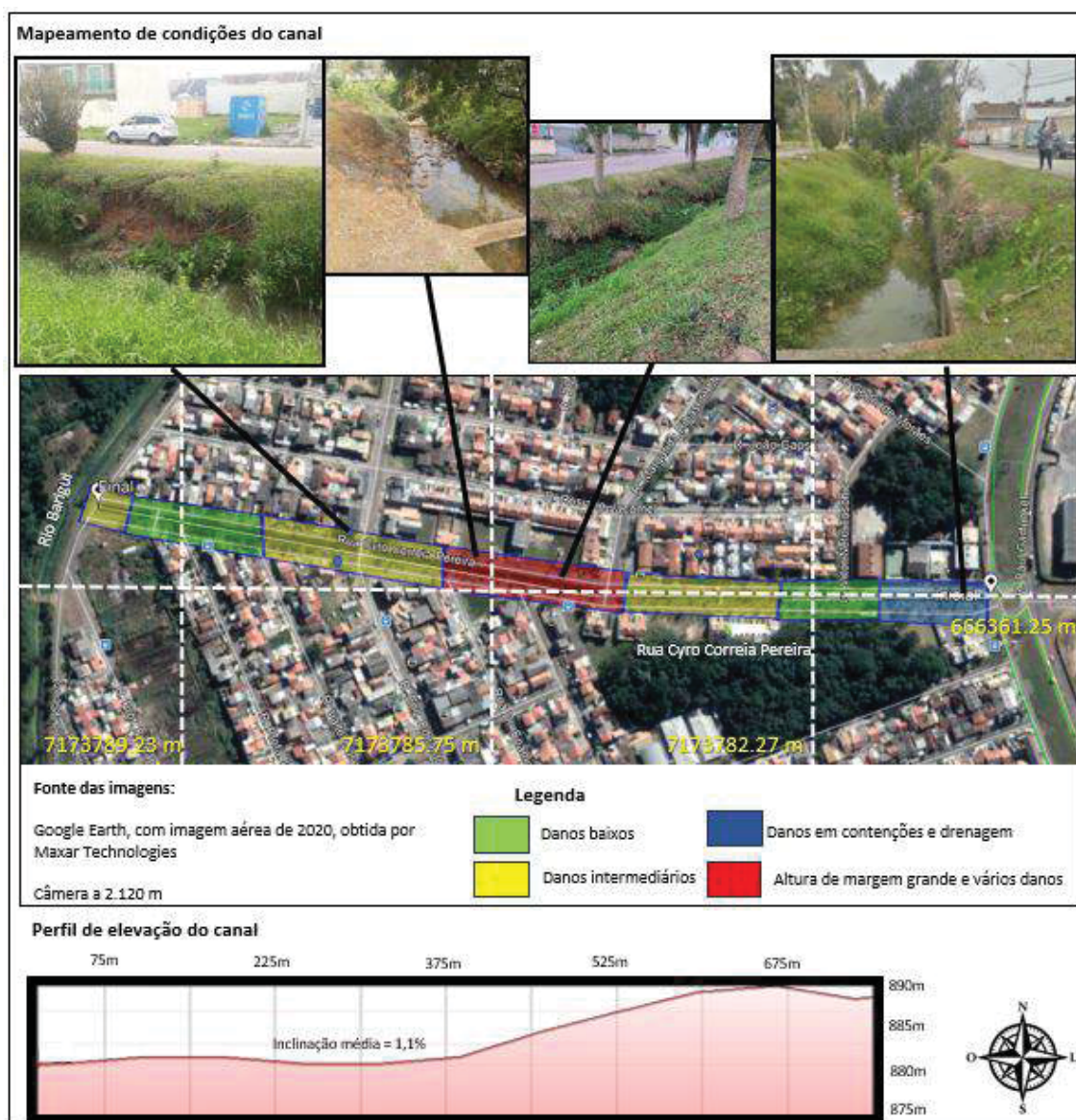
De forma a recompor a seção de vazão, garantindo capacidade de escoamento, são necessárias intervenções que estabilizem as margens, além da recomposição da vegetação no entorno para diminuir o transporte de sedimentos. Na seção 3.3, apresenta-se a metodologia empregada para definição da etapa conceitual do projeto e seleção de técnicas.

### 3.3 PROJETO CONCEITUAL DA ESTRUTURA DE ESTABILIZAÇÃO

Como etapa inicial do projeto de estabilização do canal da rua Cyro Correia Pereira, realizou-se um levantamento das feições de processos erosivos em campo, percorrendo toda a extensão do canal e anotando as coordenadas GPS dos pontos com ocorrências. Esse processo teve como objetivo criar uma hierarquização dos níveis de intervenção, possibilitando obter o tipo de estrutura mais adequada para cada trecho do canal, ainda em uma etapa de pré-dimensionamento.

O levantamento de campo permitiu a criação de um mapa com as manifestações de erosão pontuais para os 754 m de canal. Foi utilizado uma imagem de satélite do bairro, com demarcações dos pontos e delimitação dos polígonos que correspondem a cada categoria. A Figura 3.13 apresenta os resultados do mapeamento realizado.

FIGURA 3.13 – Mapeamento dos processos erosivos no canal de drenagem em estudo



FONTE: O autor, utilizando imagens do Google (2020)

O canal apresenta uma região crítica, identificada pela cor vermelha na Figura 3.13. Nessa região, a margem é quase vertical, existe um grande desprendimento de material, inclinação das árvores do entorno e danos no pavimento. O trecho tem comprimento de aproximadamente 150 m. Na Figura 3.14 (a), apresenta-se uma região com margem rompida nesse trecho crítico do canal.

Uma região na parte inicial do canal teve as margens reforçadas com um muro gabião, de cerca de 2,5 m de altura. Esse gabião apresenta vários danos, exacerbada deformação e ruptura de parte da tela da face. Um outro ponto observado é a falta de uma ombreira, que faça o revestimento entre a lateral do gabião e a ala do bueiro de greide que faz a travessia da rua (Figura 3.14 (b)). Essa observação é importante na concepção de um novo projeto, visto que é necessário corrigir os problemas que levaram aos danos na estrutura de contenção.

FIGURA 3.14 – Danos e ocorrências identificadas na faixa crítica do canal da Rua Cyro Correia Pereira



(a) Ruptura da margem



(b) Abaulamento e deformações no gabião

FONTE: O autor

Determinadas regiões do canal apresentam uma seção bem delimitada, com vegetação fixa e poucos sinais de processos erosivos. Porém, com a correção de outros trechos, esta região pode desenvolver sinais de erosão. Ao todo, existem 189 m nessa situação.

A partir do levantamento descrito, foram selecionadas técnicas mais adequadas para cada trecho do canal, tendo como base a concentração de pontos com ocorrências de erosão e técnicas mais adequadas em cada caso. A Figura 3.15 apresenta o tipo de estrutura selecionada para cada trecho do canal.

FIGURA 3.15 – Seleção de técnicas no canal da rua Cyro Correia Pereira a partir do levantamento de campo



FONTE: O autor, utilizando imagens do Google (2020)

Em regiões onde os processos desestabilizantes são de menor magnitude, demarcadas em amarelo na seleção de técnicas, foi avaliado o uso de técnicas apenas necessárias ao controle da erosão superficial, como banquetas, geomantas ou apenas o plantio de vegetação sem estruturas de contenção. A técnica de esteira viva foi selecionada para esse trecho.

As regiões demarcadas em verde na Figura 3.15 podem ser recuperadas com estruturas de contenção em Engenharia Natural, como paliçadas vivas. Ao todo existem cerca de 400 m de canal nessa condição.

Na região demarcada em azul, devido à grande altura da margem, verticalidade da seção ou presença de estruturas danificadas (gabião), é prevista a construção de estruturas de estabilização inertes, como gabiões ou outra estrutura de contenção flexível. É preciso o reparo ou substituição do gabião existente no início do canal.

A caracterização do bairro em estudo é importante para se observar todos os aspectos relevantes da região, definir a abordagem de projeto e reunir informações para auxiliar na ligação entre a metodologia experimental tema da pesquisa e o projeto da estrutura de estabilização. No Capítulo 4 apresenta-se a metodologia de ensaios empregados para a avaliação do potencial erodível de três solos coletados no canal em estudo.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos desenvolvidos durante a pesquisa são o tema deste capítulo, que divide-se em três partes. Inicia-se com a seção 4.1, que discute os requisitos dos ensaios selecionados para compor a metodologia proposta no trabalho.

Na seção 4.2 são apresentados os métodos utilizados para ensaios de caracterização e ensaios qualitativos de erosão. A seção 4.3 exhibe aspectos da construção do equipamento Inderbitzen utilizado no presente trabalho e a sua metodologia de ensaio.

### 4.1 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo da presente pesquisa foi desenvolver uma metodologia de laboratório que permita a obtenção de parâmetros necessários para a avaliação de erosão dentro de projetos utilizando intervenções de Engenharia Natural. Na metodologia, os conceitos de erodibilidade e classificações de solo na geotecnia foram considerados.

Foi discutido no Capítulo 2 a importância e características dos ensaios de erosão Inderbitzen, *crumb test*, capilaridade e erodibilidade específica, selecionados para o presente trabalho. Completam o conjunto de ensaios a análise granulométrica e os ensaios de compactação e teor de matéria orgânica. Como resumo, a Tabela 4.1 exhibe os ensaios propostos e os documentos de referência.

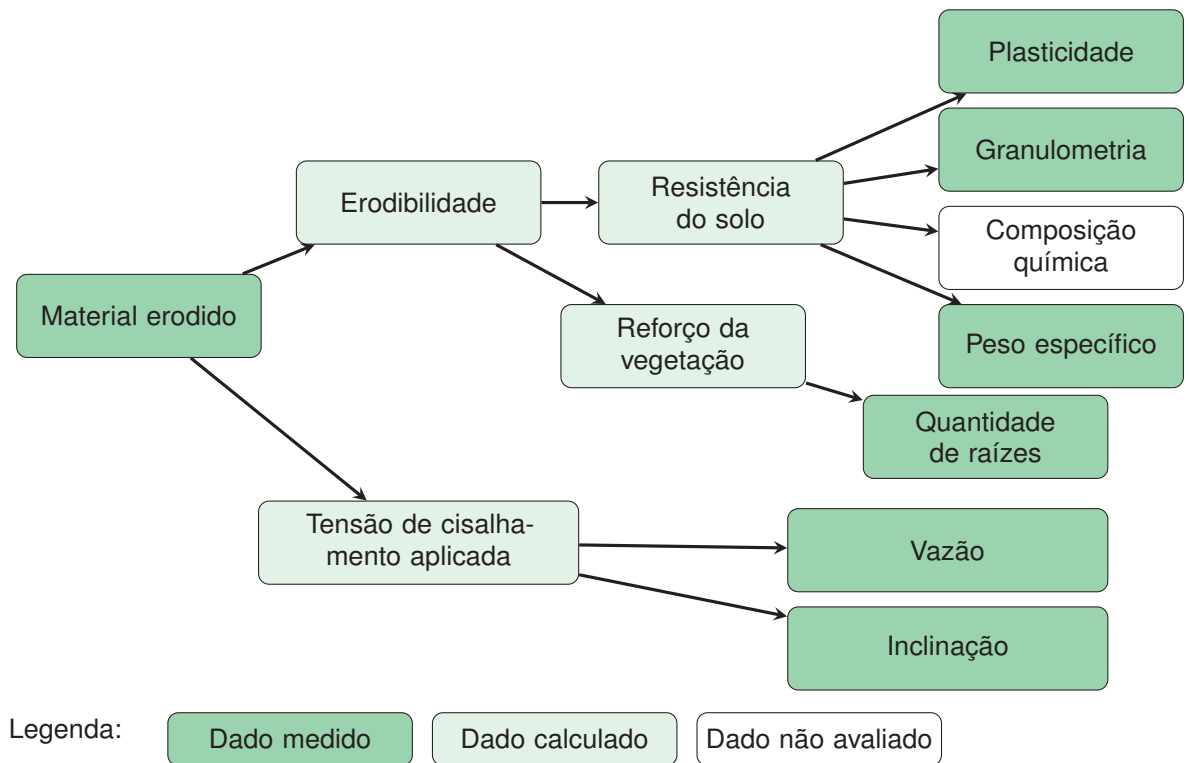
TABELA 4.1 – Ensaio propostos na metodologia e documentos de referência

| Item                                    | Material de referência                |
|-----------------------------------------|---------------------------------------|
| Análise granulométrica                  | NBR 7181 (ABNT, 2016c)                |
| Limites de Atterberg                    | NBR 7180 (ABNT, 2016b) e ABNT (2016a) |
| Teor de matéria orgânica                | NBR 13600 (ABNT, 1996)                |
| Ensaio de Compactação                   | NBR 7182 ABNT (2016d)                 |
| Massa específica real dos grãos         | ME 093 (DNER, 1994)                   |
| Capilaridade e erodibilidade específica | Nogami e Villibor (1979)              |
| <i>crumb test</i>                       | NBR 13601 (ABNT, 2020)                |
| Ensaio de erosão Inderbitzen            | Inderbitzen (1961) e Bastos (1999)    |

Na Figura 4.1 é exibido um fluxograma que expressa a interdependência das variáveis analisadas no ensaio Inderbitzen. O material coletado durante o ensaio depende da erodibilidade do solo e da tensão de cisalhamento aplicada. A erodibilidade, por sua vez, depende de fatores internos (plasticidade, granulometria, composição

química e peso específico) e externos, como um reforço por vegetação. Já a tensão de cisalhamento hidráulica depende da vazão e da inclinação na rampa do equipamento. Dentre essas variáveis, apenas a composição química dos solos não foi avaliada.

FIGURA 4.1 – Fluxograma de interdependência das variáveis



NOTA: A cor de cada quadro indica a maneira que é obtido o dado. Observar a legenda.

FONTE: O autor

O método e os requisitos propostos podem ajudar a definir especificações e verificar a abordagem de controle de erosão no projeto de Engenharia Natural. Além disso, os ensaios permitem classificar a erodibilidade do solo estudado, definir relações entre variáveis, comparações e a aplicação em critérios de erosão.

## 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Definidas as relações buscadas, os requisitos dos ensaios, as amostras e as demais informações necessárias, os procedimentos para a realização dos ensaios de caracterização e qualitativos de erosão são descritos nesta seção.

### 4.2.1 Extração de amostras e caracterização física

As amostras utilizadas para a realização dos ensaios foram extraídas de três solos distintos da região do canal da Rua Cyro Correia Pereira, do bairro Vitória Régia (caracterizado no Capítulo 3). As extrações ocorreram em trechos de solo exposto,

onde foram obtidas amostras indeformadas e deformadas. As amostras indeformadas foram extraídas com anéis circulares biselados, a 10 cm de profundidade, em um patamar escavado. Já as amostras deformadas foram extraídas após a camada vegetal, com o auxílio de pás e sacos. A Figura 4.2 exibe os locais escolhidos para coleta e a coordenada geográfica de cada ponto de extração.

FIGURA 4.2 – Trechos para coleta de amostras no canal da Rua Cyro Correia Pereira



(a) Coleta de amostras no final da rua (solo 1); (b) Coleta de amostras no leito do canal (solo 2); (c) Coleta de amostra em região de movimento de massa; (d) Imagem aérea com a representação dos locais de coleta;

FONTE: O autor

A seleção de locais de extração teve como base a obtenção de solos visualmente recorrentes no canal, para uma melhor análise espacial da erodibilidade de diferentes trechos.

Foram extraídas amostras indeformadas em anéis de PVC de 9,7 cm de diâmetro e 5 cm de altura para ensaios Inderbitzen e em anéis de PVC de 5 cm de altura e 4,92 cm de diâmetro para ensaios de erosão MCT.

Na sequência do desenvolvimento do trabalho, as amostras receberam uma nomenclatura, que segue as características observadas em campo. Pela análise tátil-visual, identificou-se os solos como: Solo 1 - Arenoso; Solo 2 - Argiloso e Solo 3 - Pedregulhoso. A Figura 4.3 apresenta uma imagem e a identificação dos três solos coletados

FIGURA 4.3 – Identificação dos solos ensaiados



FONTE: O autor

Durante a coleta, percebeu-se uma dificuldade de extrair amostras indeformadas em solos arenosos e pedregulhosos (casos dos solos 1 e 3). Após passar o horizonte superficial do solo, as amostras se desfaziam durante a cravação do anel. Foi possível obter as amostras apenas em um dia mais úmido, após uma chuva, provavelmente pelos efeitos de coesão aparente.

Nas amostras indeformadas dos três solos foram realizados ensaios físicos para sua classificação. A análise granulométrica foi composta pelos ensaios de peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação, conforme o determinado pela NBR 7181 ABNT (2016c). Foram realizados ensaios de limite de liquidez conforme a NBR 6459 ABNT (2016a) e limite de plasticidade, normatizado pela NBR 7180 ABNT (2016b). Realizou-se também, o ensaio de massa específica dos grãos, seguindo o determinado pela norma DNER - ME 093/1994 (DNER, 1994). Os solos em estudo foram classificados segundo o sistema unificado de classificação de solos (SUCS), consultado em Braja Das (2013).

As curvas granulométricas, os limites de Atterberg, a massa específica dos grãos e a classificação dos solos analisados são apresentados na seção 5.1.1.

#### 4.2.2 Ensaio de compactação

A determinação da curva de compactação em laboratório, maneira clássica de representar a relação do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) com o teor de umidade ( $w\%$ ), é realizada através do ensaio de Proctor, muito difundido no meio geotécnico. O ensaio Proctor Normal é normatizado pela NBR 7182 (ABNT, 2016d), sendo utilizado para verificação dos ramos seco e úmido e o ponto de máxima densidade.

Foram realizados ensaios de compactação nos três solos em estudo, determinando-se por interpolação os valores de máxima densidade. Os resultados do ensaio de compactação são apresentados na seção 5.1.2.

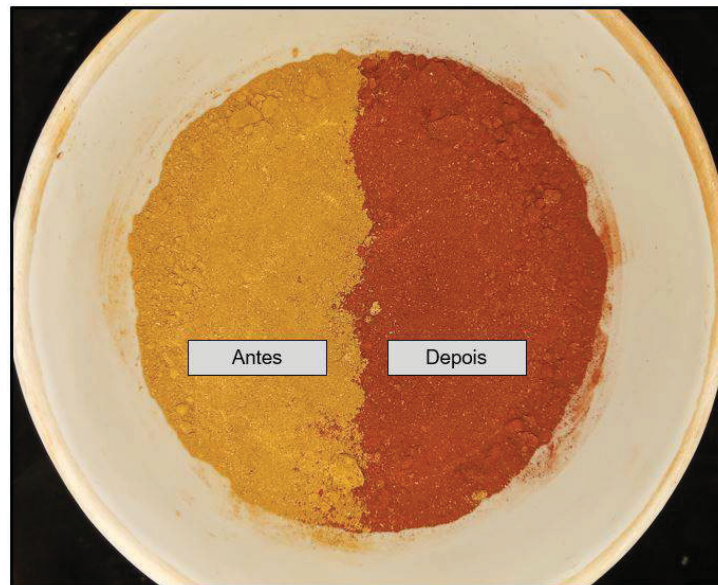
#### 4.2.3 Ensaio de dispersibilidade *crumb test* e ensaio de teor de matéria orgânica

Foram realizados ensaios de dispersibilidade *crumb test*, segundo procedimentos da NBR 13601 (ABNT, 2020). As análises ocorreram nos três tipos de solo investigados, em duas condições diferentes (totalizando 6 ensaios). Os torrões da condição indeformada foram talhados a partir de amostras de campo, enquanto que os torrões reconstituídos foram produzidos por aperto manual. Todas as amostras foram inseridas em um béquer com 200 ml de água destilada, sendo avaliado a sua dispersibilidade durante o período de 1 h. Os resultados dos ensaios realizados e o registro fotográfico das amostras são apresentados na seção 5.1.3.

Também foi realizado o ensaio de teor de matéria orgânica, indicando a quantidade de material de origem biológica presente no solos em estudo. O ensaio é normatizado pela NBR 13600 (ABNT, 1996). Os resultados do ensaio são apresentados na seção 5.1.

A Figura 4.4 exibe uma observação feita durante a execução do ensaio: a amostra de Solo 2 teve uma mudança de cor após o período de queima, passando de uma cor amarelada para vermelha. Essa mudança de cor pode ser explicada pela composição de argilominerais com presença de óxido de ferro neste solo, que alteram sua coloração em elevadas temperaturas.

FIGURA 4.4 – Mudança na tonalidade da amostra de Solo 2 submetida ao ensaio de teor de matéria orgânica



FONTE: O autor

#### 4.2.4 Ensaios de erodibilidade por metodologia MCT

Foram executados os ensaios de capilaridade e erodibilidade específica, conjunto de ensaios utilizado na classificação de erodibilidade MCT, propostos por Nogami e Villibor (1979). O ensaio de capilaridade ocorreu através de um equipamento composto por dois tubos graduados, com diâmetro interno de 1,128 cm. Esses tubos foram ligados com uma mangueira até uma base metálica, cilíndrica e aberta na parte superior, com um pequeno orifício na lateral onde era conectada a mangueira. A abertura superior da base metálica é de 4,3 cm (Figura 4.5).

FIGURA 4.5 – Equipamento utilizado nos ensaios de capilaridade



FONTE: O autor

O sistema foi cheio de água antes do início do ensaio, fluindo-se água pela extremidade do tubo graduado para eliminar bolhas de ar. A amostra de solo foi preparada através do rasamento de ambas as superfícies, anotando-se dimensões, massa do corpo de prova e teor de umidade.

Após a etapa de preparação, a amostra de solo foi posicionada na base metálica, com a e disparada do cronômetro. Foram realizadas leituras nos tempos de 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h.

Realizou-se também o ensaio de erodibilidade específica, utilizando-se amostras talhadas de 2,5 cm de altura. Foi inserido um papel filtro e uma pedra porosa na superfície talhada. Na sequência, foram posicionados um pedestal e uma cápsula metálica dentro de um recipiente cheio de água destilada para servir como consolo da amostra (A Figura 4.6 retrata o Solo 1 submetido ao ensaio). A amostra foi inserida cuidadosamente na água e ficou submersa por 8 h.

FIGURA 4.6 – Ensaio de erodibilidade específica



FONTE: O autor

Após o período, a cápsula com o material coletado foi cuidadosamente retirada da água e depois colocada em uma estufa, na temperatura de 100 °C por um período de 24 h.

Os resultados dos ensaios de capilaridade e erodibilidade específica, bem como o posicionamento dos solos dentro da classificação de erodibilidade MCT são apresentados na seção 5.1.4.

#### 4.2.5 Caracterização da espécie vegetal em estudo

O Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) foi a espécie selecionada para a confecção de amostras reconstituída com raízes. A planta é da família das gramíneas (*Poaceae*), herbácea, perene e cespitosa (encontrada em moitas). A planta é originária do sul e sudeste Asiático. Há relatos da utilização da espécie em mais de 120 países, concentrados nas zonas tropicais e subtropicais do planeta (GRIMSHAW, 2008; CHAVES; ANDRADE, 2013). Na Figura 4.7 (a) é apresentada um exemplar da planta desenvolvida.

Seu extensivo uso se dá pelas características morfológicas da planta, que possui um rápido crescimento, coroa abaixo da superfície (que garante resistência ao pisoteamento, fogo ou animais), tolerância a agentes químicos e grande quantidade de raízes. Outro ponto importante é o fato de possuir sementes estéreis, o que torna a planta uma espécie não invasora (CHAVES; ANDRADE, 2013).

Como limitação da espécie, pode-se citar como problema a intolerância ao sombreamento, necessitando contínua exposição ao sol e o fato da planta ser uma espécie exótica (BARBOSA, 2012; CHAVES; ANDRADE, 2013).

Tratando-se de uma espécie não nativa do Brasil, escolheu-se a pelas características biotécnicas da mesma, pelos relatos de aplicação em redução da erosão de taludes e devido a outros trabalhos brasileiros reportarem características físicas das raízes da planta no solo (p. ex. Orozco (2009), Souza et al. (2011), Barbosa (2012) e Miranda Neto e Mahler (2017)).

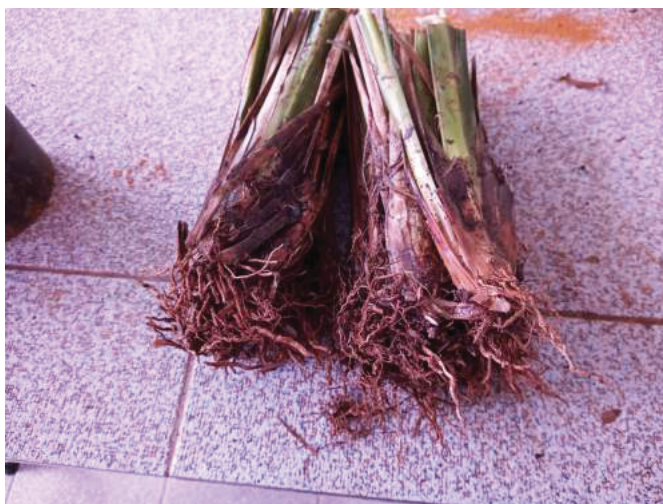
As mudas de Capim Vetiver foram adquiridas da empresa Alfa Proteção Ambiental, e foram entregues embaladas, na forma de touceiras com raízes limpas (lavadas) (Figura 4.7 (b)).

Assim que recebidas, as raízes das plantas foram extraídas com uma tesoura. As raízes foram secas por 24 h em uma estufa a 60 °C para uniformizar as condições de aplicação nos corpos de prova. Foi conduzido uma determinação de dimensões geométricas e o cálculo da massa específica das raízes

FIGURA 4.7 – Amostras de Capim Vetiver utilizadas nos ensaios e extração de raízes para a confecção de corpos de prova



(a) Espécie de Capim Vetiver bem desenvolvida



(b) Mudas adquiridas para a pesquisa

FONTE:(a) Chaves e Andrade (2013); (b) O autor.

A Tabela 4.2 apresenta a geometria, massa das raízes e densidade calculada, conjunto de propriedades determinados com um paquímetro e balança de precisão em laboratório. Os dados foram utilizados na confecção de corpos de prova com raízes.

TABELA 4.2 – Propriedades das raízes da espécie utilizada

| Item                              | Valor  | Unidade           |
|-----------------------------------|--------|-------------------|
| Massa de um conjunto de 10 raízes | 0,043  | g                 |
| Diâmetro médio                    | 0,72   | mm                |
| Comprimento médio                 | 22     | mm                |
| Massa específica da raiz          | 0,4792 | g/cm <sup>3</sup> |

A taxa de raízes é uma grandeza comumente utilizada para identificar a quantidade de raízes em cada corpo de prova, quando utilizados processos de reconstrução de amostras. Essa taxa é calculada pela Equação 4.1.

$$Tx(\%) = \frac{R \cdot A_r}{AA} \quad (4.1)$$

onde:  $Tx$  = taxa de raízes (%);  $R$  = quantidade aproximada de raízes;  $A_r$  = área de raízes (cm<sup>2</sup>);  $AA$  = área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>).

Com as propriedades da Tabela 4.2, foi possível definir as quantidades de raízes a serem aplicadas na reconstrução de amostras para ensaios de erosão Inderbitzen. Foram utilizadas duas quantidades: 0,5 g e 1 g de raízes. Esses teores conduzem a uma densidade radicular dentro do limite avaliado por De Baets et al. (2006) (de 0 a 4 kg/m<sup>3</sup>) e dentro da taxa de raízes utilizada nos trabalhos de Maffra (2018) e Venturini (2019), valores entre 0,19% e 1,5%.

Na Tabela 4.3 é exibida a nomenclatura usada nos corpos de prova com raízes, a massa de raízes aplicada e a quantidade aproximada em cada caso. A tabela apresenta a densidade radicular calculada em relação ao volume dos anéis utilizados para coleta de amostras indeformadas (Figura 4.14) e a taxa de raízes (Equação 4.1).

TABELA 4.3 – Definição das nomenclatura e quantidade de raízes aplicada nos corpos de prova reconstituídos

| Identificação | Massa de raízes | Qtde. aprox. de raízes | Densidade radicular*    | Taxa de raízes |
|---------------|-----------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| R05           | 0,5 g           | 120 raízes             | 1,409 kg/m <sup>3</sup> | 0,64%          |
| R10           | 1 g             | 240 raízes             | 2,819 kg/m <sup>3</sup> | 1,28 %         |

\*Massa de raízes por volume de corpo de prova.

O procedimento para produção dos corpos de prova com raízes é detalhado na seção 4.3.1. Na próxima seção (4.3), apresenta-se os detalhes da concepção e construção do equipamento utilizado nos ensaios de erosão.

### 4.3 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS INDERBITZEN

Escolheu-se o ensaio Inderbitzen como instrumento de avaliação quantitativa da erodibilidade do solo, pela suas vantagens, conforme levantamento de características e relatos da seção 2.3.1.

No presente trabalho, foram propostas algumas modificações para melhorar a medida da tensão cisalhante na amostra, bem como alterar a dinâmica do ensaio para facilitar a sua execução. As alterações principais consistem na utilização de um sensor de nível d'água próximo a amostra, um rotâmetro (medidor de vazão) digital posicionado no sistema de liberação do fluxo, um microcontrolador utilizado para automatizar a coleta de dados e um sistema de recirculação de água.

O equipamento utilizado foi projetado e construído durante a realização do trabalho. A montagem do equipamento para a realização dos ensaios demandou vários testes e experimentos, de forma a se corrigir erros e problemas e aferir o sistema, até se chegar no aparelho utilizado. A Figura 4.8 exibe uma imagem do equipamento desenvolvido durante a realização de um dos ensaios.

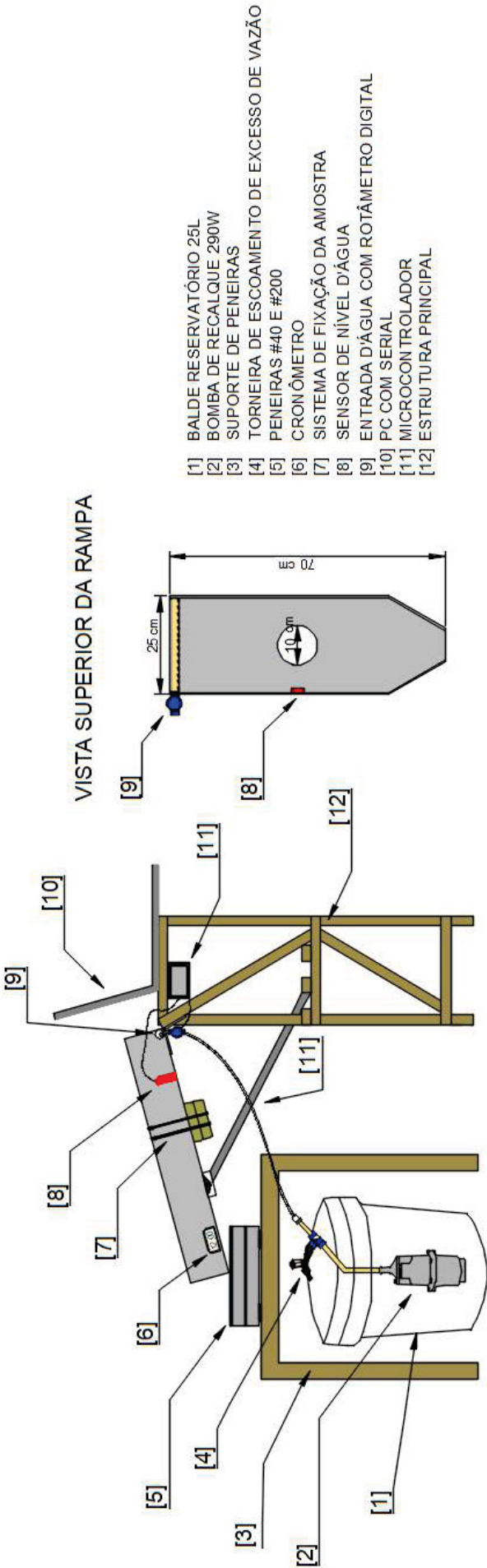
FIGURA 4.8 – Imagem do equipamento utilizado nos ensaios Inderbitzen



FONTE: O autor

A Figura 4.9 ilustra de forma esquemática os detalhes do equipamento desenvolvido. Na sequência, são comentados os principais elementos que constituem o equipamento, relatando as características e principais pontos observados.

FIGURA 4.9 – Esquema do ensaio Inderbitzen com as modificações propostas neste trabalho



FONTE: O autor

A **estrutura principal** é constituída de uma torre de madeira de 80 cm de altura, que serve de apoio para uma calha de aço galvanizado, com dimensões semelhantes as do ensaio original de Inderbitzen (1961). A calha possui 70 cm de comprimento, 25 cm de largura, 10 cm de altura e um chanfro de 60° na parte final, como observa-se na Figura 4.9. O movimento da calha é realizado através de uma dobradiça instalada entre calha e torre de madeira e um tubo de aço de perfil quadrado rotulado no contato com a calha e apoiado em um espécie de trilho dentado, que permite diferentes inclinações.

No ensaio original de Inderbitzen (1961), o anel possui aproximadamente 15,2 cm (6") de diâmetro interno e altura. Alguns outros pesquisadores utilizam anéis de 10 cm (p. ex. Chamecki (2002) e Venturini (2019)). No presente trabalho, utilizou-se de anéis de diâmetro interno de 9,7 cm e um fuste na rampa de 10 cm de diâmetro.

A **tubulação hidráulica** consiste de um tubo de 20 cm de diâmetro, com furos de 6 mm em todo o seu comprimento, com extensão de furos equivalente a largura da calha. O tubo é conectado a um joelho roscável 1/2 pol de diâmetro, com um rotâmetro digital instalado na rosca do joelho. Completa o sistema um tubo flexível que faz a ligação com a tubulação da bomba d'água.

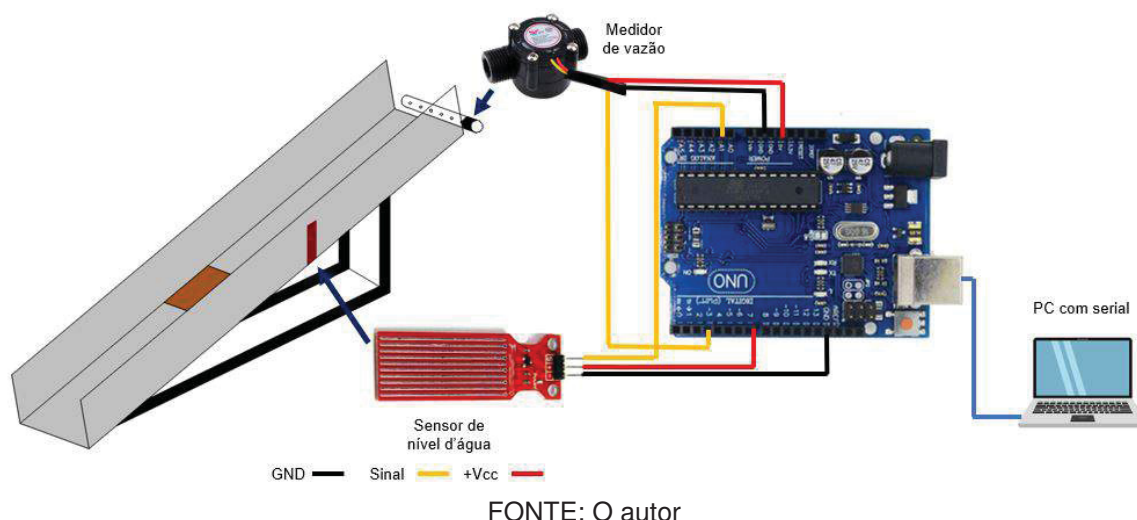
De maneira a se reduzir a quantidade de água utilizada no ensaio, dado a crise hídrica que ocorreu no ano de 2020 na região de Curitiba-PR, optou-se por utilizar um sistema de recirculação de água para a realização dos ensaios. O **reservatório** do equipamento é composto por um balde de 25 l, com uma bomba de recalque submersa de 290 W de potência e 127 V. Essa bomba é utilizada em poços freáticos e possui um recalque de até 30 l/min para a pressão existente no balde. Um conjunto de duas torneiras foi instalado logo na saída da bomba, com bicos voltados para o próprio reservatório. O objetivo foi controlar a vazão, obtendo-se valores menores para as torneiras totalmente abertas e valores altos para as torneiras fechadas.

O sistema de recirculação permitiu tornar a execução dos ensaios mais ágil, visto que era apenas necessário o reservatório estar com água, sem necessitar da rede de abastecimento. Como a bomba tem baixa variação de vazão, a manutenção da vazão estipulada durante todo o ensaio foi facilitada.

Esse método de recirculação tem como desvantagem a mistura de finos do solo na água do reservatório. O material fino da amostra que não é coletado na peneira acaba sendo enviado novamente através da bomba. Como maneira de contornar a desvantagem, a água do reservatório foi substituída sempre que atingia uma turbidez elevada, identificada de maneira visual.

O **sistema eletrônico** construído é composto por um rotâmetro e um medidor de nível d'água. Uma esquematização com as ligações eletrônicas é apresentada na Figura 4.10. Ambos os sensores são ligados a um microcontrolador Arduino<sup>1</sup>, com registros obtidos por serial de computador. O código criado para possibilitar as leituras do equipamento consta no Apêndice A.

FIGURA 4.10 – Ligações eletrônicas dos equipamentos utilizados para aumentar a acurácia de resultados



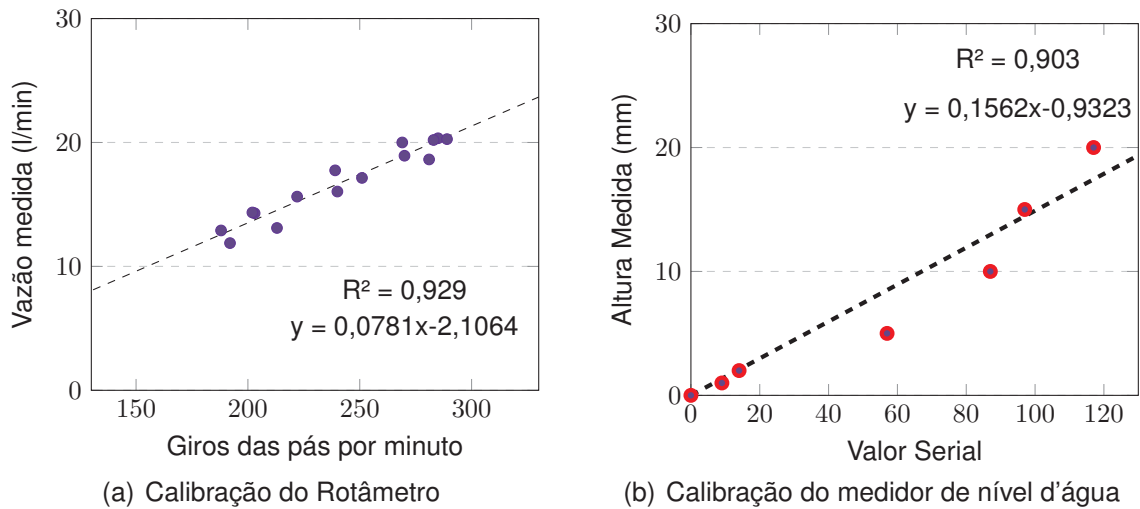
O rotâmetro é uma peça instalada na tubulação, contendo pás internas em formato radial, cuja vazão é medida pela contagem eletrônica dos giros das pás por unidade de tempo. O equipamento tem capacidade de registrar de 1 a 30 l/min. O medidor de nível d'água mede a resistência elétrica no seu corpo, que varia conforme a submersão do equipamento em água.

Os dois sensores foram calibrados antes das realizações dos ensaios. A calibração do rotâmetro ocorreu com variações na vazão enviada pela bomba e medidas de tempo necessário para encher um recipiente de 2 litros, anotando-se também o valor obtido com o sensor. A calibração do sensor de nível d'água ocorreu com um copo, onde foi colocada uma régua graduada e mergulhado o sensor, comparando-se o valor visual da régua com a leitura do serial.

As curvas de calibração de ambos os equipamentos são exibidas na Figura 4.11. A Figura 4.11 (a) exibe a calibração do giro de pás detectada pelo microcontrolador e a vazão medida utilizando um recipiente e cronômetro e a Figura 4.11 (b) apresenta a curva resistência por medidas observadas na régua.

<sup>1</sup> Plataforma de hardware livre e aberto, projetada com um microcontrolador. As placas Arduino funcionam como um pequeno computador, no qual pode-se programar a maneira como os diversos componentes de entrada possíveis se comportam e obter um registro de dados de saída.

FIGURA 4.11 – Calibrações dos equipamentos de medição



FONTE: O autor

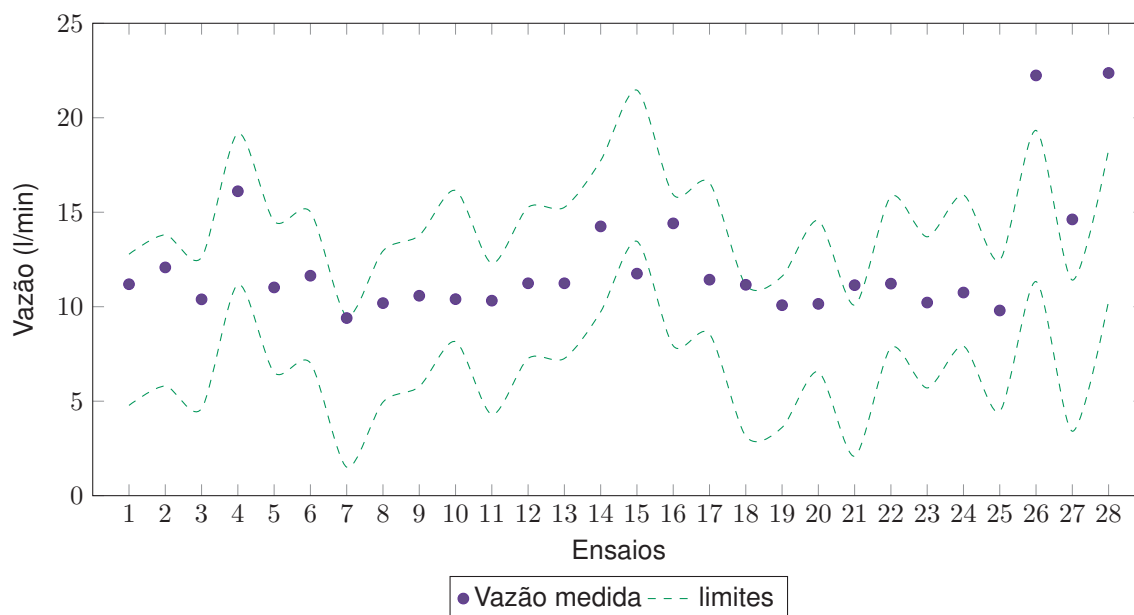
Para corroborar as medidas eletrônicas de nível d'água, uma régua foi instalada na lateral da calha, para verificação visual da altura. Além dessa verificação, com os registros de vazão e altura durante os ensaios, foi possível verificar a assertividade do equipamento através de um cálculo de vazão teórica e comparação com a medida pelo rotâmetro. Essa vazão teórica foi calculada com a altura dada pelo medidor de nível d'água, inserindo o valor obtido na equação de Manning-Strickler. A formulação utilizada para a verificação é apresentada na Equação 4.2.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot \frac{b \cdot h_m}{b + 2 \cdot h_m}^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (4.2)$$

onde:  $Q$  = vazão;  $n$  = coeficiente de rugosidade (utilizado 0,010 para calhas de aço galvanizado (PORTO, 2006));  $b$  = largura da calha (24,6 cm);  $h_m$  = altura medida pelo sensor de NA;  $\frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h}$  = raio hidráulico, divisão da área pelo perímetro molhado;  $I$  = inclinação.

Foram realizados 28 ensaios Inderbitzen com o equipamento. Um gráfico da relação entre a vazão medida e o intervalo de dados aceitável em cada ensaio é apresentado na Figura 4.12. Em virtude das simplificações de cálculo na Equação de Manning-Strickler, da pequena escala do canal, da medição do rotâmetro realizada em tubo fechado e comparado com canal aberto e perdas de carga entre tubulação e rampa, a forma de aferição com vazão teórica tem baixa precisão. Dessa forma, definiu-se arbitrariamente um intervalo de 4 l/min para mais ou para menos como aceitável, representado pelas linhas verdes na Figura 4.12.

FIGURA 4.12 – Vazões medidas e calculadas na realização dos ensaios



FONTE: O autor

Observa-se que os valores medidos ficaram dentro do intervalo de erro proposto em quase todos os casos. Apenas na realização de ensaios com maiores vazões (três últimos pontos da Figura 4.12), houve uma maior discrepância. Isso pode ser explicado pela maior turbulência na rampa causada pela grande vazão, não tornando válido o cálculo da vazão pela fórmula de verificação proposta.

A **coleta de material erodido** foi realizada com um pedestal para acoplamento de um conjunto de peneiras na saída de água da calha. Utilizou-se um conjunto de 5 pares de peneiras de abertura #40 (0,42 mm) e #200 (0,075 mm). As peneiras foram substituídas nos tempos de 2 min, 4 min, 6 min e 10 min, com tempo total de ensaio de 18 min.

O **acoplamento da amostra** foi um dos pontos de maior dificuldade na concepção do equipamento. Como optou-se pelo uso de tubos PVC para retirada de amostras, a vedação entre calha e corpo de prova necessitou ser realizada no contato, com a pressão de fixação do corpo de prova e materiais vedantes. A fixação da amostra foi feita com uma corda flexível, fixada na rampa em cortes feitos na lateral da calha. Percebeu-se que quanto mais tensionada a corda, melhor a vedação contra água, tendo como ponto negativo a deformação e abaulamento da calha, reduzindo a altura de água no corpo de prova em relação ao medido no sensor. Por esse motivo, optou-se por uma tensão baixa na corda.

Vários materiais foram utilizados para a vedação. Testou-se o uso de massa de calafetar, fita dupla face, silicone, epóxi e tinta hidrófuga. Obteve-se melhores resultados com a aplicação de silicone na parte superior do anel com a amostra e colagem na

calha. Porém, o procedimento precisava ser feito 30 min antes da realização do ensaio, para secagem. O silicone do ensaio anterior precisava ser completamente removido para a fixação do próximo corpo de prova.

No geral, a produção do equipamento necessitou vários testes e adequações. Os principais pontos da concepção, problemas encontrados e testes foram sumarizados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Problemas e situações encontradas na montagem e execução dos ensaios e providências tomadas

| Ocorrência                                                               | Providência tomada                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dificuldades no acoplamento da amostra.                                  | Utilização de silicone para colagem, com tempo de secagem de 30 min.                                                                  |
| Resquícios de silicone na rampa após o fim de cada ensaio.               | Raspagem com faca e limpeza da rampa após cada ensaio.                                                                                |
| Excesso de turbidez da água.                                             | Medidas de densidade da água no balde com densímetro e troca da água após 3 ou 4 ensaios.                                             |
| Vazão muito alta.                                                        | Colocação de torneiras próximas a bomba, para controlar a vazão através da abertura das mesmas.                                       |
| Vibração da bomba.                                                       | Adoção de uma mangueira flexível entre tubulação da bomba e entrada de água na rampa, para compensar deslocamentos do reservatório.   |
| Excesso de consumo de água.                                              | Utilização de sistema de recirculação de água, com bomba e reservatório após as peneiras.                                             |
| Conjunto de peneiras insuficiente para trocas a cada 2 min.              | Troca de peneiras em intervalos diferentes, sendo a 2 min, 4 min, 6 min e 10 min.                                                     |
| Turbulências em grandes inclinações.                                     | Limitação da realização de ensaios em inclinações de 4° a 15°.                                                                        |
| Inclinações na rampa transversal ao fluxo.                               | Correção do alinhamento com calços na parte superior e nivelamento prévio a cada ensaio.                                              |
| Medidas de nível de água imprecisas.                                     | Utilização de valores dados pelo sensor nos primeiros minutos de ensaio, devido a erros de medida com o aumento de umidade no sensor. |
| Sensor de NA indicando valor mesmo após o fim do fluxo de água na rampa. | Secagem do sensor com papel-toalha após a realização de cada ensaio.                                                                  |

#### 4.3.1 Procedimentos para produção de corpos de prova e ensaios

Para a realização dos ensaios Inderbitzen, foram utilizados três tipos de corpos de prova: extraídos em campo de forma indeformada (**I**); reconstituído por compactação estática (**R**) e reconstituído e compactado com adição de raízes (**R05** e **R10**).

Para o preparo de **amostras indeformadas (I)**, os seguintes passos foram empregados:

- Extração de amostras com anéis cilíndricos cravados no solo da região a 10 cm de profundidade. Os anéis de coleta utilizados foram tubos PVC de parede grossa, com diâmetro externo de 10 cm e diâmetro interno de 9,7 cm, com altura de 4,7 cm. As amostras foram extraídas do talude com o auxílio de facas. Cortou-se um tamanho maior de que o tubo da amostra, com o objetivo de evitar perda de umidade e garantir a integridade da amostra;
- Alocação das amostras em uma caixa de isopor, com papel filme enrolado na amostra para evitar perda de umidade e transporte de amostras para o laboratório;
- Talhamento da amostra e rasamento nas dimensões do anel com o auxílio de facas;
- Coleta da massa da amostra + anel de PVC e coleta do teor de umidade; e
- Colagem da amostra na rampa do ensaio Inderbitzen com o auxílio de cola silicone;
- Início do ensaio 30 minutos após a colagem.

A obtenção da massa específica dos corpos de prova foi completa com a determinação da massa do anel após o ensaio. Determinou-se também o teor de umidade final da amostra, alterado pela infiltração de água durante o ensaio.

Para a produção de corpos de prova reconstituídos, foram necessários cálculos para a determinação de peso específico, teor de umidade e quantidade de raízes a ser adicionada. Buscou-se simular uma condição de aterro real nos ensaios. Com isso, o teor de umidade e peso específico determinado foi semelhante ao obtido com o ensaio de compactação (resultados apresentados na seção 5.1.2).

Um resumo dos parâmetros utilizados nos casos **R**, **R05** e **R10** é apresentado na Tabela 4.5. Para os casos reconstituídos, não foram produzidas amostras com o Solo 3, devido à distribuição granulométrica do mesmo estar concentrada na fração de pedregulho, que dificulta a compactação.

TABELA 4.5 – Resumo dos parâmetros utilizados para a confecção dos corpos de prova reconstituídos

|                                       | Solo 1                 | Solo 2                 |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Teor de umidade alvo                  | 13,80%                 | 29,80%                 |
| Massa específica aparente seca alvo   | 1,82 g/cm <sup>3</sup> | 1,34 g/cm <sup>3</sup> |
| Massa teórica de um corpo de prova    | 640,26 g               | 475,31 g               |
| Massa de solo seco, com 10% de perdas | 562,62 g               | 366,19 g               |
| Massa de raízes                       | 0,5 g                  | 1 g                    |

Considerando os parâmetros apresentados, no caso das **amostras reconstituídas (R)** compactadas estaticamente, o seguinte procedimento foi empregado:

- Coleta de amostra deformada em campo com auxílio de sacos e bombonas;
- Passagem na peneira #4 (4,75 mm), destorroamento de parte da amostra e disposição no exterior para secagem ao ar;
- Separação da quantidade de material para a produção de 1 corpo de prova. Adição de água necessária para atingir o teor de umidade ótimo de compactação;
- Montagem da prensa para compactação estática (Figura 4.14), com a disposição de dois anéis de PVC empilhados e da prensa;
- Prensagem até a altura correspondente ao peso específico máximo obtido no ensaio de Proctor;
- Coleta da massa da amostra + anel de PVC e coleta do teor de umidade;
- Colagem da amostra na rampa do ensaio Inderbitzen com o auxílio de silicone e início do ensaio 30 minutos após a colagem.

O equipamento utilizado para a confecção de amostras compactadas estaticamente é exibido na Figura 4.13. O procedimento empregado foi a alocação do solo preparado em dois anéis, posicionamento de peça de ferro de contato, demarcação na peça da altura desejada e movimentação até a altura correspondente a densidade especificada.

FIGURA 4.13 – Equipamento utilizado para compactação estática e produção dos corpos de prova



FONTE: O autor

Por fim, utilizando parâmetros da Tabela 4.3 e Tabela 4.5, as **amostras com raízes (R05 e R10)** de Capim Vetiver foram produzidas através do seguinte procedimento:

- Corte de raízes das mudas de Capim Vetiver adquiridas, com secagem em estufa a 60° C por 24 horas para uniformização da massa;
- Determinação das dimensões de um grupo de 10 raízes aleatoriamente selecionadas;
- Pesagem da quantidade estipulada de raízes;
- Separação da quantidade de material para a produção de um corpo de prova. Adição de água necessária para atingir o teor de umidade ótimo de compactação;
- Mistura de raízes ao solo úmido e homogeneização;
- Montagem da prensa para compactação estática (Figura 4.14), com a disposição de dois anéis de PVC empilhados e da prensa;
- Prensagem até a altura correspondente ao peso específico máximo obtido no ensaio de Proctor;
- Coleta da massa da amostra + anel de PVC e coleta do teor de umidade;
- Colagem da amostra na rampa do ensaio Inderbitzen com o auxílio de silicone e início do ensaio 30 minutos após a colagem.

Produziu-se um total de 18 corpos de prova reconstituídos. A condição obtida na reconstrução, de fibras aleatórias e previamente secas, possui diferenças para a condição *in situ*. Porém, este processo facilita a uniformidade e reduz a variabilidade entre corpos de prova de mesma característica. Na Figura 4.14, apresenta-se exemplos de corpos de prova produzidos através da metodologia descrita, tanto para amostras indeformadas quanto para reconstituídas.

FIGURA 4.14 – Exemplos de amostras indeformadas e reconstituídas produzidas para os ensaios Inderbitzen



(a) Amostras indeformadas

(b) Amostras reconstituídas com raízes

FONTE: O autor

Os procedimentos utilizados para a realização do ensaio Inderbitzen também consistem em uma sequência de etapas, com descrição realizada nos itens abaixo. A sequência é ilustrada visualmente na Figura 4.15.

- Preparação do equipamento com a inclinação desejada e posicionamento na base do conjunto de peneiras e recipiente de coleta d'água. O corpo de prova preparado era colado a rampa 30 minutos antes do início do ensaio;
- Umedecimento da rampa para evitar maior resistência, seguido de um cobrimento com filme plástico fixado nas extremidades superior e inferior com uma fita adesiva;
- Acionamento da bomba, do medidor de altura e do rotâmetro digital, sendo estes dois últimos conectados a um computador para coleta de dados;
- Retirada do filme plástico com a estabilização da vazão e acionamento do cronômetro, dando início ao ensaio;
- Substituição do conjunto de peneira por outra em tempos previamente estabelecidos (2 min, 4 min, 6 min e 10 min, finalizando o ensaio em 18 min);
- Desligamento do sistema de escoamento. Transferência de parte do material que restou no anel para uma cápsula e para secagem em estufa e determinação do teor de umidade;
- Retirada do material coletado em cada peneira e transferência para um recipiente de porcelana, destacando o material através de esborrifamento de água;
- Secagem do conjunto de recipientes em estufa por 24 horas;
- Pesagem dos recipientes com material erodido seco e recipiente vazio, para determinação da massa de material desprendido através da diferença.

FIGURA 4.15 – Procedimento utilizado nos ensaios de erosão direta tipo Inderbitzen



(a) Posicionamento do corpo de prova na rampa e colagem com silicone



(b) Preparo do equipamento



(c) Umedecimento e colocação de fita e papel filme na rampa e ajuste da vazão



(d) Início do fluxo de água e disparo do cronômetro



(e) Troca de Peneiras



(f) Coleta de teor de umidade final e material desagregado pela água infiltrada



(g) Retirada de material coletado nas peneiras por aspergimento de água e coleta de material úmido em potes de porcelana



(h) Secagem do material em estufa



(i) Pesagem do material seco e das cápsulas

FONTE: O autor

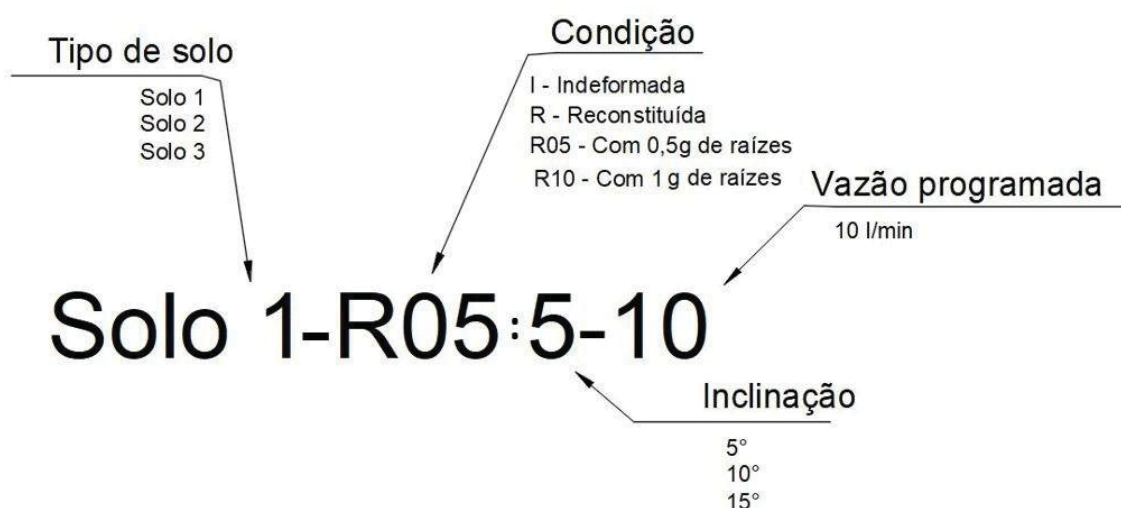
Foram utilizadas inclinações de 5°, 10° e 15° nos ensaios, com vazão de 10 l/min em 24 dos 28 ensaios realizados. A inclinação de 15° foi considerada como limite no equipamento, de forma a se ter um ensaio com baixa turbulência na água. A vazão foi escolhida como forma a gerar uma lâmina detectável com o sistema eletrônico, tendo

valor semelhante as utilizadas nos trabalhos de Ghebreiyessus et al. (1994) e De Baets et al. (2006). O uso de maiores inclinações ou menores vazões implicaria em pequenas lâminas d'água, dificilmente detectadas pelo sistema eletrônico desenvolvido.

Para testar um limite maior do equipamento, considerando também que o Solo 3 apresentava uma baixa erodibilidade nos ensaios qualitativos, realizou-se os ensaios no Solo 3 com maiores vazões e tensões hidráulicas. Foi aplicado ao solo uma inclinação de 25° e vazão de 20 l/min, considerados valores limites do equipamento.

Para apresentação dos resultados, adotou-se uma nomenclatura para identificação de cada ensaio Inderbitzen realizado, identificando o tipo de solo, condição, inclinação e vazão. A Figura 4.16 exibe um exemplo da nomenclatura utilizada e a descrição, apontando cada caso possível dentro da identificação.

FIGURA 4.16 – Exemplo da nomenclatura utilizada para identificar os corpos de prova no ensaio



FONTE: O autor

Na Tabela 4.6 é exibido um resumo de todos os ensaios realizados e condições aplicadas em cada tipo de solo.

TABELA 4.6 – Resumo dos tipos e condições aplicadas nos ensaios Inderbitzen

| Solo   | Condições avaliadas | Inclinações   | Total de ensaios |
|--------|---------------------|---------------|------------------|
| Solo 1 | I, R, R05 e R10     | 5°, 10°, 15°  | 12               |
| Solo 2 | I, R, R05 e R10     | 5°, 10°, 15°  | 13               |
| Solo 3 | I                   | 10°, 15°, 25° | 3                |

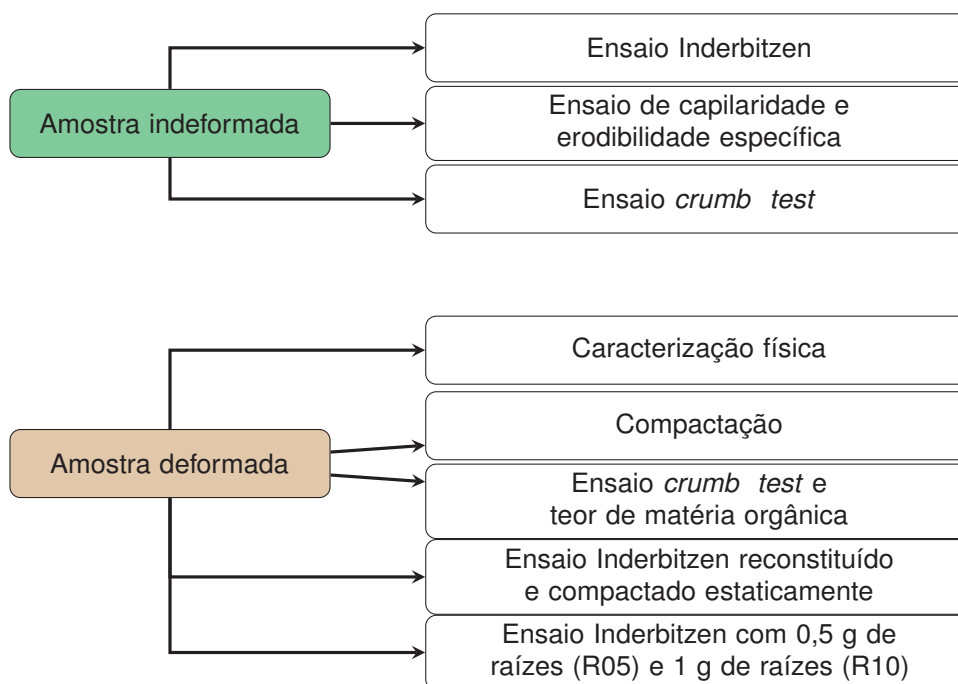
Os resultados dos ensaios Inderbitzen são apresentados na seção 5.2. Um exemplo de tabela utilizada na realização dos ensaios, para anotação e cálculo de parâmetros, é exibido no Apêndice B.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos durante a pesquisa e uma avaliação das relações investigadas. A seção 5.1 e 5.2 exibem os resultados e realizam uma análise da etapa laboratorial. Na seção 5.3 é apresentada a aplicação da metodologia de avaliação de erodibilidade proposta e o detalhamento da solução em Engenharia Natural para o canal em estudo.

A Figura 5.1 apresenta uma síntese dos ensaios executados em cada tipo de amostra, com procedimentos discutidos no Capítulo 4.

FIGURA 5.1 – Síntese dos ensaios realizados em cada tipo de amostra



FONTE: O autor

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO, COMPACTAÇÃO E ENSAIOS QUALITATIVOS DE EROSÃO

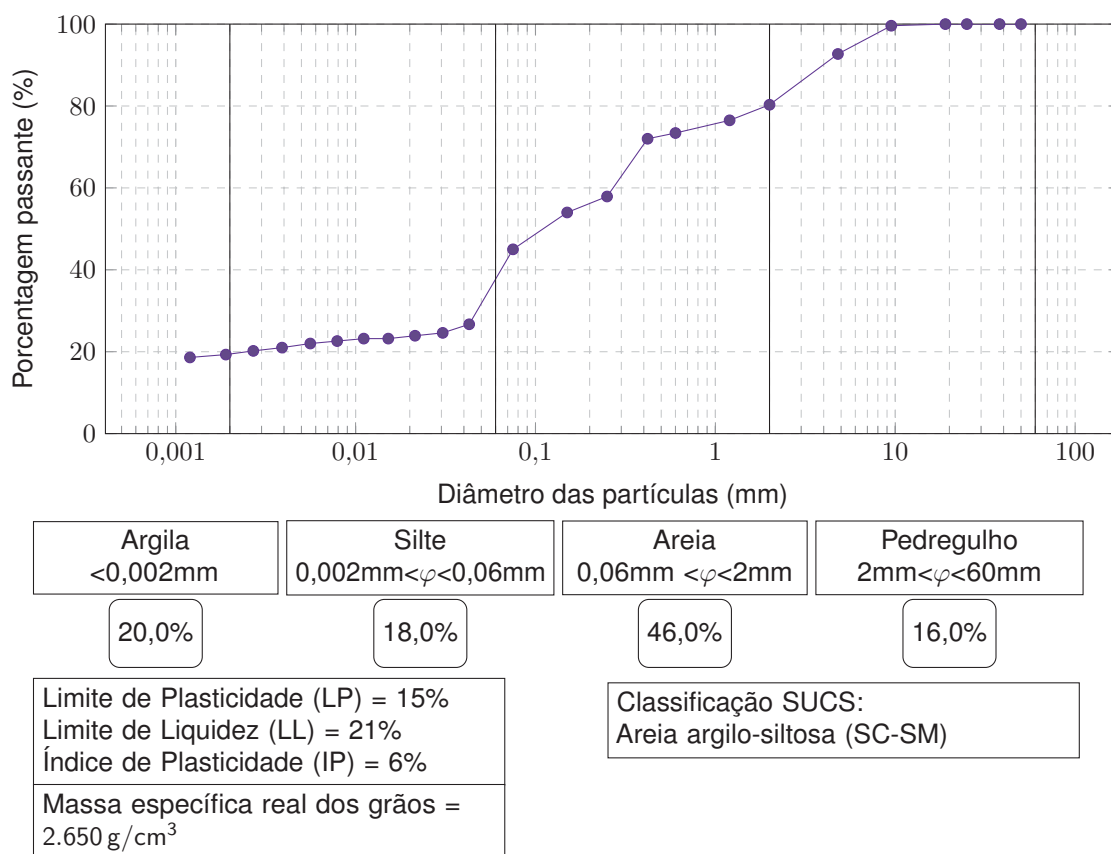
Os resultados dos ensaios de caracterização física, compactação, *crumb test* e metodologia MCT são apresentados nessa seção.

#### 5.1.1 Caracterização do solo

Três solos distintos encontrados na região do canal foram ensaiados. Os solos receberam uma nomenclatura para fins de identificação, conforme Figura 4.3, sendo referidos como Solo 1 (arenoso), Solo 2 (argiloso) e Solo 3 (pedregulhoso).

A Figura 5.2 apresenta os resultados da caracterização do Solo 1. O solo ensaiado possui granulometria bem distribuída, com grãos predominantemente concentrados na faixa de areia (46%), mas com presença de argila, silte e pedregulho. O índice de plasticidade do solo é baixo (6%) e massa específica dos grãos é de 2,650 g/cm<sup>3</sup>. O solo é classificado como areia argilo-siltosa (SC-SM) no Sistema Unificado de classificação de solos (SUCS).

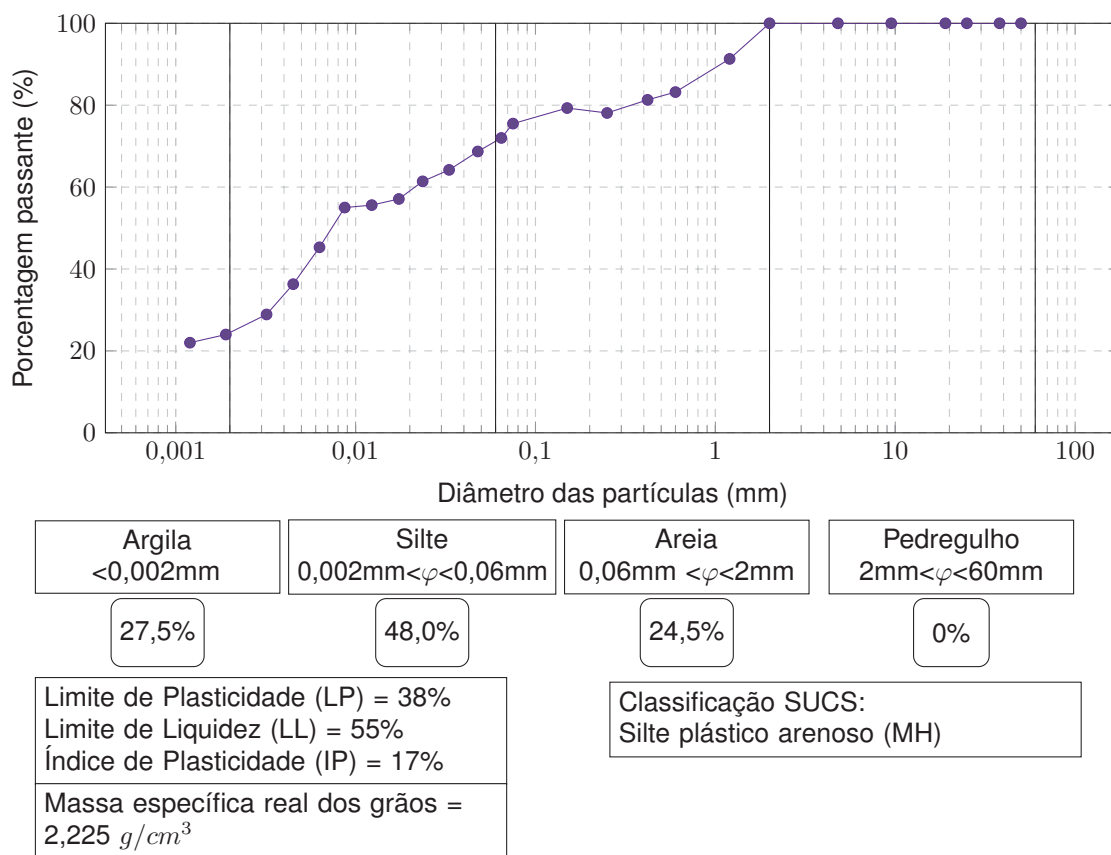
FIGURA 5.2 – Caracterização e classificação do Solo 1



FONTE: O autor

Na Figura 5.3 é apresentada a curva granulométrica e demais resultados da caracterização do Solo 2. Trata-se de um solo fino de alta plasticidade, classificado pelas letras MH (silte inorgânico de alta plasticidade) no SUCS. O solo contém 27,5% de argila e Índice de Plasticidade de 17%, com uma baixa massa específica real dos grãos: 2,225 g/cm<sup>3</sup>. Conforme a definição de atividade coloidal de Skempton (1953), a divisão do Índice de Plasticidade pela porcentagem de argila resulta em 0,6182, indicando uma argila inativa (IP/argila(%) < 0,75).

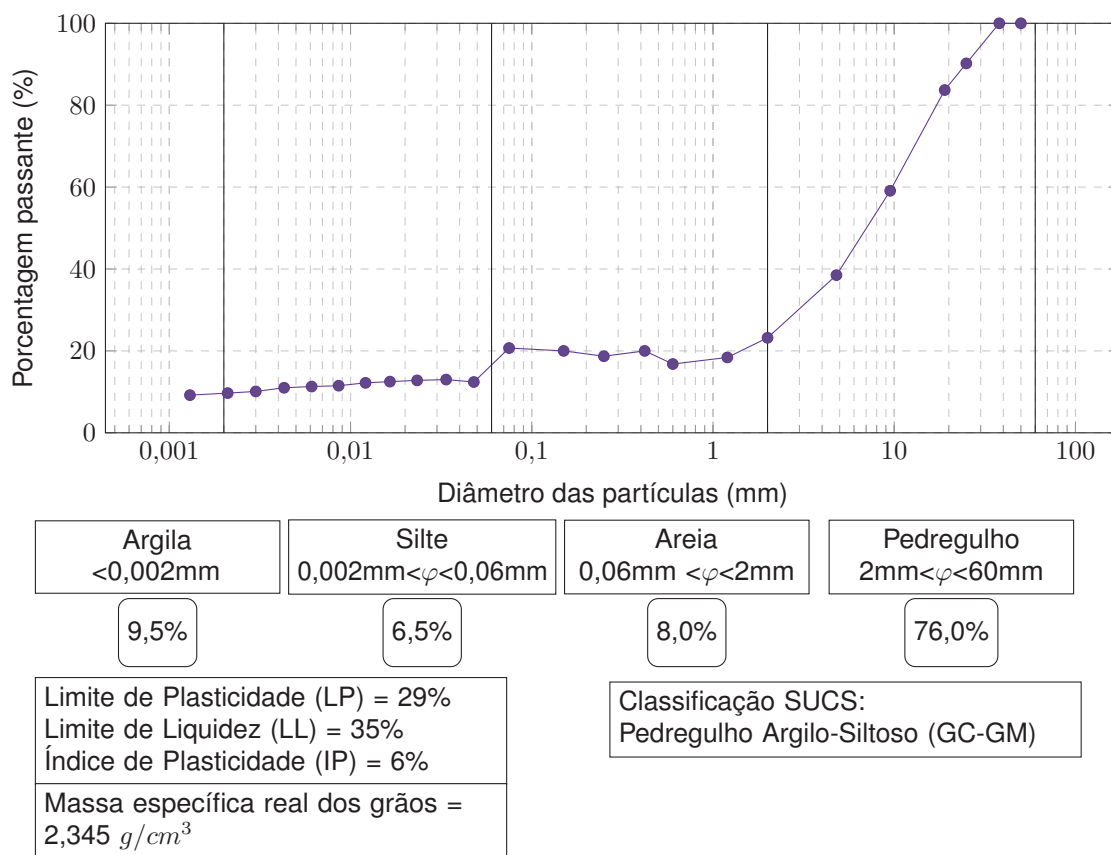
FIGURA 5.3 – Caracterização e classificação do Solo 2



FONTE: O autor

Os resultados da caracterização do Solo 3 estão apresentados na Figura 5.4. Este solo foi coletado em uma região rompida do canal e apresenta uma considerável parcela de partículas grossas: 76% de pedregulho. A granulação do solo é uniforme e os limites de Atterberg da fração passante na peneira 0,42 mm indicam um solo com índice de plasticidade baixo (6%). O Solo 3 tem massa específica real dos grãos de  $2,345 \text{ g/cm}^3$ , seguindo os critérios da DNER - ME 093/1994 (DNER, 1994), que considera apenas a fração passante na peneira #4.

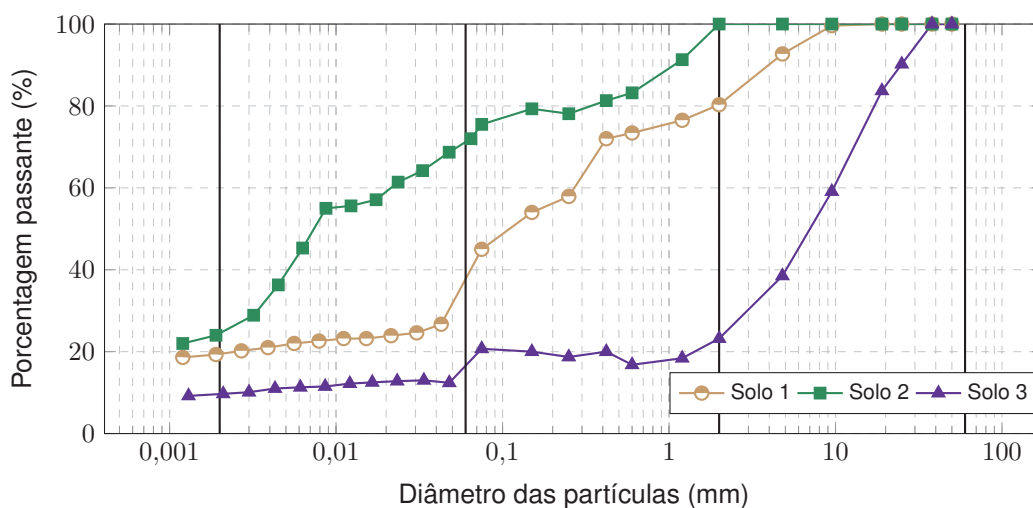
FIGURA 5.4 – Caracterização e classificação do Solo 3



FONTE: O autor

As três curvas granulométricas foram plotadas em um mesmo gráfico para fins de comparação, apresentado na Figura 5.5. Apesar dos solos terem sido coletados no mesmo canal, em locais próximos entre si, percebe-se as diferenças nas granulometrias dos três solos. O resultado indica que existe uma variabilidade grande nos depósitos naturais e possíveis aterros de solos que formam o canal.

FIGURA 5.5 – Comparativo entre curvas granulométricas dos três solos analisados

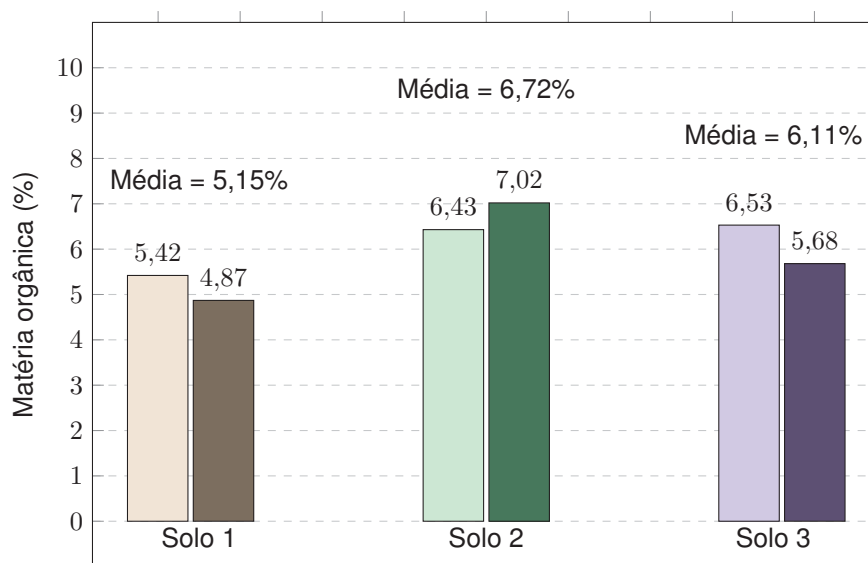


FONTE: O autor

Para os três solos em análise, foi determinado a porcentagem de matéria orgânica presente na composição, conforme descrito na seção 4.2.3. Foram realizadas duas amostragens em cada caso.

Na Figura 5.6 é apresentado os resultados do ensaio realizado. Para cada caso, são exibidas duas colunas referentes a cada amostra ensaiada e o valor médio de matéria orgânica.

FIGURA 5.6 – Resultados do ensaio de teor de matéria orgânica



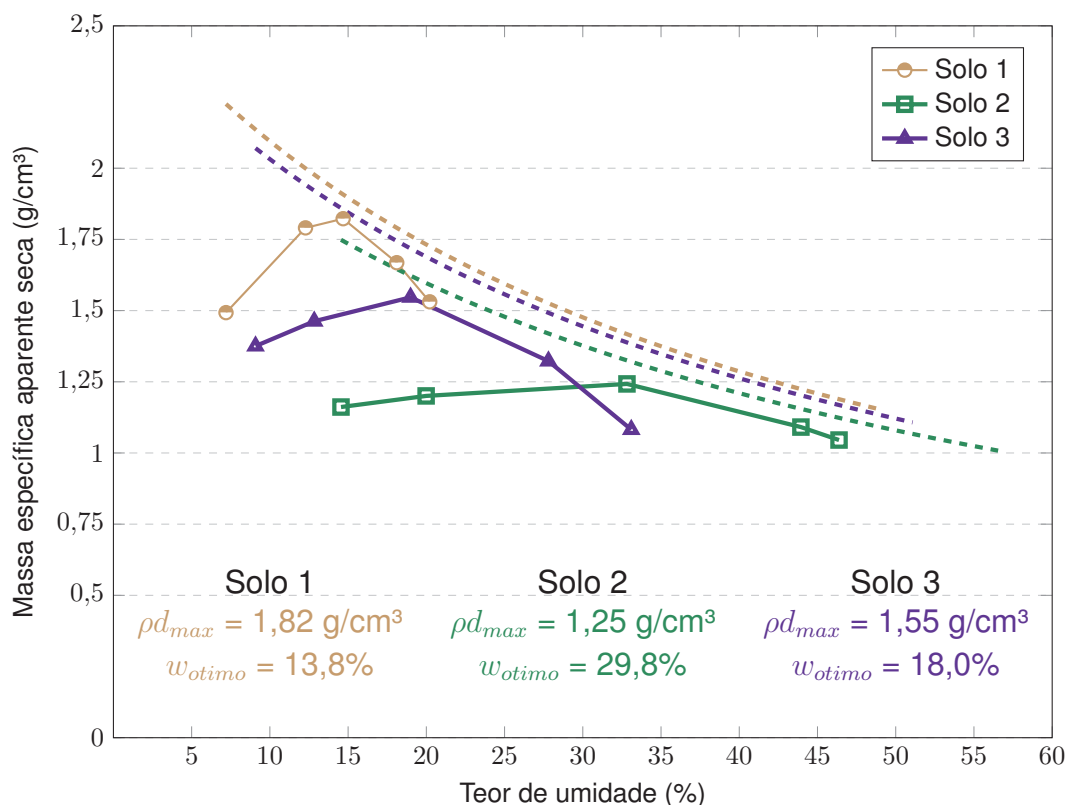
FONTE: O autor

Pode-se observar que os solos contêm um alto teor de matéria orgânica. Em todas as amostras obteve-se um teor superior a 4,87%. Os Solos 2 e 3 são os que contêm maiores teores médios, com 6,72% e 6,11%, respectivamente. Como os solos foram coletados a 10 cm de profundidade, esses resultados eram esperados, visto que há uma maior concentração de matéria vegetal na superfície.

#### 5.1.2 Ensaio de compactação

Conforme descrito na seção 4.2.2, realizou-se ensaios de compactação com energia de Proctor Normal nos solos avaliados. A Figura 5.7 exibe a curva de compactação obtida para os três solos.

FIGURA 5.7 – Curvas de compactação dos solos ensaiados



FONTE: O autor

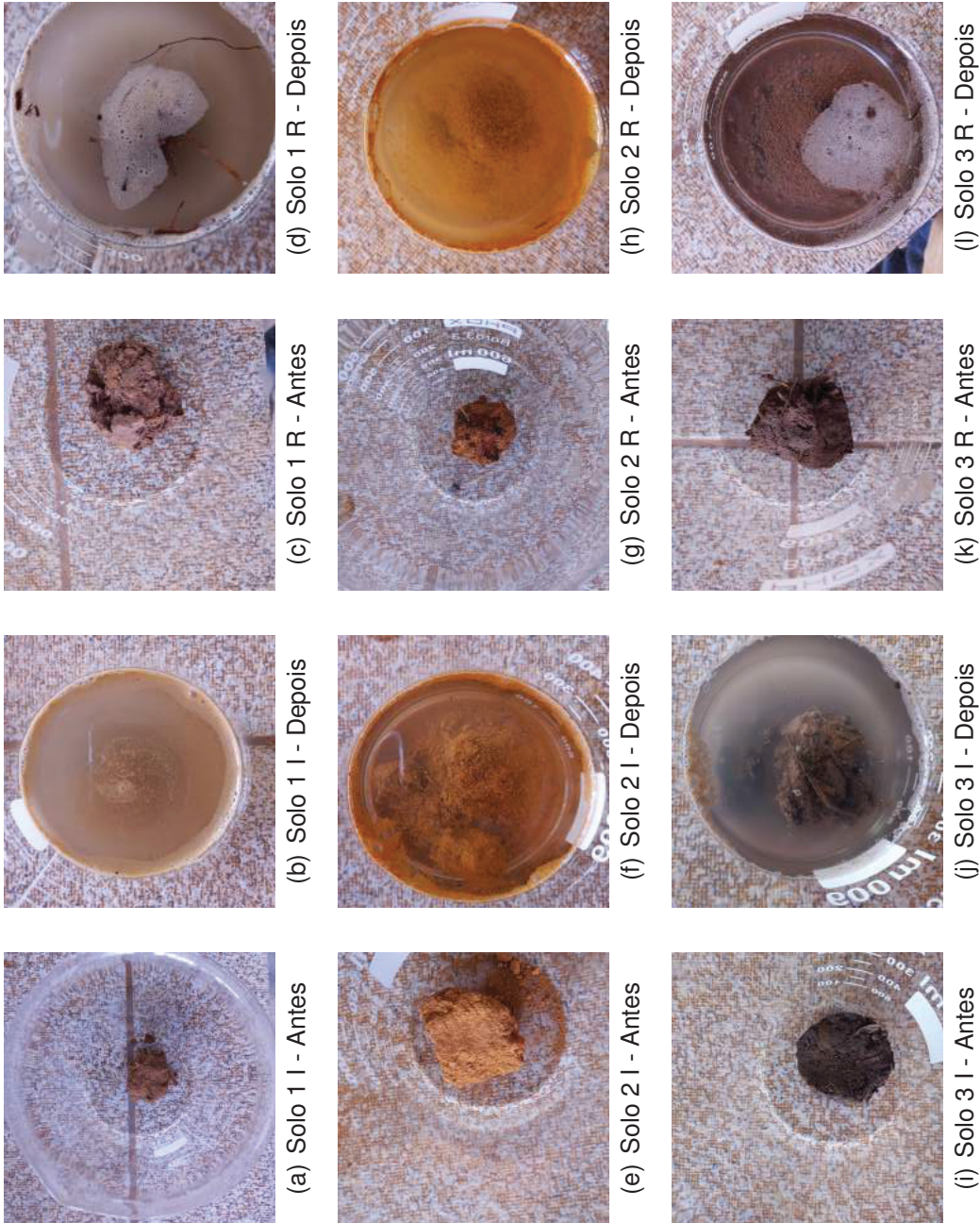
Os resultados indicam que o Solo 1 possui uma facilidade maior para se compactar, com massa específica aparente seca alta (1,82 g/cm³). O Solo 2 possui uma curva de compactação de tendência horizontal, com massa específica aparente seca baixa, de 1,25 g/cm³.

O Solo 3, por conter uma fração pedregulhosa maior, fica descaracterizado quando realizado o ensaio de compactação, pela determinação de passagem do material na peneira #4 (0,42 mm) antes do ensaio. Esse procedimento retira grande porcentagem de solo da curva granulométrica da Figura 5.4. Por essa razão, optou-se por não utilizar o Solo 3 nos ensaios de erosão direta que envolviam a compactação de amostras.

### 5.1.3 Ensaio de dispersibilidade (crumb test)

Os ensaios *crumb test* foram realizados nas amostras de solo indeformadas e compactadas. O ensaio traz resultados qualitativos, conforme descrito na seção 2.3.3. A Figura 5.8 apresenta a situação dos solos ensaiados após 45 minutos de ensaio.

FIGURA 5.8 – Imagens das amostras indeformadas e reconstituídas submetidas ao ensaio *crumb test*



FONTE: O autor

O Solo 1 apresentou alta dispersibilidade, classificada como Grau 4 tanto no caso indeformado, quanto no reconstituído.

O Solo 2 apresenta um comportamento dispersivo, porém em grau menor que o Solo 1. A amostra reconstituída foi desfeita, concentrando material no fundo do béquer e apresentando nuvem coloidal. Foi classificado como Grau 3 — comportamento moderadamente dispersivo.

Já o Solo 3 não apresentou comportamento dispersivo. Os torrões indeformados submetidos ao ensaio permaneceram intactos durante o período de ensaio, apenas absorvendo água e depositando partículas no fundo, sem tornar a água turva. O torrão reconstituído se desfez no béquer, mas sem alterar a turbidez da água.

Observou-se que não houve diferenças significativas nos resultados entre as amostras indeformadas e reconstituídas. Apenas no caso do Solo 3 foi notada alguma diferença entre os casos. Pode-se concluir que a análise na condição indeformada é suficiente para a verificação da dispersibilidade do solo.

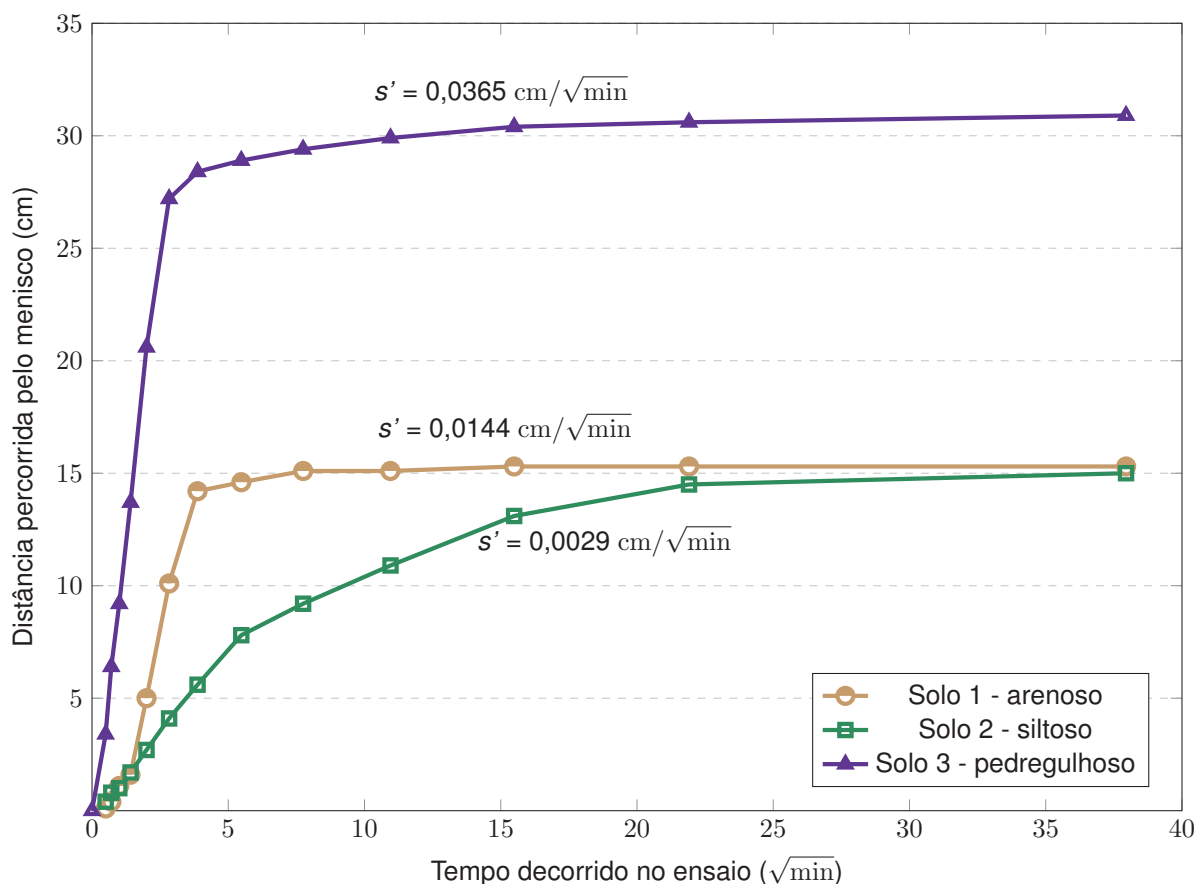
#### 5.1.4 Ensaios de erosão por metodologia MCT

Foram realizados os ensaios de capilaridade e erodibilidade específica, conforme procedimentos descritos na seção 4.2.4. A partir dos resultados do ensaio de capilaridade, foi possível traçar curvas da raiz do tempo no ensaio (minutos) pela leitura na bureta graduada<sup>1</sup>. As curvas possuem formato semelhantes ao comportamento típico relatado no trabalho de Nogami e Villibor (1979) e obtido em outros trabalhos (p. ex. Bastos (1999) e Venturini (2019)). A Figura 5.9 apresenta as curvas para os três solos investigados neste trabalho. A figura também apresenta a massa específica dos corpos de prova antes do ensaio, o teor de umidade inicial da amostra e o teor de umidade após o ensaio.

Observa-se nas curvas da Figura 5.9 uma divisão em dois trechos: Uma subida inicial acentuada, seguida por uma tendência de estabilização. Esse fator se dá devido à chegada da água na parte superior da amostra. Visualmente foi possível notar o aumento de umidade na parte superior da amostra, através da mudança de cor.

<sup>1</sup> a graduação da bureta utilizada, em mililitros, coincide com a distância percorrida pelo menisco, em centímetros

FIGURA 5.9 – Resultados do ensaio de capilaridade



| Solo 1 - Arenoso                                                  | Solo 2 - Siltoso                                                  | Solo 3 - Pedregulhoso                                             |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $\rho_{nat}: 1,757 \text{ g/cm}^3$                                | $\rho_{nat}: 1,785 \text{ g/cm}^3$                                | $\rho_{nat}: 1,949 \text{ g/cm}^3$                                |
| Teor de umidade inicial: 17,4 %<br>Teor de umidade final: 30,83 % | Teor de umidade inicial: 35,1 %<br>Teor de umidade final: 45,71 % | Teor de umidade inicial: 6,99 %<br>Teor de umidade final: 31,11 % |

FONTE: O autor

O parâmetro  $s'$  apresentado na Figura 5.9 corresponde ao coeficiente de sorção, apresentado na Equação 2.12. Esse coeficiente representa a inclinação do trecho inicial da curva de capilaridade. O Solo 1 apresentou um coeficiente de sorção de  $0,0144 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}$ . Já o Solo 2 apresentou o menor coeficiente de sorção, devido muito à natureza argilosa do mesmo, com um valor de  $0,0029 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}$ . Obteve-se no Solo 3 um coeficiente de sorção de  $0,0365 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}$ , sendo a amostra com maior volume de água infiltrado durante o ensaio.

Os resultados do ensaio de erodibilidade específica são apresentados na Tabela 5.1, que contém a massa específica natural da amostra ( $\gamma_{nat}$ ), a massa específica aparente seca ( $\gamma_d$ ), o teor de umidade ( $w$ ) da amostra e o coeficiente  $pi$ , calculado pela Equação 2.13.

TABELA 5.1 – Resultados dos ensaios de erodibilidade específica

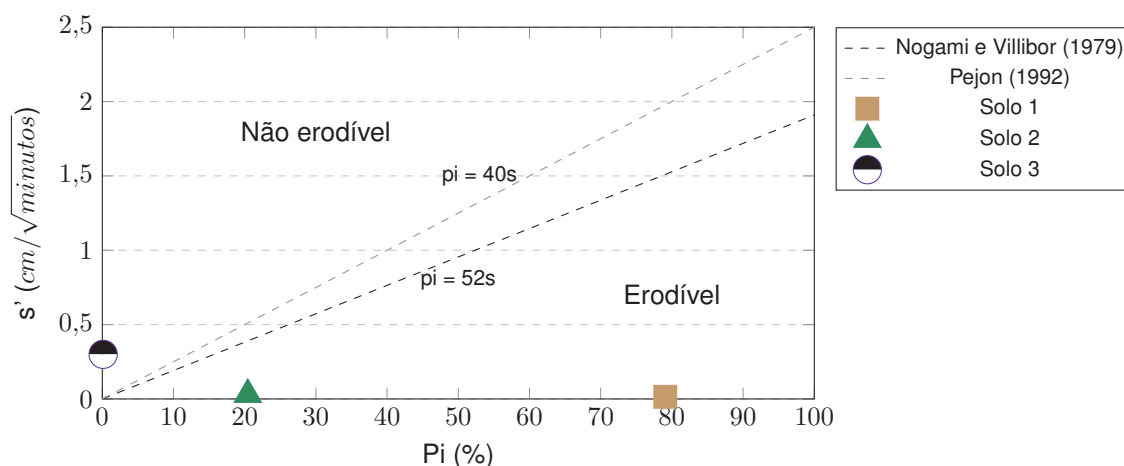
|                          | Solo 1 | Solo 2 | Solo 3 |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| Massa de solo (g)        | 60,070 | 67,740 | 81,200 |
| Teor de umidade          | 16,87% | 35,84% | 5,49%  |
| Massa de solo retido (g) | 37,86  | 13,85  | 0,124  |
| $P_i (M_t/M_s)$          | 63,02% | 20,44% | 0,123% |

A partir dos resultados, é possível classificar os solos da região em estudo dentro da metodologia MCT de erodibilidade. A Tabela 5.2 exibe um resumo dos ensaios e o cálculo da relação  $pi/s'$ , enquanto que a Figura 5.10 apresenta o posicionamento dos solos dentro do ábaco apresentado em Nogami e Villibor (1995) (Figura 2.13).

TABELA 5.2 – Resumo da classificação dos solos dentro dos critérios de erodibilidade MCT

|                                                                  | Solo 1   | Solo 2   | Solo 3       |
|------------------------------------------------------------------|----------|----------|--------------|
| Coeficiente de sorção ( $s'$ ) ( $\text{cm}/\sqrt{\text{min}}$ ) | 0,0145   | 0,0029   | 0,0365       |
| Parâmetro $pi$                                                   | 79,07%   | 20,44%   | 0,12%        |
| $pi/s$                                                           | 55,06    | 69,72    | 0,034        |
| Crítérios de Nogami e Villibor (1979) ou Pejon (1992)            | Erodível | Erodível | Não Erodível |

FIGURA 5.10 – Posicionamento dos solos dentro do ábaco erodibilidade da metodologia MCT



FONTE: O autor

Os critérios indicam de forma qualitativa o posicionamento dos solos, classificando-os em apenas dois grupos: erodível e não erodível. Os resultados indicam que o Solo 3 posiciona-se dentro da faixa não erodível dos critérios, devido a maior capacidade de infiltração do solo e baixa erodibilidade específica do mesmo. Os solos 1 e 2 ficaram posicionados dentro da faixa erodível, devido ao maior coeficiente  $pi$  e baixo coeficiente de sorção ( $s'$ ) obtido nos dois casos.

## 5.2 ENSAIOS DE EROÇÃO INDERBITZEN

Através dos ensaios de erodibilidade direta tipo Inderbitzen, cuja descrição da metodologia empregada foi descrita no item 4.3.1, foi possível a obtenção de diferentes resultados. Geraram-se curvas e gráficos para visualizar a perda de solo por tempo decorrido do ensaio, influência da inclinação na massa de material coletado, análise do peso específico e teor de umidade inicial e final das amostras submetidas ao ensaio, análise do massa de material coletado em cada uma das peneiras utilizadas, cálculo do parâmetro de erodibilidade  $K$ , tensão crítica de cisalhamento e aplicação dos resultados em critérios de erosão. Ao todo, foram analisados 9 casos, com 3 a 4 amostras em cada caso, totalizando 28 ensaios.

O cálculo da perda de solo acumulada foi realizado através da Equação 5.1.

$$PS = \left( \frac{M\#40 + M\#200}{AA} \right) \quad (5.1)$$

onde:  $PS_a$  = perda de solo por área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );  $M\#40$  = massa de solo seco retida na peneira #40 (g);  $M\#200$  = massa de solo seco retido na peneira #200 (g);  $AA$  = área da superfície do corpo de prova exposta à erosão, determinada pela área da secção transversal interna do anel ( $\text{cm}^2$ ).

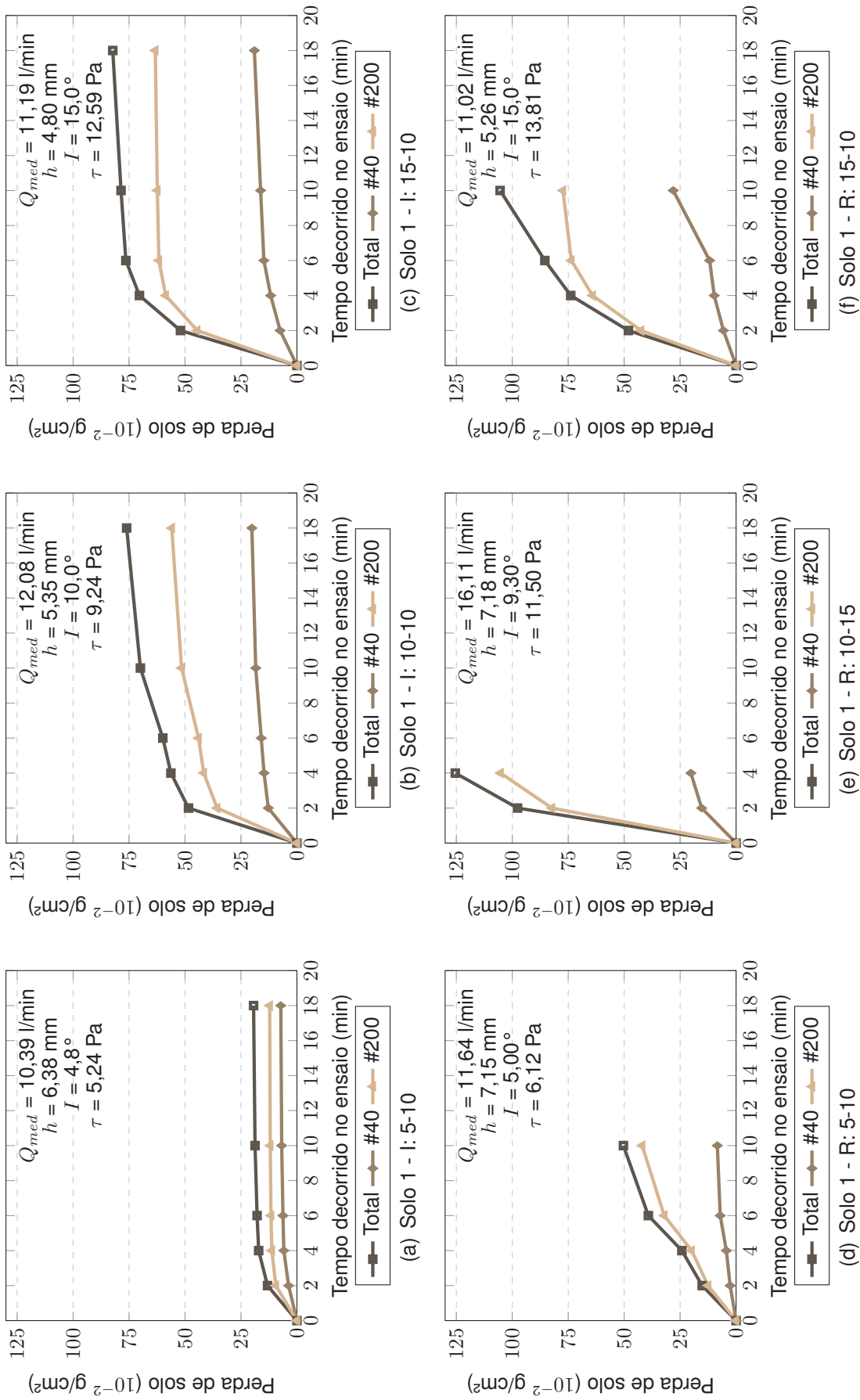
Para criar as curvas de perda de solo por tempo decorrido, utilizou-se a massa de solo coletada em cada tempo de ensaio de forma acumulada. Os resultados são apresentados normalizados pela área do corpo de prova multiplicados por 100, para melhor visualização. A fórmula de cálculo é apresentada na Equação 5.2.

$$PS_s(t) = \sum_{t=0}^5 PS \times 100 \quad (5.2)$$

onde:  $PS_s(t)$  = Perda de solo acumulada no tempo  $t$  ( $10^{-2} \text{ g}/\text{cm}^2$ );  $PS_a$  = perda de solo por área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ).

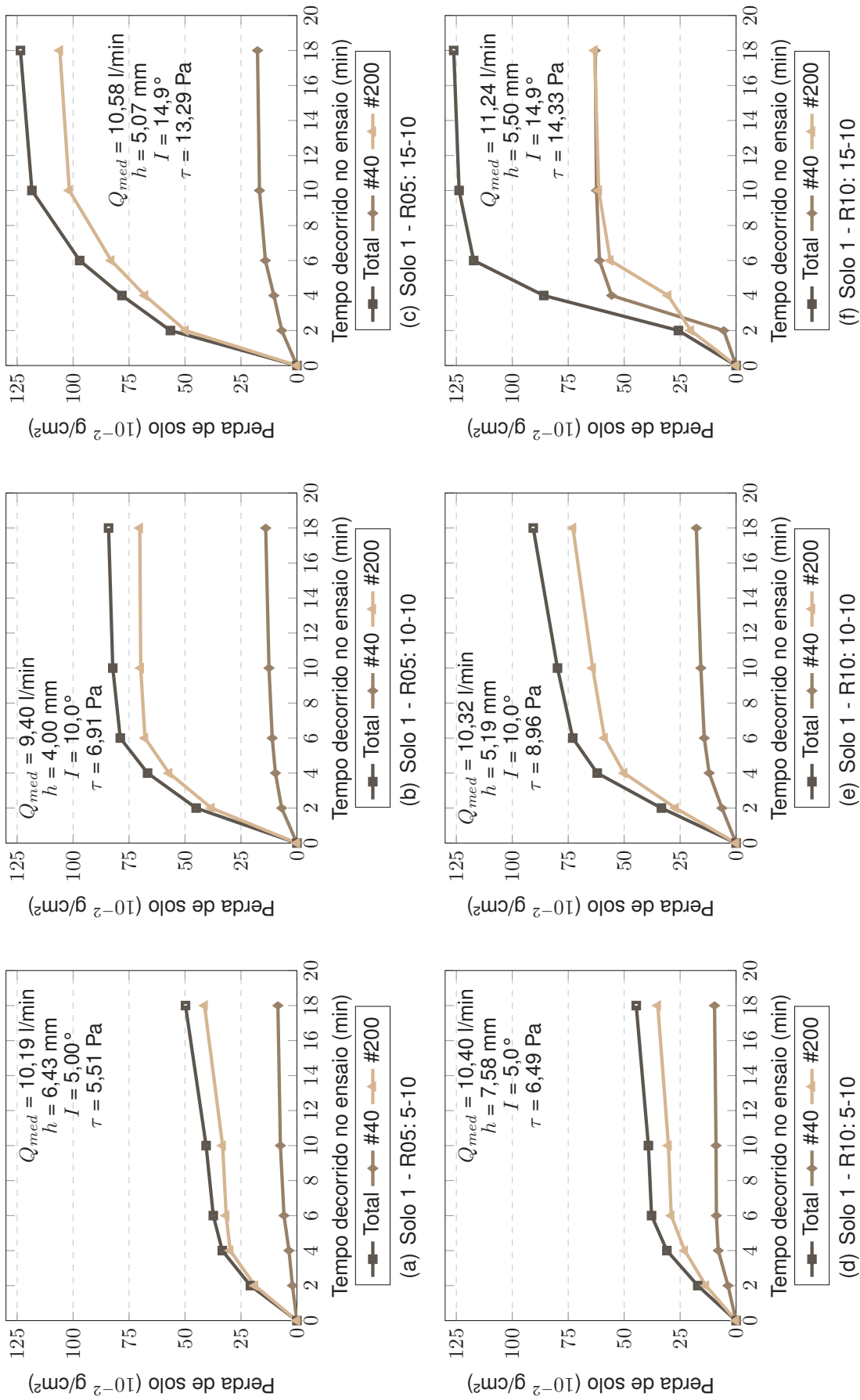
Os resultados dos ensaios de erosão Inderbitzen para o Solo 1 são apresentados na Figura 5.11, indicando dados da condição indeformada e reconstituída, e Figura 5.12, com as curvas perda de solo X tempo para 0,5 g raízes por corpo de prova e 1 g por corpo de prova. A nomenclatura exibida é explicada na Figura 4.16.

FIGURA 5.11 – Ensaio Inderbitzen no Solo 1 em amostras indeformadas (I) e reconstituídas (R)



FONTE: O autor

FIGURA 5.12 – Ensaios Inderbitzen no Solo 1 em amostras reconstituídas com raízes (R05 e R10)



FONTE: O autor

Nos gráficos, a vazão apresentada é o resultado da média de 4 leituras realizadas pelo rotâmetro digital durante a execução do ensaio. Da mesma maneira, a altura  $h$  apresentada é resultado da média aritmética de três leituras do sensor de nível d'água e uma medida manual da régua.

A tensão hidráulica cisalhante foi calculada através da relação  $\tau_a = \gamma_w \cdot h \cdot I$  (Equação 2.10). Na equação, a inclinação da rampa foi determinada através de relações geométricas e o peso específico da água foi determinado com um densímetro no reservatório, com valor variando entre 0,997 g/cm<sup>3</sup> a 1,003 g/cm<sup>3</sup>.

Através das Figuras 5.11 e 5.12 é possível perceber que existe uma tendência de maiores valores de perda de solo com o aumento da tensão cisalhante imposta. Também verifica-se que a curva de solo coletado na peneira #40 teve menor amplitude, quando comparado ao material coletado na peneira #200. Em todos os gráficos, a curva mais escura representa o material total coletado.

Nas amostras reconstituídas do Solo 1 (Figura 5.11 (d), (f) e (e)) não foi possível a conclusão do tempo programado em nenhum caso, devido ao colapso da amostra em um tempo inferior a 18 minutos. O último ponto registrado em cada gráfico correspondente ao solo coletado anteriormente ao colapso.

Esse fator pode estar associado a perda de forças coesivas na amostra com o processo de reconstituição. A amostra indeformada, mantendo condições naturais de cimentação e coesão, apresenta menor perda de solo, mesmo quando comparadas as curvas de solo reconstituído com raízes (Figura 5.12).

No ensaio do Solo 1 - R10: 15-10 (Figura 5.12 (f)), o material coletado a 2 min ficou concentrado na peneira 0,075 mm (#200). Essa situação se inverteu no ponto coletado a 4 min, justificando o cruzamento entre curvas. No ensaio do Solo 1 - R: 10-15 (Figura 5.11 (e)), a vazão de ensaio (15 l/min) foi maior que a programada (10 l/min). Uma segunda torneira de controle foi instalada após esse ensaio.

Nas amostras com raízes, percebeu-se uma diferença muito pequena no valor de perda de solo, quando comparados os casos R05 (0,5 g de raízes) (Figura 5.12 (a), (b) e (c)) e R10 (1 g de raízes) (Figura 5.12 (d), (e) e (f)). As amostras com mais raízes apresentaram ligeiramente menores perda de solo. Porém, ambas amostras apresentaram menores perda de solo quando comparadas ao caso R (reconstituído) e maiores perda de solo em relação ao caso I (indeformado).

Utilizando o mesmo método para cálculo, apresenta-se os resultados dos ensaios de erosão Inderbitzen para o Solo 2 na Figura 5.13, para condição indeformada (I) e reconstituída (R) e Figura 5.14 para os casos com raízes (R05 e R10). Para fins de representação na página e comparativo, foram exibidos os resultados de 3 dos 4 ensaios realizados na condição indeformada.

FIGURA 5.13 – Ensaio Inderbitzen no Solo 2 em amostras indeformadas (I) e reconstituídas (R)

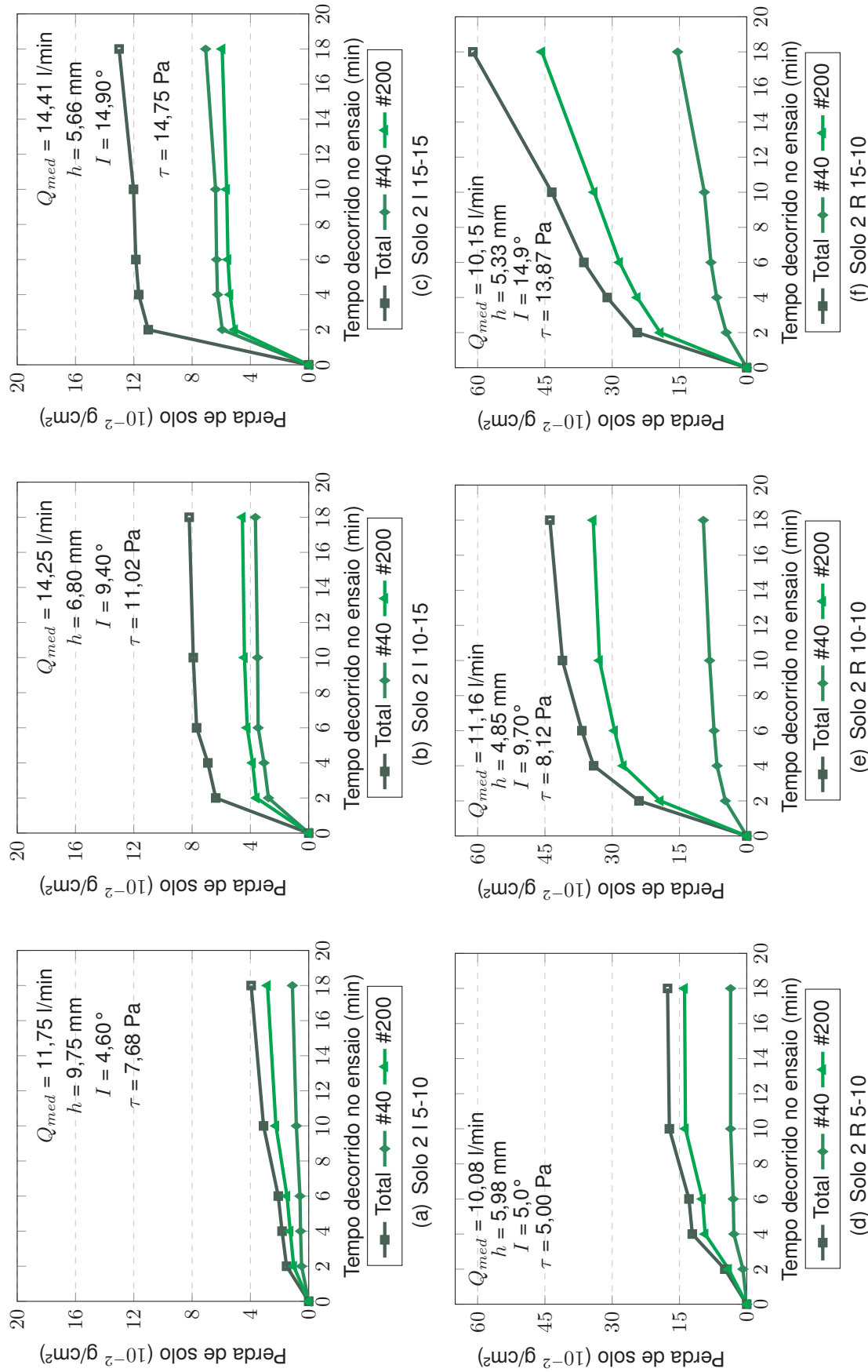
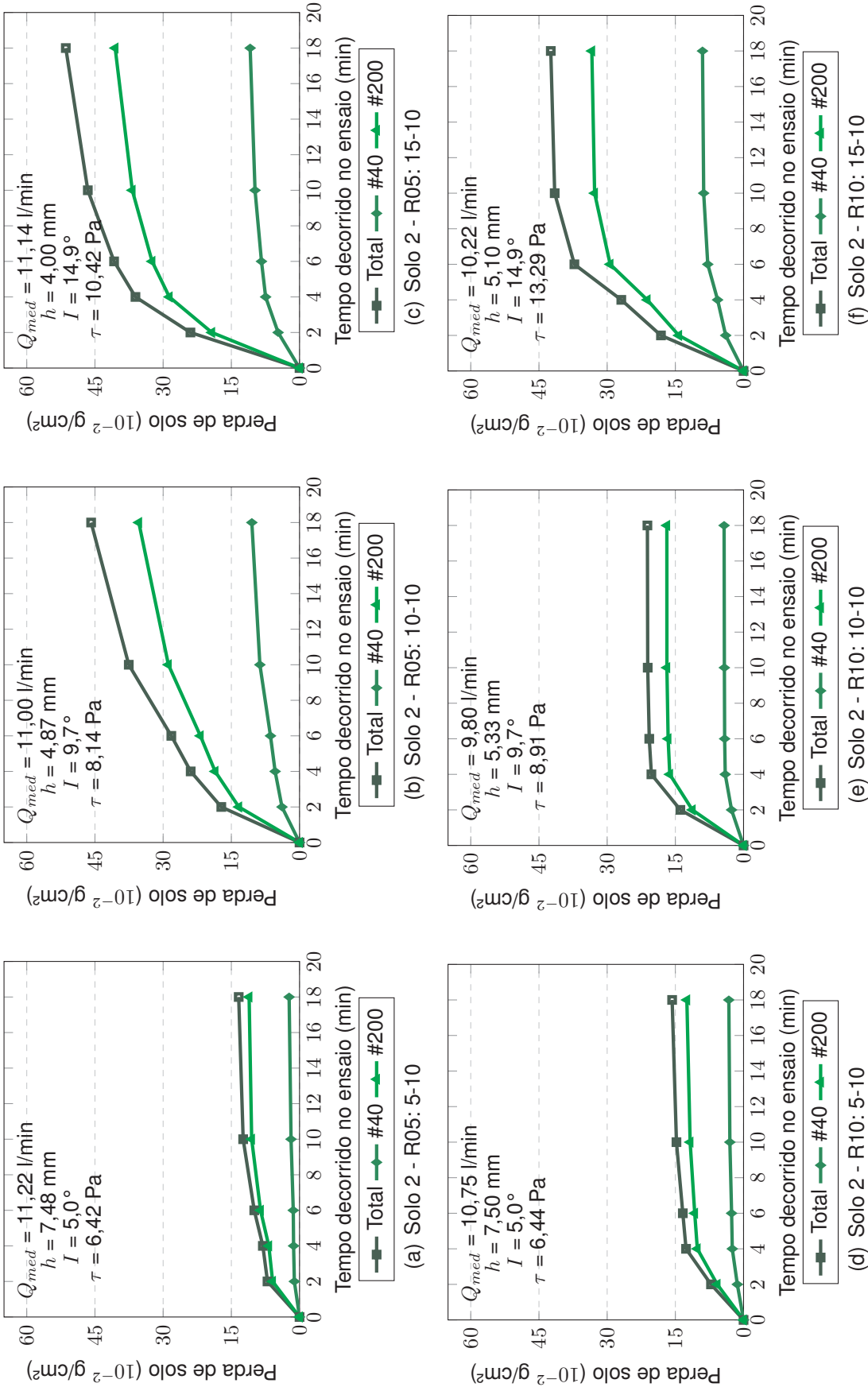


FIGURA 5.14 – Ensaio Inderbitzen no Solo 2 em amostras reconstituídas com raízes (R05 e R10)



No Solo 2, as amostras indeformadas apresentaram perda de solo da ordem de 6 vezes menores do que o Solo 1. Para as amostras reconstituídas, a perda de solo foi de cerca de 2,5 vezes menor<sup>2</sup>, também em comparativo entre os dois solos. A condição indeformada foi a que apresentou a menor perda de solo, comparada a todos os casos com reconstituição. Esse resultado também foi observado no Solo 1.

Quando comparados os resultados em amostras indeformadas do Solo 1 e 2, pode-se atribuir os menores valores de perda de solo no Solo 2 à natureza mais argilosa do mesmo (75,5% de argila e silte no Solo 2 contra 38% de finos no Solo 1). A presença de forças coesivas e partículas finas torna o solo mais resistente à erosão, justificando a diferença nos resultados.

Ainda em comparativo, o caso indeformado (I) (Figura 5.13 (a), (b) e (c)) apresentou menor perda de solo, comparado aos casos reconstituídos sem raízes (Figura 5.13 (d), (e) e (f)). As perdas na condição indeformada também foram menores que os casos com a inclusão de raízes (Figura 5.14 (a), (b), (c), (d), (e) e (f)).

Sobre as amostras reconstituídas do Solo 2, a perda de solo é ligeiramente menor no caso R10, seguido do caso R05 e com maiores perdas no solo reconstituído sem raízes. Porém, diferentemente do Solo 1, todas as amostras concluíram os ensaios, mesmo na condição sem raízes.

Alguns trabalhos citam que o efeito das raízes na redução da erosão hídrica é melhor observado em solos de elevada fração fina (DE BAETS et al., 2008), que obteve melhores resultados em solos siltosos, em um comparativo com solos arenosos). Conforme a equação apresentada por Gyssels et al. (2005) (Equação 2.14), a relação entre quantidade de vegetação e redução nas taxas de erosão é da forma exponencial. Dado a pequena diferença observada nos casos com raízes no presente trabalho, pode-se avaliar que as quantidades de raízes utilizadas correspondem a faixa inicial da exponencial. Significativas diferenças nas taxas de erosão podem ser obtidas através da inclusão de quantidades maiores de raízes.

Ainda nos gráficos do Solo 2, percebe-se que a parcela coletada na peneira #200 é superior ao material coletado na #40. Essa observação tem relação com a distribuição granulométrica deste solo, visto que apenas 18,7% das partículas do solo fica retida na peneira #40 (0,42 mm) (Figura 5.3). Nas curvas da Figura 5.13 (b), (c) e (c), a curva de material coletado em cada peneira praticamente coincide, uma exceção ao observado nos outros ensaios.

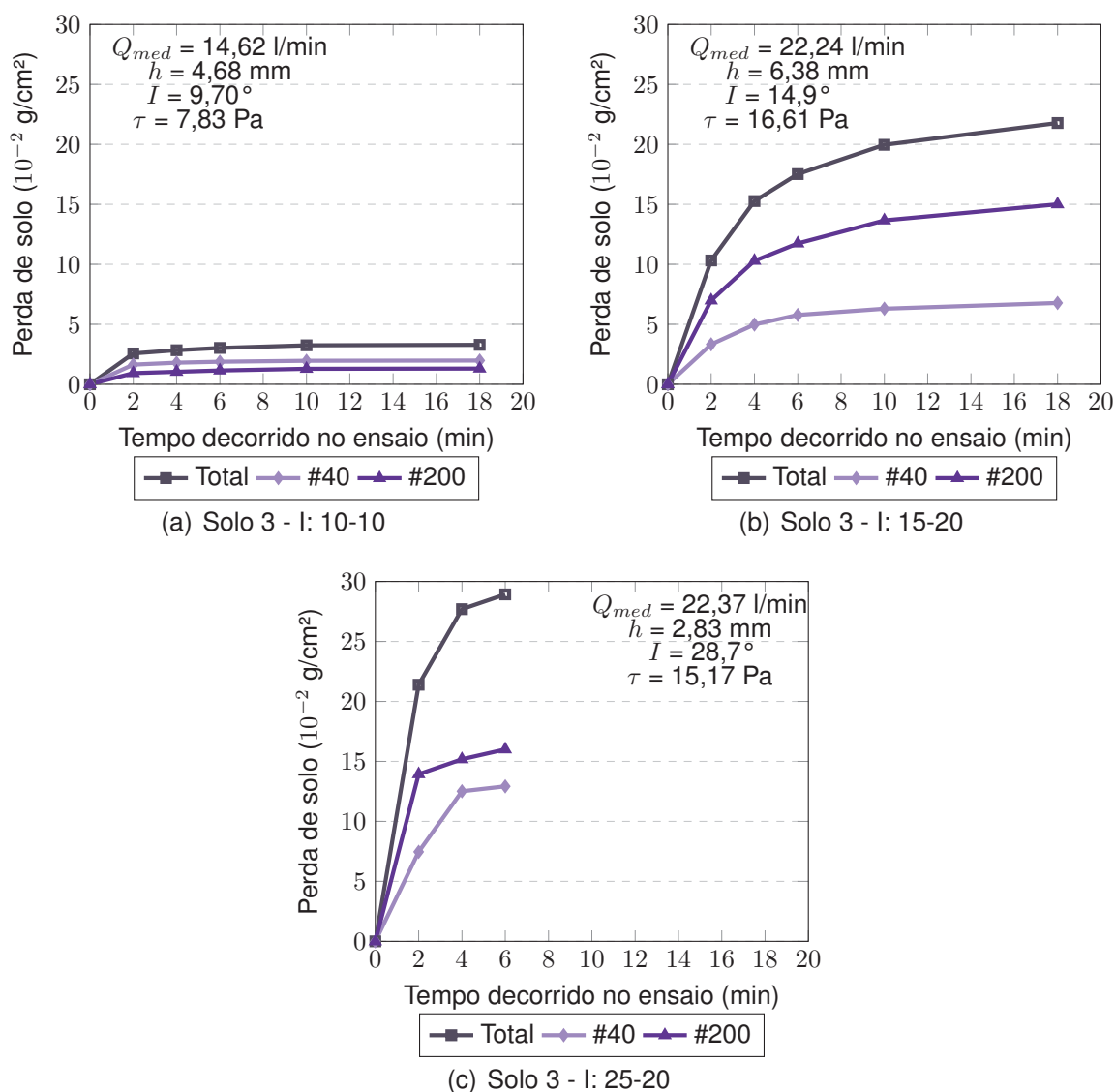
As tensões hidráulicas cisalhantes aplicadas nos ensaios com Solo 1 e 2 foram de mesma ordem, assim como os valores de vazão e inclinação aplicados. Observou-

<sup>2</sup> Esse comparativo de grandezas pode ser visualizado na Figura 5.19

se que a altura da lâmina d'água é inversamente proporcional a inclinação da rampa, devido a maior velocidade do fluxo em inclinações maiores.

Para o Solo 3, foram realizados ensaios apenas no caso I (indeformado). Justifica-se a escolha pelos resultados de análise granulométrica do solo (Figura 5.4). Como o solo possui uma fração pedregulhosa de 76,0%, o uso de uma fração mais fina para a reconstituição de amostras descaracteriza os resultados. As curvas obtidas são apresentadas na Figura 5.15.

FIGURA 5.15 – Ensaios Inderbitzen no Solo 3 em amostras indeformadas (I)



O Solo 3 foi o que apresentou os menores valores de perda de solo dentre todos os ensaios realizados. Esse fator pode ser explicado pela parcela pedregulhosa, que é pouco erodível. Os menores valores de perda de solo foram o que permitiram a realização de ensaios com maiores vazões e inclinações (Figura 5.15 (b), (c)). A realização dos ensaios com  $10^\circ$  de inclinação (Figura 5.15 (a)) gerou perdas de

solo cerca de 23 vezes menores, quando comparada ao mesmo caso no Solo 1. Relacionando os casos semelhantes do Solo 2 e 3, a perda de solo foi 4,5 vezes menor no Solo 3.

Foi realizado um teste com inclinação de  $25^\circ$  e vazão de 20 l/min (22,37 l/min nas médias das medições realizadas) nas amostras de Solo 3. Esse caso é retratado na Figura 5.15 (c) e serviu para testar os limites do equipamento. Porém, a amostra chegou apenas aos 7 min de ensaio e o fluxo de água na rampa foi demasiadamente turbulento, dificultando a estimativa da altura da lâmina d'água. A Figura 5.15 (b) exhibe o gráfico obtido até o ultimo ponto antes do colapso. Pode-se avaliar que não é possível a realização de ensaios com altas tensões cisalhantes através do equipamento desenvolvido.

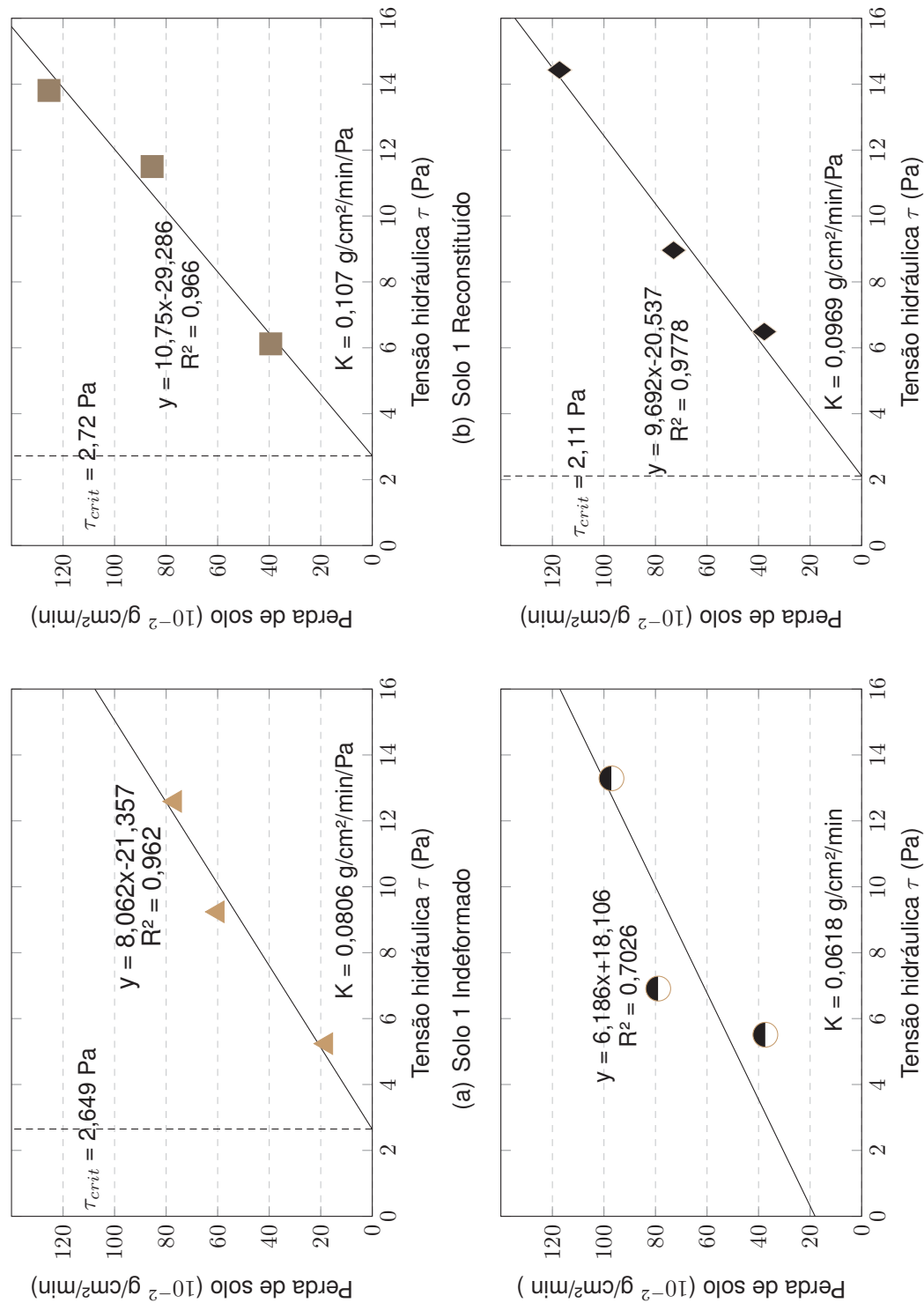
A análise direta das magnitudes de perda de solo em cada ensaio não é a maneira mais correta de se avaliar a erodibilidade do solo dentro do ensaio Inderbitzen. Conforme cita Bastos (1999), a análise pode ser realizada através do fator de erodibilidade  $K$  e a tensão de cisalhamento crítica, que inicia o processo de erosão. Ambos os parâmetros podem ser determinados através de um gráfico, que relaciona o valor de tensão hidráulica do ensaio pela perda de solo em um tempo definido. Para a criação desse gráfico utiliza-se três ensaios com tensões hidráulicas diferentes, criando-se uma espécie de envoltória dos resultados.

Um dos pontos de dúvida para a produção do gráfico é a definição de qual tempo utilizar para a determinação da perda de solo (eixo y do gráfico). Conforme Bastos (1999), o uso de valores iniciais (p. ex. 1 min) está sujeito a erros pela "primeira onda" de água na rampa gerar uma erosão maior no corpo de prova. O uso de valores finais de ensaio, como em 18 minutos, descaracteriza os resultados, pela geração de sulcos no corpo de prova. Devido a isso, para definição de  $K$  foi utilizado o valor de perda de solo acumulada até 6 min de ensaio.

A definição do valor de  $K$  segue o gráfico da equação de DuBoys (Equação 2.11), representada no gráfico da Figura 2.10. Através dos pontos do gráfico perda de solo a 6 min X tensão hidráulica cisalhante é possível ajustar uma reta. O coeficiente angular da reta representa o parâmetro  $K$ , uma taxa de erosão, com unidade  $\text{g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ . Já a interseção da reta com o eixo das abscisas representa a tensão cisalhante crítica ( $\tau_c$ ) (Pa), valor onde inicia-se o processo de erosão.

A Figura 5.16 apresenta a definição de  $K$  e  $\tau_c$  para todos os casos do Solo 1. Na Figura 5.17 são apresentadas as curvas para todos os solos do caso do 2 e na Figura 5.18 a definição de  $K$  para a condição indeformada do Solo 3. Cabe destacar que nos gráficos, o eixo das ordenadas sofreu uma multiplicação por 100 para facilitar a visualização.

FIGURA 5.16 – Definição do fator de erodibilidade K para todos os casos do Solo 1

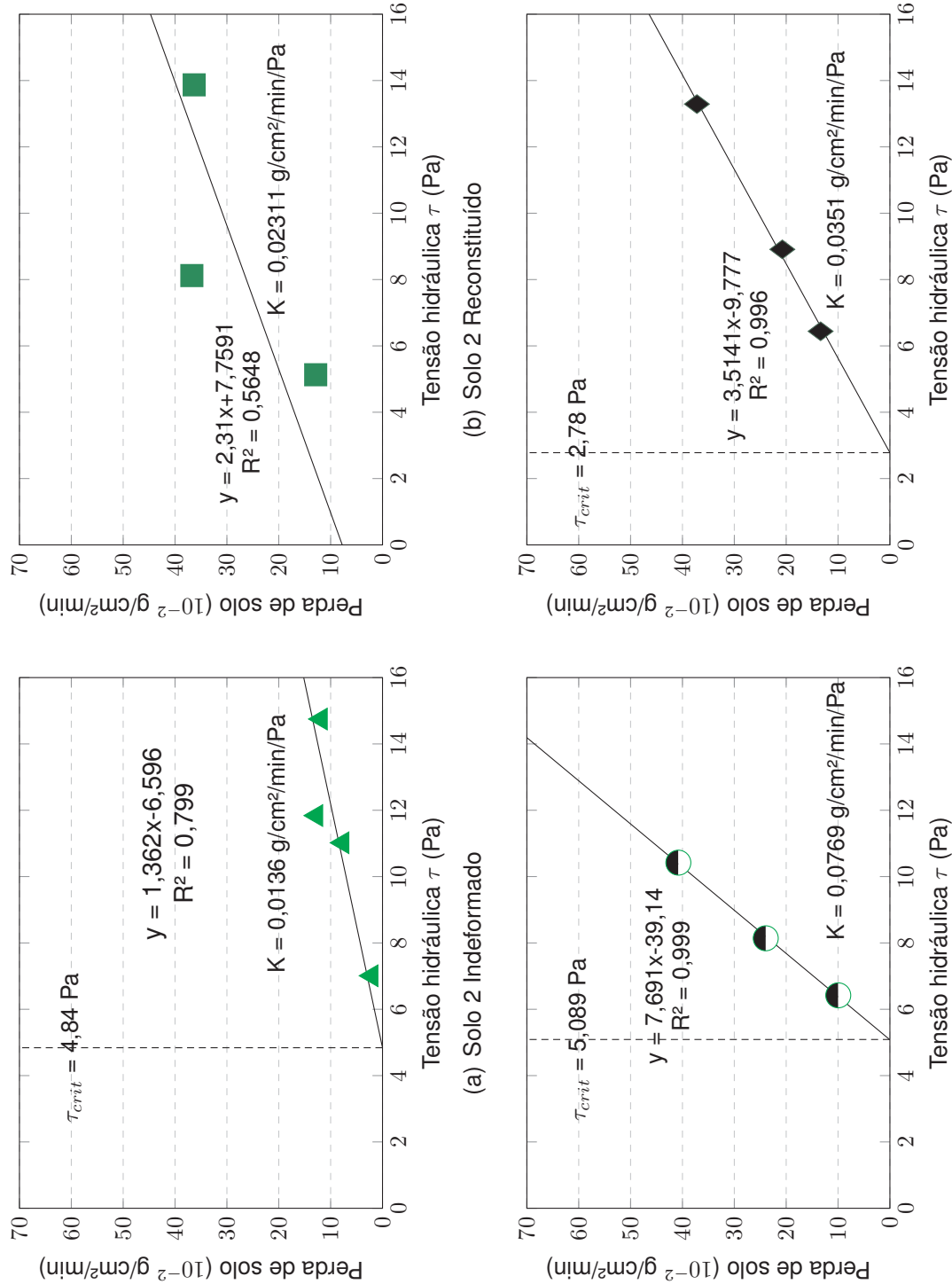


(d) Solo 1 Reconstituído com 1 g de raízes

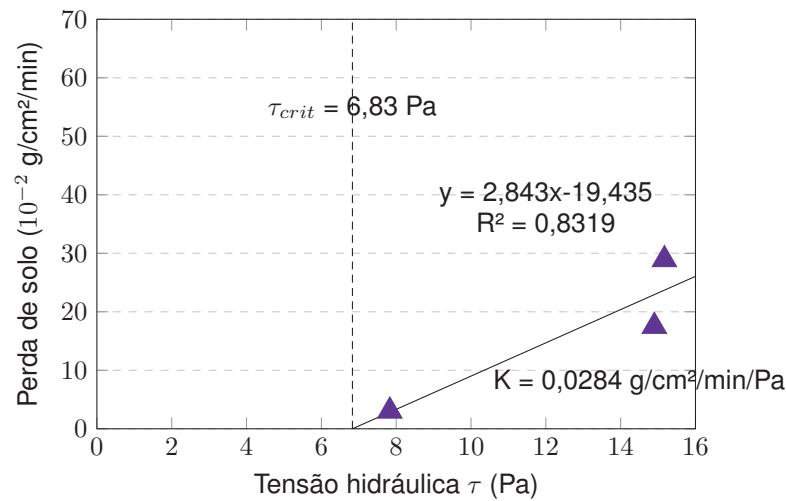
(c) Solo 1 Reconstituído com 0,5 g de raízes

FONTE: O autor

FIGURA 5.17 – Definição do fator de erodibilidade K para todos os casos do Solo 2



FONTE: O autor

FIGURA 5.18 – Definição do fator de erodibilidade  $K$  para o Solo 3

FONTE: O autor

No geral, foi possível ajustar retas bem próximas aos valores experimentais. O valor de  $R^2$  foi superior a 0,95 em 5 casos (5.16 (a), (b), (d), 5.17 (c) e (d)). Nos casos do Solo 1 com 1 g de raízes (5.16 (d)) e Solo 3 (5.18), o valor foi de 0,79 e 0,83, respectivamente. Apenas em um caso o valor de  $R^2$  foi considerado baixo, de 0,565 no Solo 2 reconstituído (5.17 (b)). A definição do fator  $K$  apresentado nas figuras é resultante da divisão do coeficiente angular da reta por 100, em unidade g/cm<sup>2</sup>/min/Pa.

Os valores de  $K$  se situaram na faixa de 0,01 a 0,1 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa. Os menores valores de  $K$  são correspondentes a condição indeformada. O Solo 2 I apresentou fator  $K$  de 0,0136 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa, seguido pelo Solo 3, com  $K$  de 0,0248 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa e o Solo 1 com  $K$  0,0806 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa. Esses parâmetros indicam que a condição indeformada das amostras é menos erodível, comparadas a reconstituição das mesmas.

Quanto à tensão de cisalhamento hidráulica crítica, em dois casos, a definição da tensão cisalhante crítica resultou em uma situação sem sentido físico, com valor negativo. No gráfico da Figura 17(c) e Figura 18(b), a reta cruza o eixo das abscisas na parte negativa, com tensão crítica não representada no gráfico. Nesses dois casos, o valor de  $R^2$  foram os mais baixos dentre todos os ensaios, indicando uma possível dispersibilidade como fator, explicando a indefinição do parâmetro.

A tensão de cisalhamento crítica foi de 2,65 Pa (I), 2,72 Pa (R) e 2,11 (R10) Pa para o Solo 1, com uma indefinição no caso Solo 1 R05 (0,5 g de raízes). Para o Solo 2, os valores foram de 4,84 Pa para o caso indeformado, 5,09 Pa para o caso R05 e 2,78 Pa para os CPs com 1 g de raízes (R10). No caso reconstituído (Solo 2 R), a tensão de cisalhamento crítica ficou indefinida. O Solo 3, em condição indeformada, teve tensão de cisalhamento crítica de 6,83 Pa, maior valor atingido dentre todos os casos.

Esse parâmetro pode não ser bem representado no ensaio, devido a dispersibilidade dos resultados e o ajuste matemático realizado para a sua determinação. Como em todos os casos o solo já iniciou com tensões de cisalhamento superiores a crítica, a melhor determinação do parâmetro seria possível através de valores menores e maiores do que o crítico. Porém, esses valores menores seriam mais facilmente alcançados em outros tipos de ensaio. No equipamento desenvolvido no presente trabalho, optou-se por maiores tensões e maiores alturas de nível d'água, para possibilitar a leitura do parâmetro.

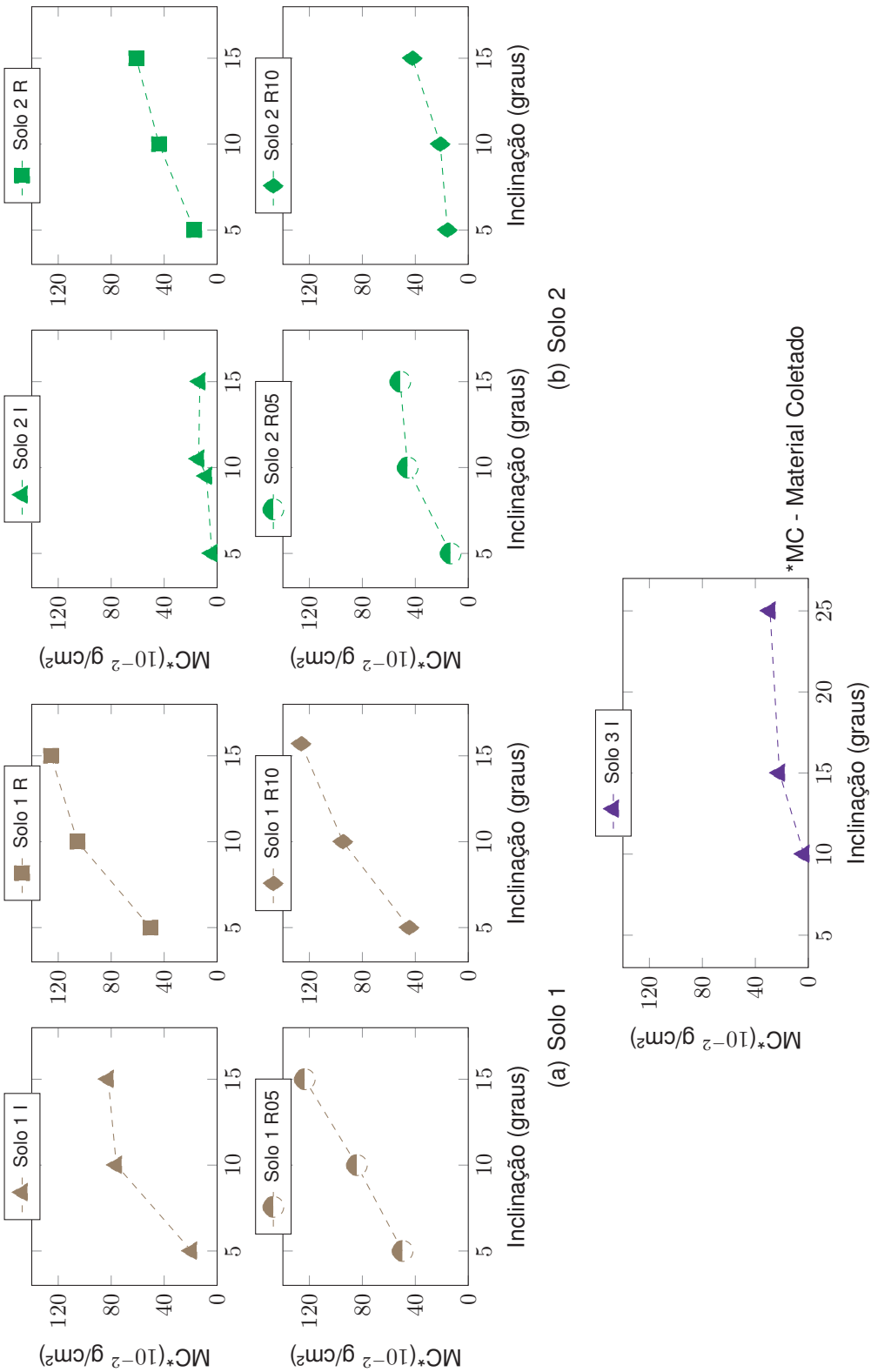
As tensões de cisalhamento críticas obtidas no presente trabalho foram maiores, em um comparativo com outros trabalhos da literatura que avaliaram ensaios Inderbitzen. Porém, situam-se na mesma proporção de trabalhos que realizaram a avaliação através de canais hidráulicos, que possuem maiores lâminas d'água. Bastos (1999) obteve valores predominantemente abaixo de 1 Pa, com alguns valores indefinidos, semelhante ao ocorrido nos casos Solo 1 R 05 e Solo 2 R da presente pesquisa. Ghebreiyessus et al. (1994) obteve valores de 1,3 Pa a 4,0 Pa em ensaios de canal hidráulico horizontal. Nos experimentos de De Baets et al. (2006), obteve-se tensões de 9 Pa a 45 Pa, para alturas de lâmina d'água de 5 a 11 mm. Venturini (2019) obteve valores da ordem de 1 a 2 Pa, para amostras de solo arenoso com raízes na forma de fibras aleatórias.

Além de análises relativas ao material erodido durante os ensaios, realizou-se uma análise das condições de contorno em que amostra foi submetida. A influência da inclinação na massa de material retido foi analisada nos gráficos da Figura 5.19. O valor da ordenada foi considerado como a perda total de solo durante o ensaio a 18 minutos, somando o valor retido em todas as peneiras utilizadas.

Observa-se que o material retido e coletado durante o ensaio é proporcional a inclinação aplicada na rampa em todos os casos. É possível também avaliar que o Solo 1 apresentou maiores massas de material coletado entre todos os ensaios, sendo o Solo 2 I (indeformado) a condição com menores massas de material erodido. Apenas no ensaio do Solo 3 foi empregado uma inclinação maior, de 25°, resultando em maior faixa de valores no gráfico correspondente ao caso.

Também é possível avaliar nos gráficos que existem diferenças nos valores de ordenadas dos casos indeformados (I) e reconstituídos (R, R05 e R10) para todos os solos, sendo valores menores no caso indeformado. Porém, não existe grande diferenças nos casos reconstituídos com raízes (R) e sem raízes (R05 e R10).

FIGURA 5.19 – Influência da inclinação na perda de solo total

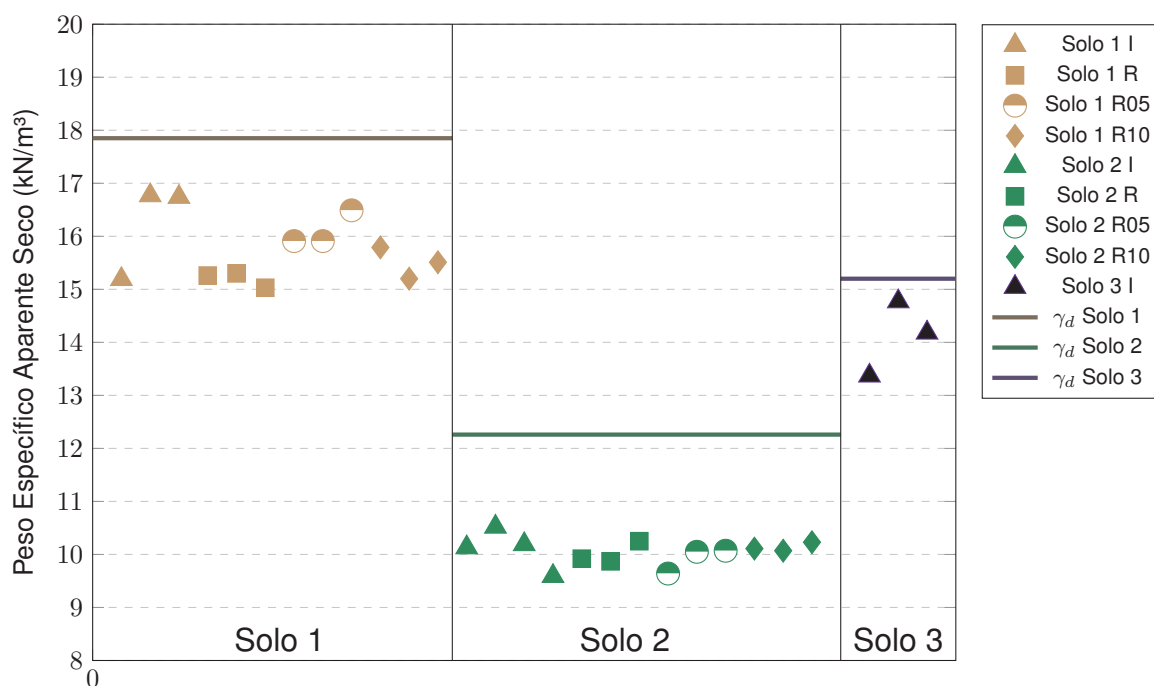


(c) Solo 3

FONTE: O autor

Realizou-se uma análise do peso específico aparente seco das amostras submetidas ao ensaio Inderbitzen. Conforme descrito na seção 4.3.1, cada ensaio realizado contou com uma estimativa do peso específico da amostra e determinação do teor de umidade. De posse dos dados, calculou-se o peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) através da relação  $\gamma_d = \gamma_{nat}/(1 + w)$ , sendo  $w$  o teor de umidade inicial. Os valores foram plotados por tipo de solo na Figura 5.20.

FIGURA 5.20 – Comparativo entre o peso específico aparente seco das amostras submetidas ao ensaio Inderbitzen



NOTA: As linhas horizontais indicam o valor de  $\gamma_d$  ótimo obtido no ensaio Proctor (Figura 5.7).

FONTE: O autor

É possível verificar que as amostras apresentaram pouca dispersão nos valores de peso específico. O Solo 1 tem valores da ordem de 15,75 kN/m³, com maior variação nas amostras indeformadas (triângulos marrons, na Figura 5.20). Já o Solo 2 apresentou valores próximos a 10,5 kN/m³, com pouca dispersibilidade e proximidade entre a condição indeformada e reconstituída. Para o Solo 3, o valor médio foi de 14,10 kN/m³.

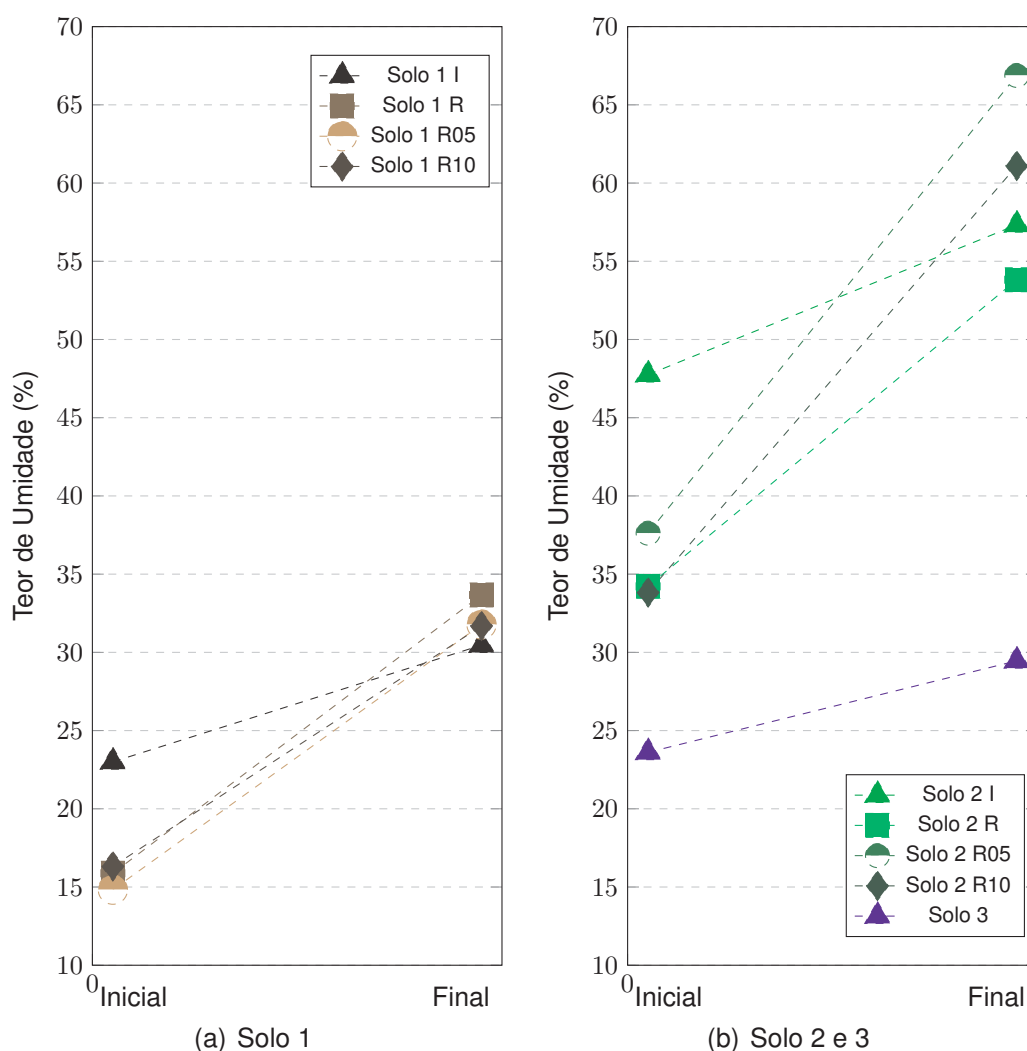
Na Figura 5.20, quando realiza-se uma verificação valores de peso específico aparente seco do ensaio de Proctor Normal (Figura 5.7), verifica-se que o método de compactação utilizado não foi suficiente para atingir o peso específico especificado. Os solos reconstituídos 1 e 2 não atingiram a linha que indica o peso específico aparente seco do ensaio de Proctor. O peso específico aparente seco na condição indeformada do Solo 3 corresponde aproximadamente ao valor obtido no ensaio de compactação.

A massa de solo adicionada e depois compactada estaticamente com a prensa de CBR para se atingir o peso específico foi calculada com base na massa de um anel

de corpo de prova e no peso específico do ensaio Proctor, com uma adição de 10% para cobrir eventuais perdas (conforme descrito na seção 4.3.1). Verificou-se que as perdas são maiores, principalmente no solo que se adere ao equipamento durante a produção do corpo de prova. Para atingir valores mais próximos ao peso específico desejado, sugere-se trabalhar com maiores porcentagens de perda.

Outro parâmetro dos corpos de prova ensaiados que foi objeto de análise é o teor de umidade inicial da amostra e o teor de umidade final. Em todos os ensaios foram determinados esses índices. Na Figura 5.21, expressou-se essa análise com a média aritmética dos teores de umidade dos corpos de prova ensaiados em cada caso.

FIGURA 5.21 – Comparativo entre o teor de umidade inicial e final médio de cada tipo de amostra submetida ao ensaio Inderbitzen



FONTE: O autor

O aumento do teor de umidade no corpo de prova ocorre devido à infiltração de água no solo durante o ensaio. Pode-se verificar que nas médias dos teores de umidade de cada caso no Solo 1 (5.21 (a)), os valores foram bastante próximos, saindo

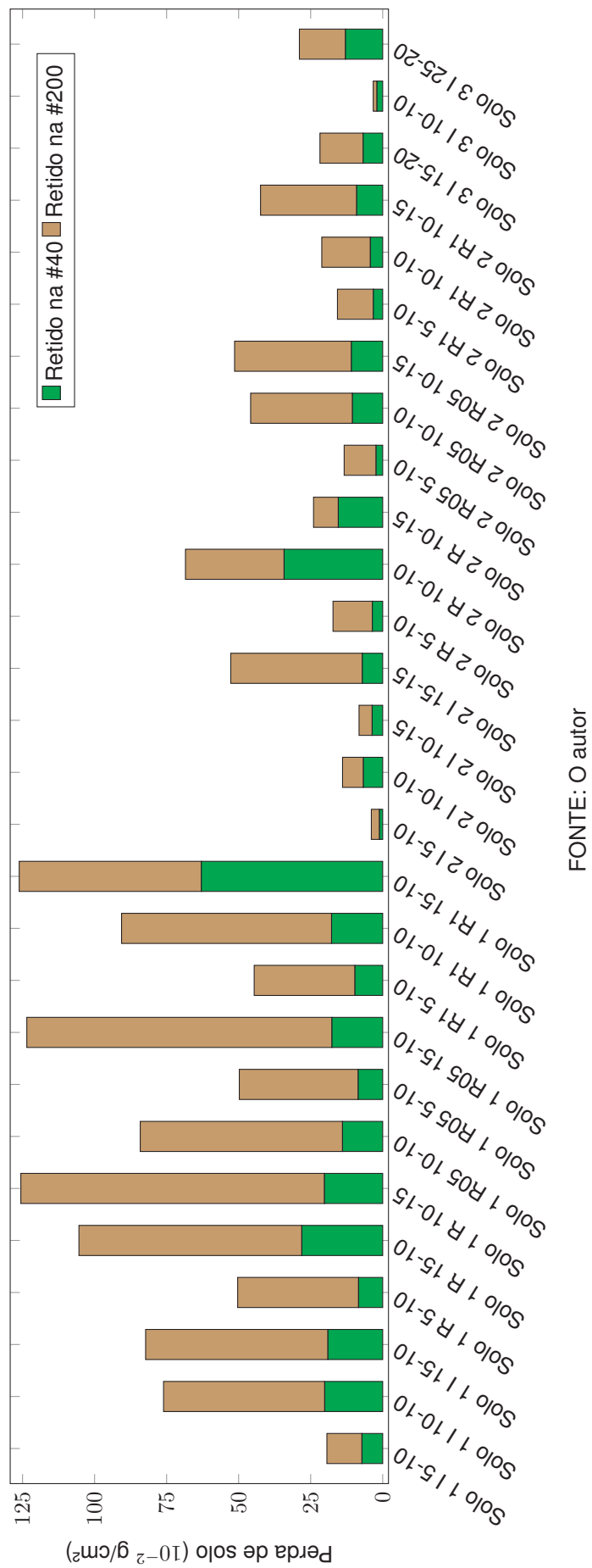
de cerca de 15% para cerca de 30% ao fim do ensaio. É possível verificar também que o teor de umidade ótimo de compactação da Figura 5.7 ficou próximo ao valor real dos corpos de prova. A média de teor de umidade inicial das amostras reconstituídas do Solo 1 foi de 15,68%, com um valor obtido no ensaio de compactação de 13,8%. A diferença pode ser decorrente da umidade hidrocópica do solo seco ao ar utilizado para a confecção dos corpos de prova.

No Solo 2 (Figura 5.21 (b)), a dispersibilidade de valores é maior, com um comportamento distinto entre amostra indeformada e amostra reconstituída. Esse solo possui umidade natural elevada, com valores na casa de 47,75%, absorvendo menos água na condição indeformada durante o ensaio. Já as amostras reconstituídas partiram de uma umidade inicial média de 35,23% para valores acima de 53%, ainda observando o comportamento do Solo 2.

Pode-se notar que o teor de umidade inicial dos corpos de prova de Solo 2 reconstituídos foi superior aos valores da curva de compactação ( $w_{otimo}$  de 29,0%, no ensaio proctor). Os teores de umidade finais altos eram esperados, visto que era notável que os corpos de prova reconstituídos com Solo 2 ao fim dos ensaios estavam com uma constituição viscosa, com umidade muito elevada. No Solo 3, apenas a condição submetida a ensaio (indeformada) foi analisada.

Foi produzido um comparativo entre o material total retido nas peneiras #40 e #200 durante os ensaios, com gráfico apresentado na Figura 5.22 para todas as 28 amostras ensaiadas.

FIGURA 5.22 – Comparativo de solos retidos na peneira #40 e #200



A Figura 5.22 indica que a maior parte do solo erodido foi coletado na peneira #200 (0,075 mm). Em sete casos foi observada uma distribuição entre as duas peneiras praticamente igual<sup>3</sup>.

Esse resultado é importante para se verificar a operabilidade do ensaio proposto, visto que em ensaios com solos com granulações mais grossa, o valor retido na peneira #40 seja de maior relevância. Para os solos ensaiados na presente pesquisa, o material coletado na peneira #200 consistiu maior parte do material total. Podem ser utilizadas outras aberturas de peneiras, inclusive a série completa para classificação granulométrica.

Como grande parte do material erodido possui diâmetro médio inferior a 0,42 mm (abertura da #40), a fração fina possui relevância. O ensaio proposto no presente trabalho realizou análises apenas no material desprendido com abertura menor que 0,075 mm. Em futuros trabalhos, poderiam ser verificadas formas de considerar a fração mais fina, através da turbidez da água do reservatório ou sedimentações da água posteriores à conclusão do ensaio.

Os resultados obtidos nos 28 ensaios e cada um dos casos analisados foram aplicados em dois critérios de erodibilidade, utilizando proposições da literatura. Estes critérios são apresentados na seção 5.2.1.

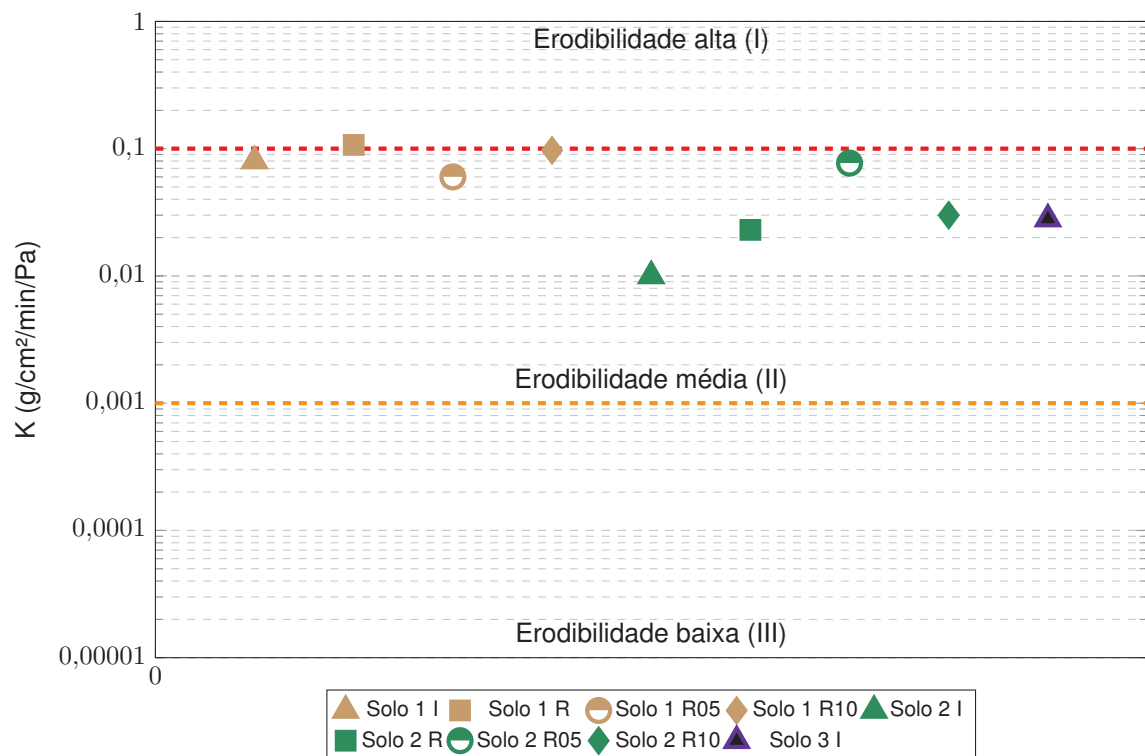
#### 5.2.1 Aplicação dos resultados em critérios de erosão

Os resultados dos ensaios de erosão Inderbitzen foram aplicados em dois critérios de erodibilidade de solos propostos na literatura. Os critérios escolhidos foram o proposto por Bastos (1999), desenvolvido para ensaios tipo Inderbitzen, e proposto por Briaud (2008), desenvolvido para vários tipos de ensaios, sendo realizado no presente trabalho uma proposta para a aplicação dos resultados do Inderbitzen nos critérios.

A Figura 5.23 apresenta os resultados dos coeficientes de erodibilidade  $K$  determinados para cada caso analisado nos critérios de Bastos (1999). O critério consiste em uma escala semilogarítmica no eixo y, com a plotagem dos valores obtidos de  $K$  através do ajuste de retas (realizado nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18). O autor afirma que os limites entre categorias de erodibilidade não são fixos, mas são um indicativo do comportamento, dado ensaios e parâmetros de outros estudos. Pode-se avaliar que solos com parâmetros de erodibilidade  $K$  menores que 0,001 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa são pouco erodíveis, ao passo que solos com  $K$  superiores a 0,1 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa apresentam alta erodibilidade.

<sup>3</sup> Solo 1 I 5-10, Solo 2 I 5-10, Solo 1 R1 10-10, Solo 2 I 10-10, Solo 2 I 10-15, Solo 2 R 10-10 e Solo 3 I 25-20

FIGURA 5.23 – Aplicação dos resultados no critério de erodibilidade proposto por Bastos (1999)



FONTE: Adaptado de Bastos (1999), com dados do autor

Os resultados dos casos analisados indicam que o Solo 1 encontra-se no limite entre a categoria Erodibilidade Alta (I) e Erodibilidade Média (II), com uma pequena redução na erodibilidade da amostra com 0,5 g de raízes (R05). Já o Solo 2 apresenta valores dentro da faixa de Erodibilidade Média, com maior valor para o caso R05. Foi observado uma maior dispersibilidade dos resultados no caso do Solo 1. Para o Solo 3, o valor de  $K$  de 0,028 g/cm²/min/Pa se situa dentro da faixa de erodibilidade média.

Aplicou-se os resultados no critério de erodibilidade proposto por Briaud (2008). O critério utiliza um gráfico bi-log, em que no eixo y é plotado a taxa de erosão (comprimento/tempo) e no eixo x a tensão de cisalhamento hidráulica do ensaio.

O critério foi concebido para unificar resultados de diversos tipos de ensaio de erodibilidade, porém, os autores não citam resultados de ensaios tipo Inderbitzen. Para aplicação dos resultados do presente trabalho no critério, um método foi desenvolvido, baseado no cálculo de uma velocidade de erosão (taxa).

Segundo Briaud et al. (2019), a taxa de erosão do solo pode ser identificada de várias formas, a depender do tipo de ensaio. Usualmente, a taxa é expressa através de três possíveis formas:

- Alterações na profundidade do solo sob uma tensão de cisalhamento hidráulica específica induzida por fluxo, como no ensaio *Jet Erosion Test*;
- Mudanças do volume do solo durante um período, enquanto o corpo de prova é submetido a uma tensão de cisalhamento hidráulica;
- Alterações na massa do corpo de prova ou coleta de material desprendido, comumente expressada por massa erodida por unidade de área, como no ensaio *Hole Erosion Test*.

Como a proposição de Briaud (2008) não contempla ensaios tipo Inderbitzen, para aplicação dos resultados na classificação, uma proposta baseada na última abordagem foi empregada.

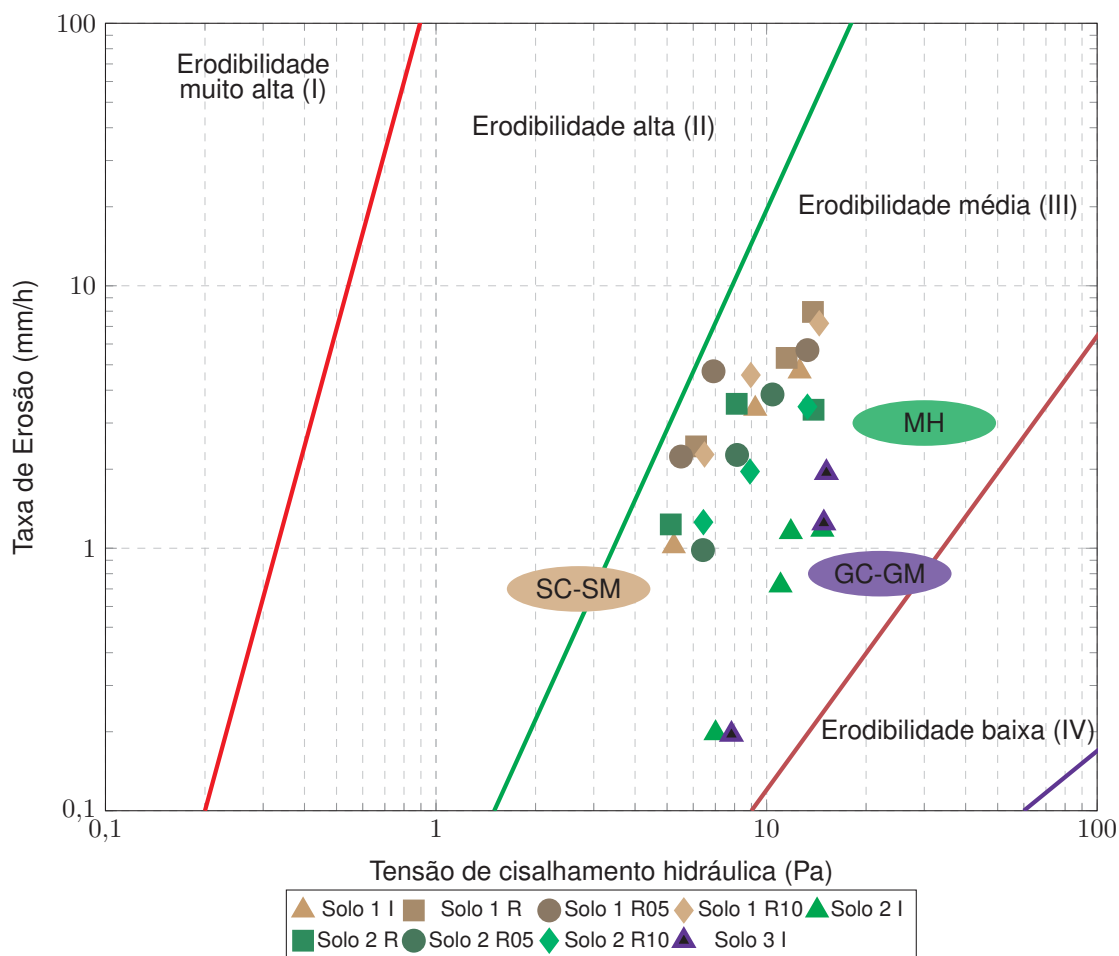
Os resultados do ensaio Inderbitzen são em unidade de massa por área. Para o cálculo da taxa de erosão, dividiu-se a massa de solo acumulada até 6 minutos pelo tempo considerado (como na definição de  $K$ ). Esse parâmetro foi dividido pelo peso específico aparente seco da amostra ( $\gamma_d$ ), gerando uma taxa com unidade de velocidade. Por fim, a unidade foi convertida para mm/h. A proposta descrita é apresentada na Equação 5.3.

$$\varepsilon = \frac{m(0 - t_6)}{AA \cdot t(6) \cdot \gamma_d} \times 600 \quad (5.3)$$

onde:  $\varepsilon$  = taxa de erosão (mm/h);  $m(0 - t_6)$  = massa de solo coletado de 0 a 6 min (g);  $AA$  = área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>);  $t(6)$  = Tempo considerado (6 min);  $\gamma_d$  = massa específica aparente seca (g/cm<sup>3</sup>); 600 = fator de conversão de unidade (de cm/min para mm/h).

O gráfico com a classificação para os 28 ensaios Inderbitzen realizados é apresentado na Figura 5.24. No eixo x, foram plotados os valores de tensão hidráulica cisalhante, calculada pela Equação 2.10. No eixo y a taxa de erosão, calculada com a Equação 5.3.

FIGURA 5.24 – Aplicação dos resultados dos ensaios Inderbitzen no critério de Briaud (2008)



NOTA: SC-SM = Areia Argilo-Siltosa, MH = Silte plástico arenoso, GC-GM = Pedregulho argilo-siltoso  
 FONTE: Adaptado de Briaud et al. (2019), com dados do autor

Na Figura 5.24, foram plotadas as siglas do sistema unificado de classificação de solos (SUCS) correspondentes às classificações dos três solos analisados nas faixas de erodibilidade típicas de cada grupo. A análise de classes de erodibilidade para cada grupo do SUCS foi apresentada por Briaud et al. (2019). É possível notar que os solos analisados tiveram comportamento próximo ao esperado, considerando o posicionamento de solos de mesma classificação na figura.

Quando comparado ao critério de erodibilidade de Briaud (2008), verifica-se que os resultados foram próximos aos resultantes da proposta de Bastos (1999). Em ambos os critérios, os solos ensaiados permaneceram na zona de erodibilidade média, com as amostras de Solo 1 mais próximas do limite entre erodibilidade média e alta. Em ambos os critérios, as amostras indeformadas do Solo 2 e Solo 3 foram as menos erodíveis.

A aplicação dos parâmetros do ensaio Inderbitzen no critério de Briaud (2008) necessita de validação através de outros ensaios de erosão, como o *Erosion Function*

*Apparatus* (EFA). Para a concepção dos limites da Figura 5.24 (também apresentado na Figura 2.5 e 2.6), foram utilizados 180 ensaios tipo EFA ((BRIAUD et al., 2019)).

Porém, a proximidade dos resultados com a proposta de Bastos (1999) pode indicar que a utilização da Equação 5.3, com a divisão da massa de solo coletada por tempo pelo peso específico aparente seco da amostra, parece se adequar ao uso do gráfico. Apesar disso, a falta da estimativa direta da velocidade de água não torna possível utilizar a versão do gráfico com esse parâmetro (Figura 2.6). Cita-se também como limitação a baixa amplitude de tensões de cisalhamento hidráulicas possíveis de se aplicar no equipamento desenvolvido na presente pesquisa, o que não torna possível a verificação de todas as classes de erosão da proposta.

Quanto aos resultados dos ensaios Inderbitzen, apesar de diferenças e inovações no equipamento utilizado na presente pesquisa, pode-se realizar comparações com outras pesquisas.

No trabalho de Bastos (1999), o autor realizou ensaios de erosão Inderbitzen em solos saprolíticos e tropicais não saturados, em condições naturais, seca e pré-úmida. Na umidade natural, o autor encontrou valores de coeficiente  $K$  variando entre 0,0007 a 0,363 g/cm<sup>2</sup>/min/Pa, com tensões hidráulicas críticas variando entre 0,56 Pa a 1,25 Pa. Os valores de  $K$  obtidos por Bastos (1999) são comparáveis aos obtidos na presente pesquisa. Porém, as tensões hidráulicas críticas foram da ordem de 2 vezes maiores no presente trabalho. O autor cita que existiram várias indefinições no cálculo da tensão cisalhante crítica ( $\tau_c$  negativos), ressaltando uma possível dificuldade do ensaio Inderbitzen em estimar tal parâmetro.

Venturini (2019) avaliou a influência da adição de raízes de uma gramínea em um solo arenoso na erodibilidade através de ensaios Inderbitzen. O solo utilizado pela autora classifica-se como solo erodível dentro do critério de Bastos (1999). Ao comparar amostras remoldadas sem raízes com amostras remoldadas com 1,5% de raízes, a taxa de erodibilidade teve um decréscimo de 38,99%, considerando o solo na umidade natural. A redução para amostras seca ao ar foi de 79,84% e na condição pré-úmida foi de 90,44%.

Ghebreiyessus et al. (1994) realizaram ensaios em um canal hidráulico, com variações na massa específica aparente das amostras ( $\rho_b$ ). Os autores utilizaram tensões hidráulicas cisalhantes de 1,1 a 15 Pa e amostras com 10,2 cm de diâmetro. No geral, a relação entre  $\tau$  e massa erodida obtida pelos autores foi linear. Os valores de  $K$  encontrados pelos autores foram de 1,10 g/m<sup>2</sup>/s/Pa para solo com 1,4 g/cm<sup>3</sup> de massa específica e 0,23 g/m<sup>2</sup>/s/Pa para solos reconstituídos com 1,2 g/cm<sup>3</sup>, com tensões críticas ( $\tau_c$ ) de 4 Pa e 1,3 Pa, respectivamente. Apesar da natureza diferente dos ensaios, os valores de tensão crítica e  $K$  são comparáveis entre os dois estudos, bem como a massa específica das amostras reconstituídas.

De Baets et al. (2006) avaliaram a erodibilidade de solos superficiais com raízes em um canal hidráulico. Os autores utilizaram densidades radiculares de 0 a 4 kg/m<sup>3</sup> (comparados aos valores de 1,409 kg/m<sup>3</sup> (R05) e 2,920 kg/m<sup>3</sup> (R10) do presente estudo). Os resultados indicaram uma redução nas taxas de erosão em amostras com raízes de pequeno diâmetro da ordem de 95%, com densidade radicular de 4 kg/m<sup>3</sup>, comparando-se a condição sem nenhum tipo de cobertura. A redução de erodibilidade obtida no presente trabalho diferiu dos resultados dos autores, devido a pequena diferença nos resultados com e sem adição de raízes. Esse fato pode ser explicado pela utilização de amostras cultivadas e espécies com raízes muito finas no trabalho de De Baets et al. (2006), o que difere dos procedimentos utilizados no presente trabalho.

As tensões hidráulicas cisalhantes críticas obtidas nos ensaios Inderbitzen foram comparadas com os valores da Tabela 2.2, que indicam o valor limite para início do processo de erosão fluvial (DURLO; SUTILI, 2014). A comparação entre as tensões de erosão limites indicadas e os resultados obtidos nos ensaios Inderbitzen é realizada na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 – Comparativo entre os valores de tensão de cisalhamento limite para o início da erosão fluvial e tensões de cisalhamento críticas obtidas

|        | Tensão erosão limite |                           |                 | Ensaio realizado          |
|--------|----------------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
|        | $\tau_c$             | Descrição                 | $\tau_{limite}$ | Classificação do solo     |
| Solo 1 | 2,65 Pa              | Areia argilo-siltosa      | 2,5 Pa          | Areno-argiloso com coesão |
| Solo 2 | 4,84 Pa              | Silte plástico arenoso    | 2,5 Pa          | Deposições argilosas      |
| Solo 3 | 6,83 Pa              | Pedregulho argilo-siltoso | 4,0 Pa          | Areias muito grossas      |

Na comparação realizada pela Tabela 5.3, o Solo 1 possui uma descrição e valor comparável em valor e descrição do Areno-Argiloso com coesão. No Solo 2 e 3 não foram localizadas descrições diretamente comparáveis. O Solo 2 posiciona-se entre a faixa de deposições argilosas ( $\tau_{limite} = 2,5$  Pa) e argilas rijas ( $\tau_{limite} = 12$  Pa) e o Solo 3, que tem distribuição granulométrica de pedregulho, possui  $\tau_c$  superior a areias muito grossas. Esses resultados indicam que apenas o Solo 1 encontrou uma correspondência em magnitude da tensão crítica cisalhante e descrição, quando comparados com valores da DIN (1998).

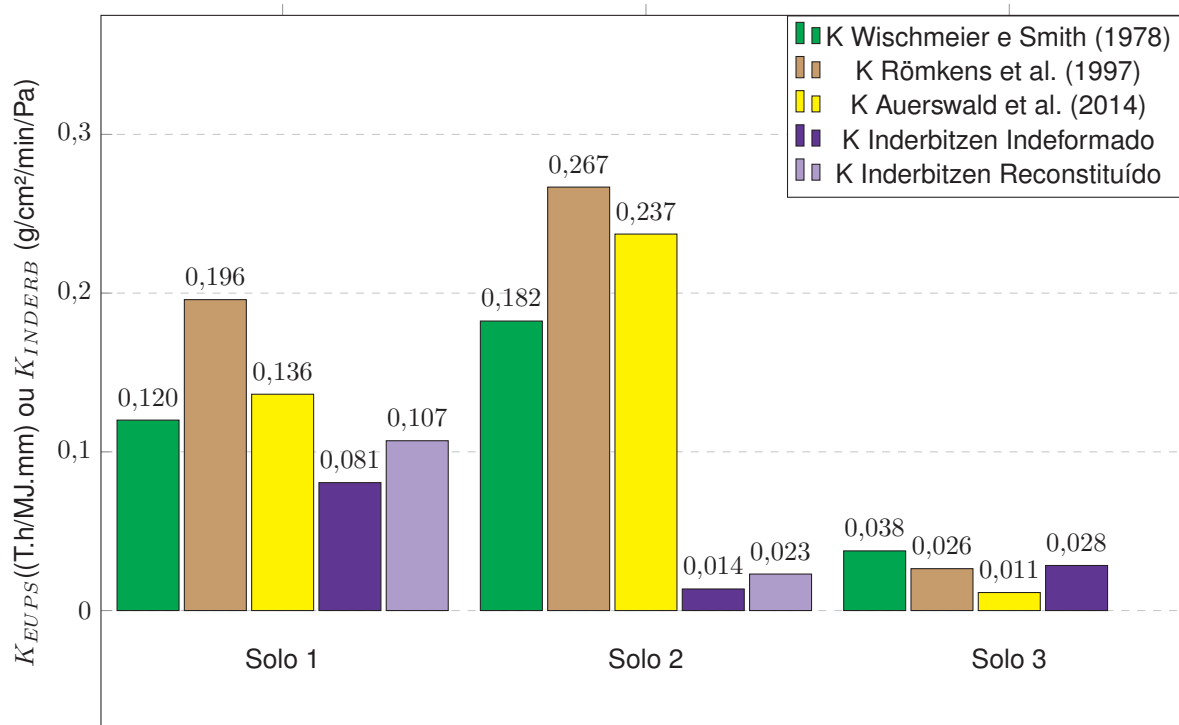
### 5.3 PROJETO BÁSICO DA ESTRUTURA DE ESTABILIZAÇÃO

Esta seção apresenta detalhes do projeto básico de estabilização do canal de drenagem da Rua Cyro Correia Pereira. Foi utilizado o levantamento de informações do Capítulo 3 e as concepções do projeto conceitual, apresentado na seção 3.3. Para o projeto, uma estimativa de erosão com base nos ensaios de laboratório e modelagem de literatura foi realizada.

#### 5.3.1 Definição do fator de erodibilidade $K_{EUPS}$ e demais parâmetros de projeto

O fator de erodibilidade  $K_{EUPS}$  foi determinado utilizando as formulações de Wischmeier e Smith (1978) (Equação 2.2), Römken et al. (1997) (Equação 2.3) e Auerswald et al. (2014) (Equação 2.5). Os dados de entrada utilizados foram a distribuição granulométrica do solo, teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade, sendo estes dois últimos qualitativamente determinados. Os valores de fator de erodibilidade da EUPS foram comparados com o parâmetro  $K$  obtido nos ensaios Inderbitzen, para amostras indeformadas e reconstituídas (Figura 5.16, 5.17 e 5.18). Os resultados das formulações e o comparativo realizado são apresentados na Figura 5.25.

FIGURA 5.25 – Comparativo entre a definição do Fator  $K_{EUPS}$  e o  $K$  estimado nos ensaios Inderbitzen



FONTE: O autor

Não foi possível estabelecer uma relação direta entre o fator  $K_{EUPS}$  e o parâmetro  $K$  do ensaio Inderbitzen. Enquanto o Solo 2 apresentou os maiores fatores de erodibilidade através das equações, o solo mais erodível nos ensaios Inderbitzen foi o Solo 1. Apenas nos resultados do Solo 3 os valores se aproximaram.

Essa falta de uma relação clara entre os dois parâmetros pode ser justificada pela diferença entre o banco de dados de solos utilizado para a criação das equações com os solos ensaiados no presente trabalho. A erosão de material fino, não detectado no ensaio Inderbitzen, também pode ter alterado os resultados. Uma outra justificativa possível é devido ao alto teor de matéria orgânica dos solos avaliados (Figura 5.6), não existir correspondências nas formulações. Mesmo na proposta de Auerswald et al. (2014), criada para cobrir lacunas da formulação de Wischmeier e Smith (1978), o comportamento do fator  $K_{EUPS}$  foi diferente do observado nos ensaios de erosão.

O objetivo do comparativo não era de se obter parâmetros de mesma ordem, dado a diferença de natureza entre o fator e o parâmetro, e a diferente unidade. Porém, era esperado que os fatores de erodibilidade da EUPS acompanhassem os resultados experimentais de erosão.

Observa-se na Figura 5.25 que existe uma ordem de grandeza semelhante entre as três proposições para estimativa do fator  $K_{EUPS}$ . A equação apresentada por Römken et al. (1997) gerou os maiores valores de  $K$  para o Solo 1 e 2. A proposta de Auerswald et al. (2014), por ser formulada com base no nomograma de Wischmeier, apresenta bastante proximidade em valores. A formulação de Auerswald et al. (2014) apresentou-se como mais correta para a estimativa do fator  $K_{EUPS}$  para os solos em estudo, visto que não existe correspondência no nomograma para os altos valores de matéria orgânica obtidos (superiores a 5%). Para o Solo 3, de elevada fração pedregulhosa, a estimativa pelo nomograma também não encontra correspondência.

Bastos (1999) realizou comparações entre o parâmetro  $K$  do ensaio de erosão Inderbitzen com os valores obtidos no nomograma de Wischmeier. Os resultados indicaram uma relação entre os parâmetros, porém, não são apresentadas formulações matemáticas no comparativo. Segundo o autor, o fator  $K_{EUPS}$  igual a 0,2 permite separar solos de baixa/média erodibilidade de solos de alta erodibilidade. Nessa definição, o Solo 2 da presente pesquisa seria classificado como alta erodibilidade, enquanto os Solos 1 e 3 teriam baixa erodibilidade, dado os fatores  $K_{EUPS}$  calculados.

A estimativa de parâmetros de erodibilidade por diferentes metodologias permite uma melhor previsão da erosão em modelagem. Conforme levantado no referencial teórico, a EUPS pode ser empregada no dimensionamento racional de estruturas em Engenharia Natural, para determinações de distância entre elementos (GAVASSONI; GARCIA, 2010) e verificações em inclinações de retroaterros. Um valor de perda de solo considerado aceitável está na faixa de 10-11 t/ha.ano (RUSSO; GAVASSONI, 2011),

porém valores menores que 2 t/ha.ano são recomendados em áreas ambientalmente sensíveis onde a camada de solo é fina (< 2 m) ou muito erodível (MORGAN, 2009).

No próximo item, apresenta-se os detalhes do projeto básico de recuperação do canal de drenagem da rua Cyro Correia Pereira, com estabilizações das margens em soluções tradicionais e de Engenharia Natural.

### 5.3.2 Detalhamento da estrutura de estabilização das margens do canal de drenagem

Baseado nos levantamentos de campo, descrição da região e projeto conceitual, apresentados no Capítulo 3, foi realizado um projeto básico de estabilização das margens e contenção de processos erosivos. A partir da seleção de técnicas (Figura 3.15), escolheu-se as estabilizações em gabião caixa, paliçada viva e esteira viva. Cada uma das soluções foi selecionada como mais adequada para cada trecho do canal.

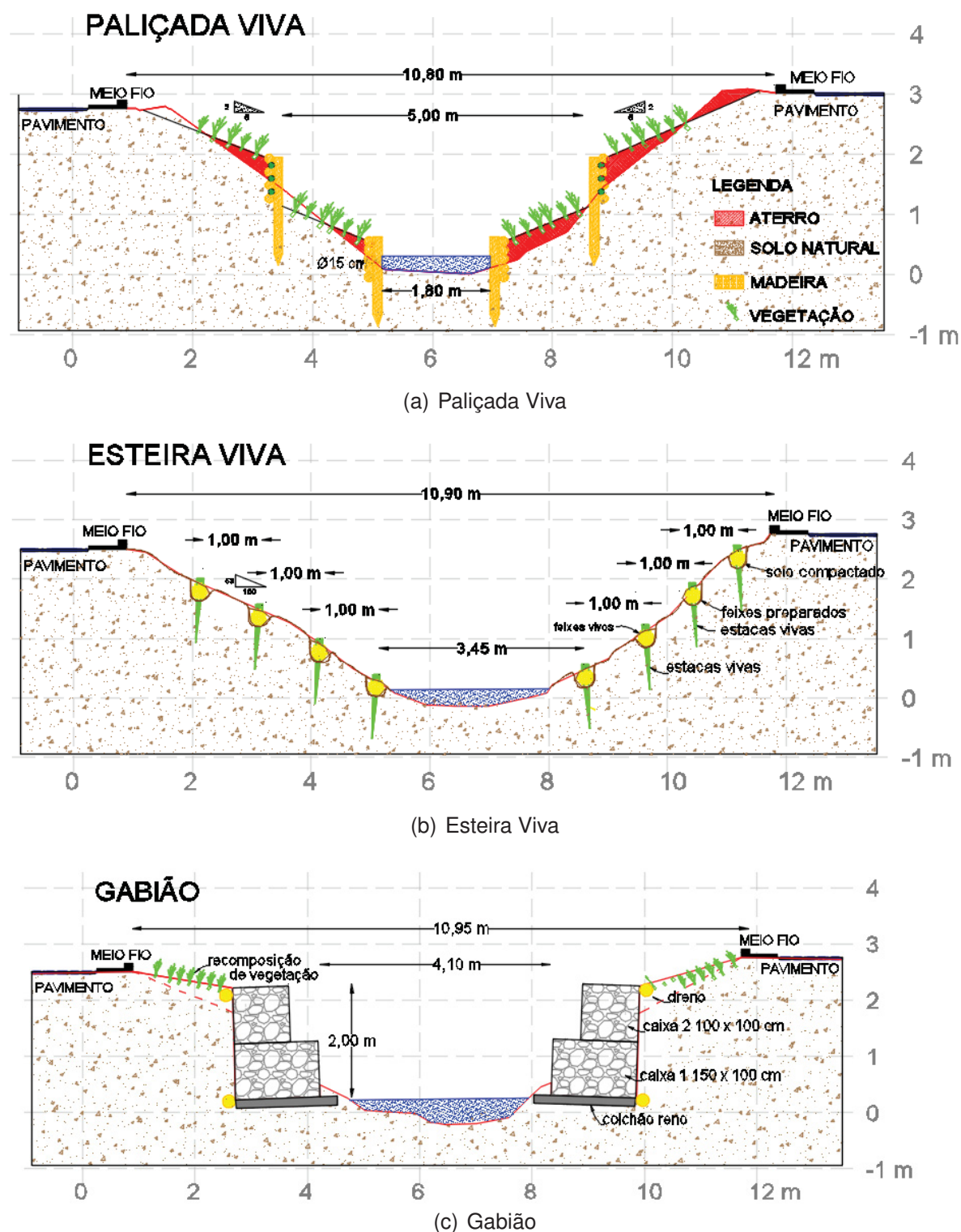
As seções transversais básicas de cada solução são apresentadas na Figura 5.26, com implantação exibida na Figura 5.27. Para o dimensionamento, levou-se em consideração os aspectos hidráulico-hidrológicos, para definição da seção de vazão, além de um dimensionamento geotécnico e estrutural dos elementos. As verificações de erosão foram realizadas através da Equação EUPS (Equação 2.1), com fatores de erodibilidade da proposição de Auerswald et al. (2014), calculados e apresentados na Figura 5.25. Na região da paliçada viva, pertencente a um depósito do Solo 2, devido à discrepância entre o valor do  $K_{EUPS}$  e  $K$  do ensaio Inderbitzen para esse caso, o valor de  $K_{EUPS}$  utilizado foi dividido por dois.

Alguns elementos complementares adicionados foram: drenos no tardo do gabião; geomantas nas áreas entre esteira viva e um segundo nível de paliçada, de forma a garantir a seção de escoamento e as verificações de tombamento.

Para nível executivo, deve-se realizar o detalhamento do encontro entre diferentes soluções, encontro entre estruturas de estabilização e passagens de rua com bueiros de greide e detalhes das saídas das bocas de lobo no canal de drenagem. Uma estimativa de custos totais envolvidos na obra também é parte do projeto executivo.

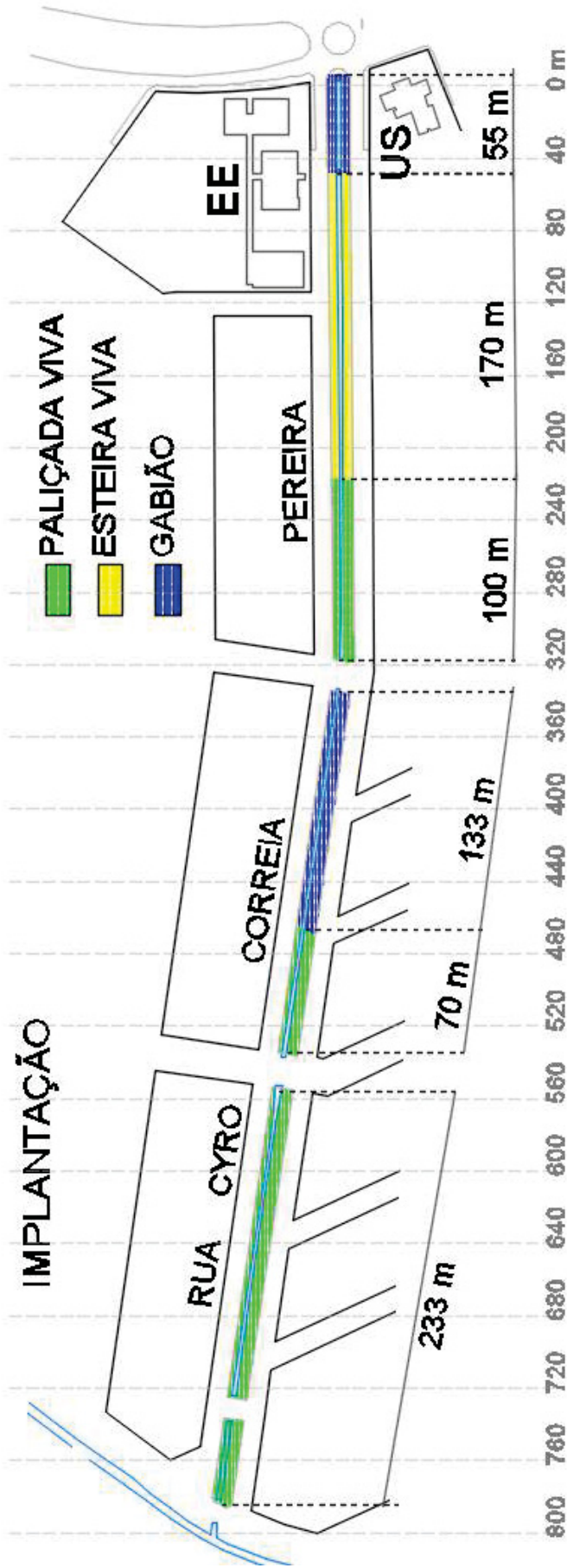
Um memorial de cálculo das três estruturas é apresentado no Apêndice C. Utilizou-se proposições da literatura para o dimensionamento das peças relacionadas a Engenharia Natural e o software GawacWin 2.0 (MACCAFERRI, 2003) para as verificações do muro gabião. No Apêndice D, apresenta-se uma prancha do detalhamento das seções e implantação.

FIGURA 5.26 – Seções transversais das soluções de estabilização das margens do canal da Rua Cyro Correia Pereira



FONTE: O autor

FIGURA 5.27 – Implantação da solução de estabilização da margem



FONTE: O autor

## 6 CONCLUSÕES

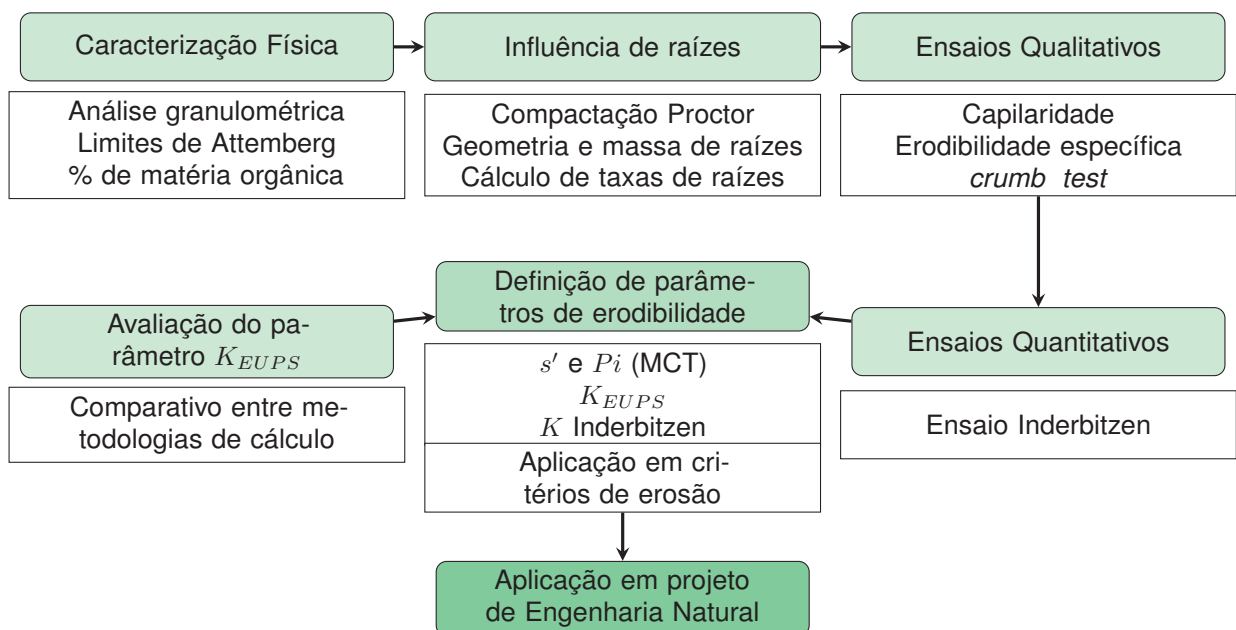
Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o estudo. Foram aplicadas metodologias experimentais para determinação de erodibilidade, incluindo o desenvolvimento de rotinas de ensaios e alterações nos equipamentos utilizados. A análise não se limitou aos métodos descritos na literatura, sendo também apresentadas novas propostas para avaliação dos resultados.

No trabalho, apresenta-se uma caracterização da região em estudo, tendo em vista a obtenção de dados necessários ao desenvolvimento experimental e a produção de um projeto conceitual e básico de estabilização para as margens do canal avaliado. O conjunto de ensaios realizados permitiram uma análise de erosão de uma forma analítica dentro do projeto.

Retomando o principal objetivo proposto na pesquisa, de apresentar uma metodologia de análise de erodibilidade de solos no contexto da Engenharia Natural, os métodos descritos e os resultados obtidos foram considerados suficientes, obtendo-se uma estimativa do comportamento frente à erosão hídrica para os três solos analisados.

A Figura 6.1 apresenta um fluxograma-resumo da proposta de metodologia de ensaios e estimativa de parâmetros para a avaliação de erodibilidade.

FIGURA 6.1 – Síntese da metodologia proposta de ensaios e avaliação de parâmetros de erodibilidade



FONTE: O autor

Dentro da metodologia proposta, avaliou-se apenas a resposta física do solo frente à erosão. A avaliação química necessita de outros ensaios, de forma a verificar a influencia da composição mineralógica, presença de argilominerais, lixiviação e outros processos químicos na erodibilidade do solo. Além disso, a avaliação química permite verificar as condições de nutrientes no solo, tendo em vista o plantio de espécies vegetais em aplicações de Engenharia Natural. Para o dimensionamento geotécnico, a avaliação mecânica do solo, na forma de ensaios de campo e laboratório, também são parâmetros importantes para o projeto.

Na sequência do capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas com relação aos objetivos específicos da pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros. As conclusões abordam os resultados dos ensaios realizados, a avaliação da metodologia experimental proposta, a montagem do equipamento Inderbitzen e o projeto de estabilização das margens do canal.

## 6.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EROSÃO E ANÁLISE DA METODOLOGIA PROPOSTA

Através da avaliação de erodibilidade dos três solos ensaiados, o Solo 1 foi classificado como erodível, segundo a classificação de erodibilidade MCT, a quantidade de material carregado nos ensaios Inderbitzen e a aplicação do parâmetro  $K$  nos critérios de erodibilidade de Bastos (1999) e Briaud (2008).

O Solo 2, de matriz argilosa, apresentou-se como medianamente erodível, estando dentro desta faixa em todos os critérios analisados. Este solo é encontrado principalmente no fundo do canal, estando sujeito principalmente à erosão fluvial.

O Solo 3, de granulometria grossa e pedregulhosa, mostra resultados semelhantes a solos pouco erodíveis nas avaliações qualitativas, mas encontra-se dentro do grupo de medianamente erodível dentro dos critérios empregados com base nos resultados dos ensaios Inderbitzen. O Solo 3 encontra-se em uma área de grande movimentação do canal, podendo indicar que a origem do movimento é causada por uma combinação de ações erosivas, geométricas e de resistência.

Comparando-se as curvas granulométricas e limites de Atterberg, verifica-se que os três solos possuem diferentes classificações. O Solo 2 apresenta alta plasticidade e elevado teor de finos. Os Solos 1 e 3 apresentam-se como solos grossos, de composição arenosa e pedregulhosa, respectivamente. Apesar disso, todos possuem uma fração fina, o que os confere certa plasticidade. Nos ensaios realizados, observou-se que solos de matriz arenosa são mais erodíveis, em um comparativo com solos argilosos.

A determinação do teor de matéria orgânica dos solos é um parâmetro importante na avaliação de erodibilidade. As altas taxas de matéria orgânica obtidas podem ser explicadas pelo local de coleta ser próximo a superfície. Na formulação de Wischmeier e Smith (1978), os solos não encontram valor de  $K_{EUPS}$  correspondente para essa quantidade de matéria orgânica, sendo necessário a aplicação de outras formulações (p. ex. Auerswald et al. (2014)).

Através da curva de compactação dos solos, avaliou-se que o Solo 2 não é um bom solo para compactação, com curva praticamente horizontal e alto valor de umidade para atingimento da densidade máxima. Esse fato pode ser explicado pela alta plasticidade e matriz argilosa do mesmo.

Quanto à ensaios qualitativos de erosão, a realização do ensaio *crumb test* é uma forma rápida e preliminar de avaliar a resposta do solo à erosão hídrica. Nos resultados, foi possível avaliar que a dispersibilidade dos solos no ensaio corresponde aos resultados de outros ensaios de erosão. O Solo 1, altamente dispersível foi avaliado como o mais erodível e o Solo 3, de baixa dispersão, foi o menos susceptível à erosão hídrica em outros ensaios. Outro fato observado foi que não houve significativas diferenças entre amostras indeformadas e reconstituídas no ensaio *crumb test*.

A metodologia qualitativa de classificação de erodibilidade MCT pode ser considerada um método rápido e de baixo custo para avaliação da resposta de solos à erosão, permitindo também identificar singularidades de solos tropicais, através do ensaio de capilaridade. Dentro da metodologia, os Solos 1 e 2 se apresentaram como erodíveis e o Solo 3 como não erodível. A classificação contém apenas duas distinções: erodível e não erodível. Caso existissem classes intermediárias, os resultados poderiam ser comparados à outras classificações.

O ensaio de erosão Inderbitzen, cuja concepção do equipamento foi tema avaliado no trabalho, foi o que possibilitou maiores quantidades de resultados e comparativos. A avaliação das curvas de material erodido X tempo e material erodido X inclinação permitiu clara identificação dos resultados, sendo o Solo 1 o mais erodível. Também foi possível verificar que a erosão na amostra é diretamente proporcional a inclinação do equipamento e, conseqüentemente, a tensão hidráulica de cisalhamento aplicada.

A definição da tensão de cisalhamento crítica ( $\tau_c$ ) e a taxa de erodibilidade  $K$  a partir de um conjunto de três ensaios Inderbitzen permitiu a aplicação nos critérios de erosão de Bastos (1999) e Briaud (2008), comparando-se diferentes casos. Nos critérios, o Solo 1 se apresentou como o mais erodível, seguido pelo Solo 2 e Solo 3.

A aplicação no critério de Briaud (2008) foi validada pela proximidade com o critério de Bastos (1999) e através da classificação SUCS, sendo que os solos apre-

sentaram comportamento semelhante ao indicado para seu grupo, segundo resultados apresentados em Briaud et al. (2019).

Quanto ao objetivo específico de verificar a influência da adição de raízes na forma de fibras aleatórias nos resultados de ensaios de erosão, as raízes de Capim Vetiver não geraram resultados conclusivos, nas quantidades adicionadas aos corpos de prova.

A realização dos ensaios com raízes, nos teores de 0,5 g e 1 g por corpo de prova, geraram reduções no material carreado, em um comparativo com amostras reconstituídas sem raízes, porém, com pequenas diferenças entre os casos. Pode-se notar que as amostras R10 (1 g de raízes) apresentaram melhores resultados. Apesar de estar dentro da faixa utilizada em ensaios de outros pesquisadores, a taxa de raízes utilizada foi considerada baixa, além do método de mistura aleatória como fibras diferir muito da coleta de amostras com raízes naturais.

Em todos os casos, as amostras no estado natural apresentam menor erodibilidade quando comparadas a amostras reconstituídas, mesmo com a adição de raízes. Essa conclusão pode ser explicada pela conservação de forças coesivas e de cimentação nas amostras indeformadas, condições quebradas na reconstrução de amostras.

## 6.2 MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE ENSAIOS INDERBITZEN

Considerando os aspectos de montagem e desenvolvimento do equipamento de ensaios Inderbitzen, pode-se concluir que o equipamento atendeu as expectativas e possibilitou a realização de ensaios de forma comparativa.

Na execução dos ensaios, conclui-se que a utilização de peneiras 0,42 mm (#40) e 0,075 mm (#200) foi adequada, obtendo-se informações do diâmetro das partículas erodidas. Em outros estudos, pode ser utilizada a série completa da NBR 7181 (ABNT, 2016c), além de peneiras de aberturas menores, fora da série, para a coleta de maiores teores de finos.

O equipamento desenvolvido permitiu maior produtividade na realização de ensaios, permitindo 3 ensaios diários. A utilização de um reservatório abaixo do conjunto de peneiras e recirculação de água foi adequada, possibilitando economias no consumo de água e maiores vazões na rampa, obtendo-se lâminas d'água com variações mais facilmente detectáveis.

Avaliou-se que o tempo para estabilização da perda de solo de 18 minutos foi suficiente, bem como a utilização 5 pontos para construção da curva perda de solo X tempo, com trocas de peneiras em intervalos não lineares. Na utilização de tensões hidráulicas cisalhantes altas, não foi possível concluir todas as trocas de

peneiras programadas, finalizando o ensaio antes do tempo previsto nesses casos. A utilização do tempo de 6 minutos para estimativa de taxas de erodibilidade mostrou-se correta, evitando a grande quantidade de material carregado no início do ensaio e a descaracterização da amostra ao final do mesmo, causado pelo surgimento de sulcos.

Foi conduzida uma verificação das medições de nível d'água e vazão no equipamento idealizado e construído para a presente pesquisa. Os valores de vazão atenderam a verificação proposta em 82% dos casos. Em 5 ensaios, o valor de vazão medido foi superior ao calculado mais a tolerância.

Sobre os resultados do ensaio, a não consideração do material erodido de diâmetro menor que 0,075 mm pode ser considerada uma limitação, visto que essa fração corresponde a uma faixa considerável da curva granulométrica de alguns solos, como o Solo 2 (75,5% de finos). Também como limitante, exclusivo do equipamento desenvolvido durante a presente pesquisa, cita-se a inclinação máxima de 15°, inclinação inferior a maioria dos taludes em condições naturais. Essa limitação se deve a alta turbulência do fluxo observada em maiores inclinações, devido a maior vazão utilizada no equipamento desenvolvido.

Nas amostras avaliadas, os efeitos de sucção e a sua influência na erodibilidade da amostra não foram variáveis consideradas, devido à falta de condições de monitorar este parâmetro nos corpos de prova. A sua avaliação pode ser importante em amostras com baixo teor de umidade, considerando que a queda da sucção durante o ensaio pode facilitar o processo de erosão da amostra.

O equipamento eletrônico desenvolvido para o Inderbitzen foi capaz de estimar a vazão e nível d'água, tendo ainda seus resultados corroborados por técnicas de verificação. No presente trabalho, foram utilizadas maiores vazões, em um comparativo com outros trabalhos da literatura, para criar maiores alturas de lâmina d'água e possibilitar a leitura eletrônica. Consequentemente, obtiveram-se maiores tensões cisalhantes. A instalação de mais medidores de nível d'água e de um transdutor de pressão transversal a rampa poderia tornar as medidas de tensão cisalhante mais acuradas, em novas construções do equipamento proposto.

Dado o projeto base descrito, a manufatura de um protótipo de melhor acabamento, com torre metálica de sustentação, fixação da amostra roscável, sistema de estabilização do escoamento da vazão da calha e mais medidores eletrônicos poderia tornar o ensaio bastante preciso, ao passo de um maior custo de montagem envolvido.

### 6.3 ESTIMATIVAS DE EROÇÃO E PROJETO DE ENGENHARIA NATURAL

A aplicação de formulações para estimativa do fator de erodibilidade  $K_{EUPS}$  gerou resultados diferentes dos observados com os ensaios de erosão. Quando comparados o fator  $K_{EUPS}$  com a taxa do ensaio Inderbitzen não se esperava uma paridade de valores, pela natureza diferente das formulações, mas um comportamento semelhante, fato que não foi observado. As três propostas para estimativa do fator  $K_{EUPS}$  empregadas conduziram a fatores bastante semelhantes entre si, mas indicaram o Solo 2 como o mais erodível, diferentemente dos ensaios de erosão.

Uma possibilidade levantada foi a erosão de materiais finos no Solo 2 ter influenciado no parâmetro  $K$  do ensaio Inderbitzen. Nesse caso, esse solo teria uma erodibilidade maior, não detectada no ensaio e com taxa comparável ao fator  $K_{EUPS}$ . Porém, essa avaliação não estaria de acordo com os ensaios qualitativos de erosão. Dentro da classificação de erodibilidade MCT, o Solo 2 se posicionou como menos erodível que o Solo 1, de maneira concordante com os resultados do Inderbitzen.

A utilização de formulações que foram desenvolvidas a partir de um banco de dados diferente deve ser feita com cautela e sem generalizações. A utilização da EUPS juntamente com ensaios de erosão em laboratório permite uma análise mais segura do problema e melhores estimativas.

A EUPS se mostra como viável para dimensionamentos em Engenharia Natural, podendo auxiliar na definição de dimensões e inclinações de cortes e aterros.

A coleta de três solos bastante distintos em um mesmo canal indica a grande variabilidade de solos da região. Conforme levantado nas cartas geológicas, a formação aluvionar contribui para esse fato. A análise de três tipos de solo permitiu uma investigação dos fenômenos erosivos, justificando a constatação de que os processos são muito variáveis na extensão do canal.

Quanto à estabilização das margens do canal da rua Cyro Correia Pereira, a produção de um projeto conceitual permitiu a identificação de trechos críticos e seleção de técnicas, facilitando o processo de dimensionamento e apresentação do projeto básico. As estruturas concebidas comprovam a viabilidade da aplicação de Engenharia Natural em canais de drenagem, frente às soluções tradicionais de Engenharia. Porém, alturas e inclinações grandes demandam estruturas inertes, capazes de suportar maiores carregamentos.

A realização de ensaios, estimativa de parâmetros e aplicação de formulações para previsão de comportamento é importante na concepção do projeto, tendo em vista um dimensionamento analítico das técnicas de Engenharia Natural.

Os ensaios de erosão permitem verificar áreas críticas e simular diferentes cenários. Juntamente com a metodologia experimental, propõe-se a realização de sondagens em campo, ensaios químicos no solo e uso de relatos de diferentes espécies com propriedades biotécnicas, para uma completa estimativa de dados de entrada para a concepção do projeto. Completa ainda a fase de projeto uma análise hidráulica-hidrológica, estrutural e econômica.

#### 6.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo como base pontos observados no presente trabalho e resultados de outras pesquisas descritas na bibliografia consultada, citam-se os seguintes itens como recomendações para trabalhos futuros:

- Repetição de ensaios de erosão com amostras compactadas com raízes, com diferentes espécies vegetais e taxas de raízes, podendo-se realizar também o plantio de mudas, cultivo e extração de corpos de prova para ensaios;
- No equipamento de ensaios Inderbitzen com recirculação de água, avaliação da turbidez da água no reservatório e correlação com teor de finos do solo, para estimativas do material carregado inferior a 0,075 mm;
- Variações na umidade inicial da amostra e peso específico, para se verificar a resposta frente à erosão hídrica;
- Verificação da influência da sucção da amostra nos resultados dos ensaios MCT e Inderbitzen;
- Avaliação da expansibilidade e atividade de solos argilosos na definição de parâmetros de erosão;
- Validação da proposição do uso do Inderbitzen na formulação de Briaud (2008), com ensaios tipo EFA, em diferentes tensões cisalhantes;
- Adição de mais variáveis na metodologia proposta, como a análise química do solo, verificando a relação de fenômenos químicos como laterização e lixiviação na erodibilidade do solo;
- Estudo sobre a validade das proposições de estimativa do fator de erodibilidade  $K_{EUPS}$  para solos brasileiros e avaliação de erodibilidade de solos lateríticos;
- Produção de projeto executivo para o canal da rua Cyro Correia Pereira, estimativa completa de custos e projeto de estabilização e recuperação para todos os canais do bairro Vitória Régia.

## REFERÊNCIAS

ACHARYA, M.S. Analytical Approach to Design Vegetative Crib Walls. **Geotechnical and Geological Engineering**, Springer, v. 36, n. 1, p. 483–496, 2018.

ARULANANDAN, K.; PERRY, E.B. Erosion in relation to filter design criteria in earth dams. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 109, n. 5, p. 682–698, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13601**: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo — Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 11682**: Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 13600**: Solo — Determinação do teor de matéria orgânica por queima à 440 °C. Rio de Janeiro, 1996.

AUERSWALD, K.; FIENER, P.; MARTIN, W.; ELHAUS, D. Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling: An alternative equation for determining USLE nomograph soil erodibility values. **Catena**, Elsevier, v. 118, p. 220–225, 2014.

BAPTISTA, M.B.; CARDOSO, A.S. Rios e cidades. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 20, n. 2, p. 124–153, 2013.

BARBOSA, M.C.R. **Estudo da aplicação do Vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos em taludes**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

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

BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W.Y.Y. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico–pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, p. 17–25, nov. 2000.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 2005.

BIGARELLA, J.J.; MARINI, O.J.; FUCK, R.A.; LOPES, J.A.; TREIN, E.; MURATORI, A.; DAIRIKI, P.; DAIRIKI, T. **Carta Geológica de Araucária**. Curitiba, 1966.

BISCHETTI, G.B.; DI FI DIO, M.; FLORINETH, F. On the origin of soil bioengineering. **Landscape Research**, Taylor & Francis, v. 39, n. 5, p. 583–595, 2014.

BOLDRIN, D.; LEUNG, A.K.; BENGOUGH, A.G. Correlating hydrologic reinforcement of vegetated soil with plant traits during establishment of woody perennials. **Plant and soil**, Springer, v. 416, n. 1-2, p. 437–451, 2017.

BOSCO, C.; RIGO, D. de; DEWITTE, O.; POESEN, J.; PANAGOS, P. Modelling soil erosion at European scale: towards harmonization and reproducibility. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Copernicus GmbH, v. 15, n. 2, p. 225–245, 2015.

BRAJA DAS, M. **Principles of geotechnical engineering**. 7. ed. Madrid, Spain: Cengage Learning, 2013.

BRIAUD, J.L. Case histories in soil and rock erosion: woodrow wilson bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 134, n. 10, p. 1425–1447, 2008.

BRIAUD, J.L.; SHAFII, I.; CHEN, H.C.; MEDINA-CETINA, Z. **Relationship Between Erodibility and Properties of Soils**. Washington, DC: The Nacional Academies Press, 2019.

BURIAN, S.J.; EDWARDS, F.G. Historical perspectives of urban drainage. In: GLOBAL Solutions for Urban Drainage. [S.l.: s.n.], 2002. P. 1–16. DOI: 10.1061/40644(2002)284.

- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M. de; MELO, M.T.S. **Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro**. Brasília: UNB: Editora FINATEC, 2006.
- CAMPOS, C.J.M. **Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru-SP**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo.
- CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008.
- CASSOL, E.A.; SILVA, T.S. da; ELTZ, F.L.F.; LEVIEN, R. Soil erodibility under natural rainfall conditions as the K factor of the universal soil loss equation and application of the nomograph for a subtropical Ultisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 42, 2018.
- CAZZUFFI, D.; CARDILE, G.; GIOFFRÈ, D. Geosynthetic engineering and vegetation growth in soil reinforcement applications. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, Springer, v. 1, n. 3-4, p. 262–300, 2014.
- CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais de 1991 a 2010: volume Brasil**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- CHAMECKI, P.R. **Metodologias de laboratório para estudos da erosão hídrica em solos**. 2002. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CHAVES, T.A.; ANDRADE, A.G. **Capim Vetiver: produção de mudas e uso no controle da erosão e na recuperação de áreas degradadas**. Rio de Janeiro, 2013.
- CLIMATEMPO. **Climatologia de Curitiba-PR**. Curitiba, 2020. : <https://www.climatepo.com.br/climatologia/271/curitiba-pr>.
- COMEGNA, L.; DAMIANO, E.; GRECO, R.; GUIDA, A.; OLIVARES, L.; PICARELLI, L. Effects of the vegetation on the hydrological behavior of a loose pyroclastic deposit. **Procedia Environmental Sciences**, Elsevier, v. 19, p. 922–931, 2013.
- COPPIN, N.J.; RICHARDS, I.G. **Use of vegetation in civil engineering**. London: Ciria Butterworths, 1990.

CURITIBA. **Plano Diretor da Cidade**. Curitiba, 2015.

DE ANTONIS, L.; MOLINARI, V.M. **Ingegneria naturalistica: nozioni e tecniche di base**. Milano: CSEA, 2007.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; GYSSELS, G.; KNAPEN, A. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. **Geomorphology**, Elsevier, v. 76, n. 1-2, p. 54–67, 2006.

DE BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; DE BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant and soil**, Springer, v. 305, n. 1-2, p. 207–226, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. **DNER ME 093/1994**: Solo - Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ISF-229**: Projeto de proteção vegetal de taludes. Rio de Janeiro, 2015. P. 16.

DOS SANTOS, V.C.; STEVAUX, J.C. Processos fluviais e morfologia em confluências de canais: uma revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, 2017.

DUNKERLEY, D. Measuring interception loss and canopy storage in dryland vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. **Hydrological Processes**, Wiley Online Library, v. 14, n. 4, p. 669–678, 2000.

DURLO, M.; SUTILI, F. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**. Santa Maria: Edição do autor, 2014. v. 3.

EFIB. **European Guidelines for soil and water bioengineering**. Germany: Europäische Föderation für Ingenieurbiologie, 2015.

EVETTE, A.; LABONNE, S.; REY, F.; LIEBAULT, F.; JANCKE, O.; GIREL, J. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. **Environmental Management**, Springer, v. 43, n. 6, p. 972, 2009.

- FÁCIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Brasília, Brasília.
- FENDRICH, R. **Chuvas Intensas para Obras de Drenagem no estado do Paraná**. Curitiba: Editora Champagnat, 1998.
- FENDRICH, R.; OBLADEN, N.L.; AISSE, M.M.; GARCIAS, C.M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba: Champagnat, 1997. v. 4.
- FERNANDES, J.P. **Introdução à engenharia natural**. Évora, Portugal: EPAL, 2011.
- FERNANDES, J.P.; GUIOMAR, N. Simulating the stabilization effect of soil bioengineering interventions in Mediterranean environments using limit equilibrium stability models and combinations of plant species. **Ecological Engineering**, Elsevier, v. 88, p. 122–142, 2016.
- FRAGASSI, P.F.M.; MARQUES, E.A.G. Desenvolvimento de uma nova versão do aparelho Inderbitzen. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. [S.l.]: ABGE, 2001. v. 7.
- FREIRE, E.P. Ensaio Inderbitzen modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: I Simpósio Nacional de Controle de Erosão. [S.l.]: ABGE, 2001. v. 7. P. 1–8.
- FRÓES, A.C.S. **Ideologia ambiental no planejamento e produção do urbano em Curitiba: estudo de caso do Projeto Viva Barigui**. 2019. Diss. (Mestrado) – UFPR, Curitiba.
- GABRIELI, F.; LAMBERT, P.; COLA, S.; CALVETTI, F. Micromechanical modelling of erosion due to evaporation in a partially wet granular slope. **International journal for numerical and analytical methods in geomechanics**, Wiley Online Library, v. 36, n. 7, p. 918–943, 2012.
- GARCIA-VEGA, A.; SANZ-RONDA, F.J.; FUENTES-PÉREZ, J.F.; NAVARRO-HEVIA, J.; MARTINEZ-RODRIGUEZ, A. Bases metodológicas para el cálculo de muros entramados de madera con vegetación o muros Krainer. **Informes de la Construcción**, v. 66, n. 533, p. 0–12, 2014.

GAVASSONI, E.; GARCIA, C.B. Prediction of Exposure Risk for Buried Pipelines due to Surface Erosion. In: INTERNATIONAL Conference on Scour and Erosion. [S.l.]: ASCE Library, 2010. v. 210. P. 192–201.

GERMAN STANDARD INSTITUTE. **DIN 19661-1:1998-07**: Hydraulic structures - Part 1: Crossing works, culvert works and drain works. Germany, 1998.

GHEBREIYESSUS, Y.T.; GANTZER, C.J.; ALBERTS, E.E.; LENTZ, R.W. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. **Transactions of the ASAE**, American Society of Agricultural e Biological Engineers, v. 37, n. 6, p. 1791–1797, 1994.

GOLDSMITH, W.; SILVA, M.; FISCHENICH, C. **Determining optimal degree of soil compaction for balancing mechanical stability and plant growth capacity**. USA, 2001.

GOMEZ, J.P.D. **Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo território Brasileiro**. 2012. Diss. (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

GOOGLE. **Google Earth**. [S.l.], 2020.

GRAY, D.H.; LEISER, A.T. **Biotechnical slope protection and erosion control**. New York, USA: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1982.

GREENWOOD, J.R. SLIP4EX—A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. **Geotechnical & Geological Engineering**, Springer, v. 24, n. 3, p. 449–465, 2006.

GRIMSHAW, D. **Aplicações do sistema vetiver: Manual técnico de referência**. 2. ed. [S.l.]: World Bank Publications, 2008.

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

GUY, H.P. **Sediment problems in urban areas**. Washington, USA: US Geological Survey, 1970.

GYSSELS, G.; POESEN, J.; BOCHET, E.; LI, Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review. **Progress in physical geography**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 29, n. 2, p. 189–217, 2005.

HOLANDA, F.S.R.; ROCHA, I.P. da. Streambank soil bioengineering approach to erosion control. In: PROGRESS in Molecular and Environmental Bioengineering-From Analysis and Modeling to Technology Applications. Pisa, Italy: IntechOpen, 2011.

INDERBITZEN, A.L. An erosion test for soils. **Materials Research and Standards**, v. 1, n. 7, p. 553–554, 1961.

IPPUC. **Lei de Zoneamento, Uso e Ocupação de Curitiba – Mapa anexo a Lei 15.551/2019**. Curitiba, 2019.

LEMOS, C.F.; SILVEIRA, C.T.; MILANI, J.R.; OKA-FIORI, C.; FIORI, A. Avaliação da erosão entre sulcos em solos de diferentes classes de uso na bacia do rio da Bucha (PR), através do aparelho de Inderbitzen. **Revista eletrônica Geografar**, 2007.

LEWIS, L. **Soil Bioengineering: An alternative for Roadside Management: A Practical Guide**. San Dimas, California: San Dimas Technology & Development Center, 2000.

LOADES, K.W.; BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HALLETT, P.D. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. **Ecological Engineering**, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 276–284, 2010.

LU, Y.; WANG, R.; ZHANG, Y.; SU, H.; WANG, P.; JENKINS, A.; FERRIER, R.C.; BAILEY, M.; SQUIRE, G. Ecosystem health towards sustainability. **Ecosystem Health and Sustainability**, Taylor & Francis, v. 1, n. 1, p. 1–15, 2015.

MACCAFERRI. **Gawacwin BR - 2.0 Cálculo de muros gabião**. Jundiaí, SP, 2003.

MACHADO, P.; GAVASSONI, E.; FARO, V.P. Análise paramétrica analítica no dimensionamento de tranças vivas na estabilização de encostas. In: VII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Florianópolis: Revista Eletrônica do COBRAE, 2017.

MAFFRA, C.R.B. **Metodologia para projetos de engenharia natural em obras de infraestrutura**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

MAFFRA, C.R.B. **Resistência ao cisalhamento de solo com raízes - ensaio de cisalhamento direto *in situ***. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria.

MENEGAZI, G.; PALMERI, F. **Il dimensionamento delle opera di ingegneria naturalistica**. Roma, Italia: Regione Lazio, 2013.

MINEROPAR. **Mapa Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba, 2015.

\_\_\_\_\_. **Mapeamento geológico geotécnico para planejamento na região metropolitana de Curitiba - Folha A D14SEA, D14SEB, D14SEC, D14SED ; Folha B D14SEE, D14SEF, D23SOE, D42NEA, D42NEB, D51NOA**. v. 1. Curitiba, 2014.

MIRANDA NETO, M.I.; MAHLER, C.F. Study of the Shear Strength of a Tropical Soil with Grass Roots. **Soils and Rocks**, v. 40, n. 1, p. 31–37, 2017.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2009.

\_\_\_\_\_. Vegetative-based technologies for erosion control. In: ECO-AND ground bio-engineering: the use of vegetation to improve slope stability. Netherlands: Springer, 2007. P. 265–272.

MORGAN, R.P.C.; RICKSON, R.J. **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach**. London, UK: Taylor & Francis, 2003.

NG, C.W.W.; GARG, A.; LEUNG, A.K.; HAU, B.C.H. Relationships between leaf and root area indices and soil suction induced during drying–wetting cycles. **Ecological Engineering**, Elsevier, v. 91, p. 113–118, 2016.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. In: PAVIMENTAÇÃO de baixo custo com solos lateríticos. São Paulo: Editora Villibor, 1995. Cap. 7 - Erosão na faixa marginal.

\_\_\_\_\_. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, Springer, v. 19, n. 1, p. 196, 1979.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. **Anais do Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**, v. 1, p. 30, 1981.

NORRIS, J.E.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S.B.; CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B.C.; ACHIM, A. **Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions**. Québec, Canada: Springer Science & Business Media, 2008.

ONU. **Perspectivas da Urbanização Mundial**. [S.l.], 2018. :

<https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>.

OPERSTEIN, V.; FRYDMAN, S. The influence of vegetation on soil strength. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement**, Thomas Telford Ltd, v. 4, n. 2, p. 81–89, 2000.

OROZCO, M.M.D. **Caracterização da gramínea Vetiveria zizanioides para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão**. 2009. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

PEJON, O.L. **Mapeamento Geotécnico de Piracicaba. 1: 100.000: Estudo de Aspectos Metodológicos de Caracterização e de Apresentação dos Atributos**. 1992. Tese (Doutorado) – EESC/USP, São Carlos.

POLLEN-BANKHEAD, N.; SIMON, A. Hydrologic and hydraulic effects of riparian root networks on streambank stability: Is mechanical root-reinforcement the whole story? **Geomorphology**, Elsevier, v. 116, n. 3-4, p. 353–362, 2010.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC-USP, 2006. v. 4.

REY, F.; BIFULCO, C.; BISCHETTI, G.B.; BOURRIER, F.; DE CESARE, G.; FLORINETH, F.; GRAF, F.; MARDEN, M.; MICKOVSKI, S.B.; PHILLIPS, C. Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. **Science of the total environment**, Elsevier, v. 648, p. 1210–1218, 2019.

RÖMKENS, M.J.M.; YOUNG, R.A.; POESEN, J.W.A.; MCCOOL, D.K.; EL-SWAIFY, S.A.; BRADFORD, J.M. Soil erodibility factor (K). In: **PREDICTING Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation and Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. USA: US Department of Agriculture, 1997. P. 65–99.

ROWLANDS, L. Erosion and Sediment Control—WSUD During the Construction Phase of Land Development. In: *APPROACHES to Water Sensitive Urban Design*. [S.l.]: Elsevier, 2019. P. 163–176.

RUSSO, W.C.; GAVASSONI, E. Diverter berm dimensions for erosion control along pipelines rights-of-way. In: *RIO Pipeline Conference and Exposition, Technical Papers*. [S.l.: s.n.], 2011.

SANTOS, G.G.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. de. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 14, n. 2, p. 115–123, 2010.

SANTOS, R.M.M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia**. 1997. Diss. (Mestrado) – Universidade de Brasília.

SHAFII, I.; BRIAUD, J.L.; CHEN, H.; SHIDLOVSKAYA, A. Relationship between soil erodibility and engineering properties. In: *SCOUR and erosion IX - Ken-Chia* (Ed.) Taipei, Taiwan: Taylor Francis, 2016.

SHERAED, J.L.; DUNNIGAN, Lorn P.; DECKER, R.S. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 102, Proc. Paper# 12052, 1976.

SILVA, A.P.N.; MELO, M.T.S. Análise do Histórico de Desenvolvimento de Modelos de Aparelho de Inderbitzen para a Confecção de Tabelas Comparativas. **Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão**, 2016.

SILVEIRA, A. Problems of modern urban drainage in developing countries. **Water Science and Technology**, IWA Publishing, v. 45, n. 7, p. 31–40, 2002.

SIMON, A. A model of channel response in disturbed alluvial channels. **Earth surface processes and landforms**, Wiley Online Library, v. 14, n. 1, p. 11–26, 1989.

SIMON, A.; COLLISON, A.J.C. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. **Earth surface processes and landforms**, Wiley Online Library, v. 27, n. 5, p. 527–546, 2002.

SIMON, A.; CURINI, A.; DARBY, S.E.; LANGENDOEN, E. Bank and near-bank processes in an incised channel. **Geomorphology**, Elsevier, v. 35, n. 3-4, p. 193–217, 2000.

SKEMPTON, A.W. The colloidal activity of clays. **Selected papers on soil mechanics**, p. 106–118, 1953.

SOUSA, R.S. **Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural**. 2015. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SOUZA, R.X.; PEREIRA, M.w. Motta; PINTO, L.V.A.; FERREIRA, J.A. Análise da eficiência do capim vetiver para proteção de encostas: quantificação da perda de solo por erosão hídrica. In: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Londrina, PR: IBEAS–Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2011.

SUDERHSA. **Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2002.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Editora Blucher, 2003.

SUTILI, F.J.; GAVASSONI, E. The development of soil bioengineering as an analytical discipline. **Ciência e Ambiente**, UFSM, v. 46–47, 2017.

THOMPSON, S.E.; HARMAN, C.J.; HEINE, P.; KATUL, G.G. Vegetation-infiltration relationships across climatic and soil type gradients. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Wiley Online Library, v. 115, n. 2, p. 1–12, 2010.

TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. Drenagem urbana e controle de erosão. In: VI Simpósio Nacional de Controle da Erosão. Presidente Prudente, SP.: ABGE, 1998.

TUCCI, C.E.M. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1995.

VENTURINI, J.A. **Avaliação do efeito da adição de raízes na erodibilidade de um solo arenoso**. 2019. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

WANG, B.; ZHENG, F.; RÖMKENS, M.J.M.; DARBOUX, F. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. **Geomorphology**, Elsevier, v. 187, p. 1–10, 2013.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of soil and water conservation**, 1971.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Indiana, USA: Department of Agriculture, Science e Education Administration, 1978.

WU, T.H. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. **Canadian Geotechnical Journal**, NRC Research Press, v. 50, n. 3, p. 259–274, 2013.

WU, T.H.; MCOMBER, R.; ERB, R.; BEAL, P. Study of soil-root interaction. **Journal of Geotechnical Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 114, n. 12, p. 1351–1375, 1988.

WYNN, T.M. **The effects of vegetation on stream bank erosion**. 2004. Tese (Doutorado) – Virginia Polytechnic Institute e State University, Virginia, USA.

YILDIZ, A.; GRAF, F.; RICKLI, C.; SPRINGMAN, S.M. Assessment of plant-induced suction and its effects on the shear strength of rooted soils. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, Thomas Telford Ltd, v. 172, n. 6, p. 507–519, 2019.

## APÊNDICE A – CÓDIGO ARDUINO DOS MEDIDORES DE NÍVEL D'ÁGUA E SENSOR DE UMIDADE

```
int Pulso; //Variável para a quantidade de pulsos
int j=0; //Variável para contagem
float vazaoagua; //Variável para armazenar o valor em L/min
float vazaoaguacorrigida; //Variável para correção do valor de vazão
float alturacorrigida; //Variável para correção do valor de nível d'água
float valormedia=0; //Variável para tirar a média de vazão a cada 1 minuto
float alturamedia=0; //Variável para tirar a média de altura a cada 1 minuto
#define sensorPower 7 // Pino digital com +Vcc
#define sensorPin A1 // Pino A1 para receber dados
int val = 0; //variável para armazenar o nível d'água
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(sensorPower, OUTPUT); // Definindo D7 como OUTPUT
  digitalWrite(sensorPower, LOW); //Função para desligar o sensor
  pinMode(2, INPUT);
  attachInterrupt(0, incrpulso, RISING); //Configura a porta digital 2, para interrupção
}
void loop ()
{
  float level = readSensor(); //Obter a leitura do sensor e plotar
  alturacorrigida = level*0.1562-0.9323;
  ;
  Pulso = 0; //Começa do 0 variável para contar os giros das pás internas
  sei(); //liga interrupção
  delay (2000); //Espera 2 segundos
  cli(); //Desliga interrupção
  vazaoagua = Pulso / 5.5; //Converte para Litros/minuto
  vazaoaguacorrigida = vazaoagua*0.0781-2.1064; //realiza a calibração
  valormedia=valormedia+vazaoaguacorrigida; //Soma a vazão para o calculo da valormedia
  alturamedia=alturamedia+alturacorrigida; //Soma a altura para o calculo da altura media
  j++; //novo ciclo
  Serial.print(" L/minuto - "); //Imprime L/min
  Serial.println(vazaoaguacorrigida); //Imprime na serial o valor da vazão
  Serial.print("Altura Sensor (mm) - "); //Imprime Altura Sensor (mm)
  Serial.println(alturacorrigida); //Imprime o valor da altura corrigida
  if(j==60)
  {
    valormedia = valormedia/60; //valormedia dividindo por 60
    alturamedia = alturamedia/60; //alturamedia dividindo por 60
    Serial.print("\n Media por minuto = "); //Imprime a frase valormedia por minuto =
    Serial.print(valormedia); //Imprime o valor da valormedia
```

```
Serial.println(" Litros/minutos - "); //Imprime L/min
Serial.print(alturamedia); //Imprime o valor da altuamedia
Serial.println(" milímetros - "); //Imprime milímetros
valormedia = 0; //Torna variável valormedia = 0, para uma nova contagem
alturamedia = 0; //Torna variável alturamedia = 0, para uma nova contagem
j=0; //Torna a o contador 0,para uma nova contagem
}
}
//Função para ler a altura de maneira não contínua (evitar que o sensor estrague)
int readSensor() {
    digitalWrite(sensorPower, HIGH); // Liga o sensor
    delay(100);                      // 10 milliseconds
    val = analogRead(sensorPin);      // Leitura do Sensor
    digitalWrite(sensorPower, LOW);   // Desliga o sensor
    return val;                      // Manda a leitura
}
void incrpulso ()
{
    Pulso++;
}
```

## **APÊNDICE B – EXEMPLO DE TABELA DE ANOTAÇÃO UTILIZADA NOS ENSAIOS INDERBITZEN**



## ENSAIO INDERBITZEN



IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA: Solo 2 10-10

DATA DO ENSAIO: 05/01/2021

EXECUTADO POR: Cleyton

|                  |        |
|------------------|--------|
| Diâmetro CP (cm) | 9,70   |
| Altura (cm)      | 4,80   |
| Massa Solo+Anel  | 690,18 |
| Massa Anel       | 139,99 |

|                   |          |                   |
|-------------------|----------|-------------------|
| Densidade da água | 0,998    | g/cm <sup>3</sup> |
| Vazão calculada   | 12,56535 | l/min             |
| Verificação       | OK       |                   |

|                                      |       |                   |
|--------------------------------------|-------|-------------------|
| Peso específico natural ( $\gamma$ ) | 15,99 | kN/m <sup>3</sup> |
|--------------------------------------|-------|-------------------|

| Medidas de Altura (mm) |      | Medidas de Vazão (l/min) |       | Medidas de Inclinação (graus) |      |
|------------------------|------|--------------------------|-------|-------------------------------|------|
| M1                     | 7,4  | V1                       | 9,17  | Longitudinal                  | 9,10 |
| M2                     | 7,70 | V2                       | 12,11 | Transversal                   | 0,00 |
| M3                     | 7,70 | V3                       | 12,16 |                               |      |
| M4                     | 7,40 | V4                       | 12,26 |                               |      |
| Média                  | 7,55 | Média                    | 11,43 |                               |      |

| Tensão cisalhante |       |
|-------------------|-------|
| $\tau$ (Pa)       | 11,84 |

| Teor de Umidade Inicial |               |             |            |             |
|-------------------------|---------------|-------------|------------|-------------|
| Cápsula                 | Massa Cápsula | Massa Úmida | Massa Seca | Umidade (%) |
| 54                      | 14,70         | 36,19       | 29,27      | 47,49%      |

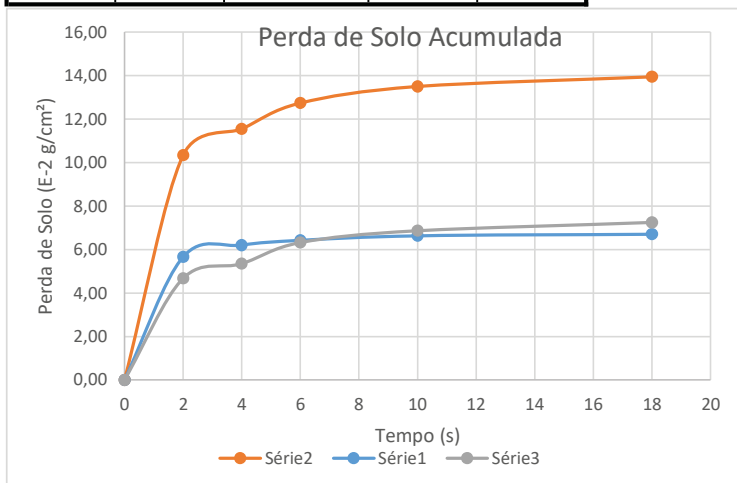
| Solo Coletado na Infiltração |       |
|------------------------------|-------|
| Massa Total (g)              | 87,10 |
| Massa Cap (g)                | 67,73 |
| Massa Solo (g)               | 19,37 |

### Ensaio Inderbitzen

| Peneira Tempo |    | Peneira #40    |         |          | Peneira #200   |         |          | Total Acumulado (E-2 g/cm <sup>2</sup> ) |
|---------------|----|----------------|---------|----------|----------------|---------|----------|------------------------------------------|
|               |    | Solo e Cap (g) | Cap (g) | Solo (g) | Solo e Cap (g) | Cap (g) | Solo (g) |                                          |
| 0             | 0  | 0,00           | 0,00    | 0,00     | 0,00           | 0,00    | 0,00     | 0,00                                     |
| 0~2           | 2  | 77,29          | 73,11   | 4,18     | 91,23          | 87,78   | 3,45     | 10,33                                    |
| 2~4           | 4  | 89,77          | 89,37   | 0,40     | 91,73          | 91,23   | 0,50     | 11,55                                    |
| 4~6           | 6  | 80,29          | 80,13   | 0,16     | 86,79          | 86,07   | 0,72     | 12,74                                    |
| 6~10          | 10 | 84,13          | 83,97   | 0,16     | 83,71          | 83,31   | 0,40     | 13,50                                    |
| 10~18         | 18 | 83,78          | 83,73   | 0,05     | 85,46          | 85,18   | 0,28     | 13,95                                    |

| Teor de Umidade Final |               |             |            |             |
|-----------------------|---------------|-------------|------------|-------------|
| Cápsula               | Massa Cápsula | Massa Úmida | Massa Seca | Umidade (%) |
| 65,00                 | 15,46         | 88,08       | 62,66      | 53,86%      |

| Perda de Solo (E-2 g/cm <sup>2</sup> /min/Pa) |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| Tempo crítico                                 | 6,00  |
| K                                             | 0,179 |
| Q (l/min)                                     | 11,43 |
| I (graus)                                     | 9,10  |
| Ps (E-2g/cm <sup>2</sup> /min)                | 0,77  |
| Tau                                           | 11,84 |



OBSERVAÇÕES:

## APÊNDICE C – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO DAS MARGENS DO CANAL DE DRENAGEM

### 1. Dimensionamento da paliçada viva

A análise de estabilidade global realizada com o programa SLIP4EX (GREENWOOD, 2006). A equação C.1 exibe o cálculo do fator de segurança na proposição. Os resultados das análises realizadas para 4 taxas diferentes de raízes é apresentado na Tabela C.1.

$$FS = \frac{\sum (c' + c'_r) \cdot l + [(W + S_w) \cos \alpha - (u - u_v) \cdot l - D_w \cdot \sin(\alpha - \beta) + T \sin \theta] \tan \phi'}{\sum [(W + S_w) \cdot \sin \alpha + D_w \cdot \cos(\alpha - \beta) - T \cos \theta]} \quad (C.1)$$

TABELA C.1 – Parâmetros de entrada e resultados da análise de estabilidade global gerada no modelo SLIP4EX

| Cenário | Número de Fatias | c'(kPa) | $\phi$ (graus) | T (kN/m) | $\theta$ (graus) | FS sem vegetação | FS com Vegetação |
|---------|------------------|---------|----------------|----------|------------------|------------------|------------------|
| A       | 6                | 5,0     | 25             | 0        | 45               | 1,56             | 1,56             |
| B       | 6                | 5,0     | 25             | 0,2      | 45               | 1,56             | 1,60             |
| C       | 6                | 5,0     | 25             | 0,8      | 45               | 1,56             | 1,72             |
| D       | 6                | 5,0     | 25             | 0,8      | 75               | 1,56             | 1,75             |

O dimensionamento geotécnico da paliçada viva foi realizado através da estimativa dos parâmetros de empuxo ativo e passivo e o cálculo pelo método de Blum, apresentado em Menegazi e Palmeri (2013). A verificação de espaçamento entre pilaretes ocorreu através da proposição de Machado et al. (2017). Os resultados são exibidos na Tabela C.2.

TABELA C.2 – Verificações de tombamento, deslocamento horizontal e distância entre pilaretes da paliçada viva

| Variável                               | Valor | Unidade      |
|----------------------------------------|-------|--------------|
| Ka                                     | 0,696 | Adimensional |
| Kp                                     | 2,46  | Adimensional |
| Empuxo Atuante                         | 2,447 | kN/m         |
| Empuxo Resistente                      | 19,12 | kN/m         |
| Comprimento do pilarete                | 0,75  | m            |
| Fator de Segurança ao tombamento       | 1,7   | Adimensional |
| Distância entre pilaretes (critério 1) | 1,477 | m            |
| Distância entre pilaretes (critério 2) | 1,47  | m            |
| Distância entre pilaretes (critério 3) | 1,76  | m            |

As verificações de perda de solo foram realizadas através da EUPS, com os resultados da verificação apresentados na Tabela C.3.

TABELA C.3 – Verificações de erosão e material carregado na paliçada viva

| Parâmetro     | Valor  | Unidade        | Formulação                                   | Referência                      |
|---------------|--------|----------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| K             | 0,2372 | T.h/MJ.mm      | Figura 5.25                                  | Auerswald et al. (2014)         |
| R             | 880,55 | MJ.mm/h.ha.ano | $R = 4,20.M_i + 19,55$                       | Gomez (2012)                    |
| LS            | 0,987  | Adimensional   | $LS = 0,00948 \cdot L^{0,63} + D^{1,18}$     | Bertoni e Lombardi Neto (2005). |
| C             | 0,2    | Adimensional   | Áreas Vegetadas                              | Römkens et al. (1997)           |
| P             | 1      | Adimensional   | Parâmetro conservador                        |                                 |
| Rampa         | 1,5    | m              |                                              |                                 |
| inclinação    | 40     | %              |                                              |                                 |
| Precipitação  | 131,3  | mm/mês         |                                              | ClimaTempo (2020)               |
| Perda de Solo | 3,94   | ton/ha.ano     | $A = R \times K \times LS \times C \times P$ | Wischmeier e Smith (1978)       |

As verificações hidráulica-hidrológicas são apresentadas na Tabela C.4. As formulações de cálculo de vazão e parâmetros da Equação de Manning-Stricker foram retiradas do livro de Porto (2006). O cálculo de chuvas intensas foi realizado através da Equação apresentada em Fendrich (1998).

TABELA C.4 – Verificações hidráulicas e hidrológicas da paliçada viva

#### Dados

| Dados hidráulicos                                                                    |       | Valor  | Unidade |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|---------|
| Chuva de projeto                                                                     | C=    | 100    | mm/h    |
| Tempo de concentração da bacia                                                       | t=    | 38     | minutos |
| Vazão Máxima (TR 25 anos)                                                            | Qm =  | 15,05  | m³/s    |
| Vazão de Projeto                                                                     | Qp =  | 1,00   | m³/s    |
| Coeficiente de Rugosidade                                                            | n =   | 0,021  |         |
| Declividade do canal                                                                 | i =   | 0,0053 | m/m     |
| Dados Geométricos                                                                    |       |        |         |
| Inclinação da estrutura (ε)                                                          | β =   | 2,00   | °       |
| Altura da paliçada                                                                   | h =   | 0,75   | m       |
| Altura total do talude                                                               | H =   | 4,60   | m       |
| Inclinação do Talude (tardoz)                                                        | i =   | 12,00  | °       |
| Largura do canal contido                                                             | B =   | 2,20   | m       |
| Dimensionamento Hidráulico                                                           |       |        |         |
| Seção menor - compreendida pelo fundo do leito e altura da paliçada inferior         |       |        |         |
| Altura da lâmina d'água                                                              | Hc =  | 0,35   | m       |
| Área de escoamento                                                                   | Ac =  | 0,78   | m²      |
| Perímetro Molhado                                                                    | Pm =  | 2,90   | m       |
| Vazão - Capacidade                                                                   | Q =   | 1,13   | m³/s    |
| Vazão necessária                                                                     | Qn =  | 1,00   | m³/s    |
| Velocidade de Escoamento                                                             | v=    | 1,44   | m/s     |
| VERIFICAÇÃO                                                                          |       | OK     |         |
| Seção maior - Seção total de vazão, lâmina de água excepcional não pode alagar a rua |       |        |         |
| Altura da lâmina d'água                                                              | Hcm=  | 2,05   | m       |
| Área total                                                                           | Acm = | 8,24   | m       |
| Perímetro Molhado                                                                    | Pmm = | 7,89   | m       |
| Vazão - Capacidade                                                                   | Q=    | 15,63  | m³/s    |
| Vazão Necessária                                                                     | Qm    | 15,05  | m³/s    |
| Velocidade de Escoamento                                                             | vm=   | 3,31   | m/s     |
| VERIFICAÇÃO                                                                          |       | OK     |         |

## 2. Esteira Viva

O dimensionamento da esteira viva contou com as verificações de estabilidade global, seção de vazão e distância máxima entre elementos. A análise de estabilidade global foi realizada em um *software* comercial, através do método de Jambu, considerando a geometria obtida a partir da seção transversal. As verificações de seção de vazão ocorreram através do método racional e fórmula de Manning-Stricker (PORTO, 2006) e a distância máxima entre elementos foi calculada através da EUPS, definindo-se uma distância para que a perda de solo fosse menor que 4 t/ha/ano (MORGAN, 2009). A Tabela C.5 apresenta as verificações hidráulicas e geotécnicas e a Tabela C.6 as verificações de distância entre esteiras.

TABELA C.5 – Verificações hidráulicas, hidrológicas e geotécnicas na esteira viva

| Dados                                                          |            |        |         |
|----------------------------------------------------------------|------------|--------|---------|
| Dados hidráulicos                                              |            | Valor  | Unidade |
| Chuva de projeto                                               | C =        | 100    | mm/h    |
| Tempo de concentração da bacia                                 | t =        | 38     | minutos |
| Vazão Máxima (TR 25 anos)                                      | Qm =       | 15,05  | m³/s    |
| Vazão de Projeto                                               | Qp =       | 1,50   | m³/s    |
| Coeficiente de Rugosidade                                      | n =        | 0,025  |         |
| Declividade do canal                                           | i =        | 0,0053 | m/m     |
| Dados Geométricos                                              |            |        |         |
| Inclinação do talude                                           | $\theta$ = | 27     | °       |
| Comprimento do leito                                           | B =        | 3,45   | m       |
| Altura total do talude                                         | H =        | 3,7    | m       |
| Dados do Solo                                                  |            |        |         |
| Ângulo de atrito                                               | $\phi$ =   | 18     | °       |
| Intercepto coesivo                                             | c' =       | 4      | kPa     |
| Peso específico                                                | $\gamma$ = | 18     | kN/m³   |
| Dimensionamento Hidráulico                                     |            |        |         |
| Seção de escoamento total                                      |            |        |         |
| Altura da lâmina d'água                                        | Hc =       | 0,34   | m       |
| Área de escoamento                                             | Ac =       | 1,22   | m²      |
| Perímetro Molhado                                              | Pm =       | 4,19   | m       |
| Raio Hidráulico (A/P)                                          | Rh=        | 0,29   | m       |
| Vazão - Capacidade                                             | Q =        | 1,57   | m³/s    |
| Vazão necessária                                               | Qn =       | 1,50   | m³/s    |
| Velocidade de Escoamento                                       | v=         | 1,28   | m/s     |
| VERIFICAÇÃO                                                    |            | OK     |         |
| Seção maior - Lâmina de água excepcional não pode alagar a rua |            |        |         |
| Vazão Necessária                                               | Qm         | 15,05  | m³/s    |
| Altura da lâmina d'água                                        | Hcm=       | 1,48   | m       |
| Vazão obtida                                                   | Q =        | 16,61  | m³/s    |
| Velocidade de Escoamento                                       | vm=        | 2,73   | m/s     |
| VERIFICAÇÃO                                                    |            | OK     |         |
| Verificações de estabilidade geotécnica                        |            |        |         |
| Menor FS obtido no programa                                    |            | 3,43   |         |
| FS limite NBR 11682(ABNT, 2009)                                |            | 1,5    |         |
| VERIFICAÇÃO                                                    |            | OK     |         |

TABELA C.6 – Verificação de distância entre esteiras vivas através da EUPS

| Parâmetro     | Valor    | Unidade        | Formulação                                   | Referência                      |
|---------------|----------|----------------|----------------------------------------------|---------------------------------|
| K             | 0,18241  | T.h/MJ.mm      | Figura 5.25                                  | Auerswald et al. (2014)         |
| R             | 880,55   | MJ.mm/h.ha.ano | $R = 4,20.M_i + 19,55$                       | Gomez (2012))                   |
| LS            | 0,204271 | Adimensional   | $LS = 0,00948 \cdot L^{0,63} + D^{1,18}$     | Bertoni e Lombardi Neto (2005). |
| C             | 0,2      | Adimensional   | Áreas Vegetadas                              | Wischmeier e Smith (1978)       |
| P             | 0,5      | Adimensional   | Plantio em contorno                          | Wischmeier e Smith (1978)       |
| Rampa         | 1,00     | m              |                                              |                                 |
| Inclinação    | 25       | %              |                                              |                                 |
| Precipitação  | 131,3    | mm/mês         |                                              | ClimaTempo (2020)               |
| Perda de Solo | 3,28     | ton/ha.ano     | $A = R \times K \times LS \times C \times P$ | Wischmeier et al. (1971)        |

### 3. Muro Gabião

Para o dimensionamento do muro Gabião, lançou-se a estrutura em uma seção obtida no canal, verificando-se a suficiência da seção de vazão para suportar o escoamento determinado pelo método racional com TR=25 anos. Após isso, foi realizado as verificações de tombamento, deslocamento horizontal, ruptura interna e ruptura global através do *software* GawacWin 2.0 (MACCAFERRI, 2003). A Tabela C.7 apresenta as verificações hidráulicas do dimensionamento do gabião, seguido pela apresentação do memorial de cálculo fornecido pelo programa.

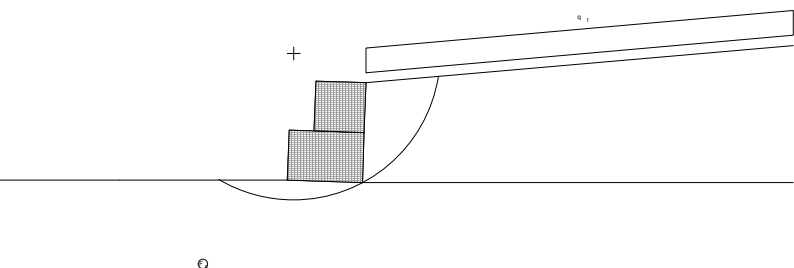
TABELA C.7 – Verificações hidráulicas e hidrológicas do muro gabião

| Dados                                                                                |       |        |         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|---------|
| Dados hidráulicos                                                                    |       | Valor  | Unidade |
| Chuva de projeto                                                                     | C=    | 100    | mm/h    |
| Tempo de concentração da bacia                                                       | t=    | 38     | minutos |
| Vazão Máxima (TR 25 anos)                                                            | Qm =  | 15,05  | m³/s    |
| Vazão de Projeto                                                                     | Qp =  | 1,50   | m³/s    |
| Coeficiente de Rugosidade                                                            | n =   | 0,025  |         |
| Declividade do canal                                                                 | i =   | 0,0053 | m/m     |
| Dados Geométricos                                                                    |       |        |         |
| Inclinação da estrutura (ε)                                                          | β =   | 2      | °       |
| Altura da paliçada                                                                   | h =   | 1      | m       |
| Altura total do talude                                                               | H =   | 4      | m       |
| Inclinação do Talude (tardoz)                                                        | i =   | 12     | °       |
| Largura do canal contido                                                             | B =   | 4,1    | m       |
| Dimensionamento Hidráulico                                                           |       |        |         |
| Seção menor - compreendida pelo fundo do leito e altura da primeira caixa            |       |        |         |
| Altura da lâmina d'água                                                              | Hc =  | 0,31   | m       |
| Área de escoamento                                                                   | Ac =  | 1,27   | m²      |
| Perímetro Molhado                                                                    | Pm =  | 4,72   | m       |
| Vazão - Capacidade                                                                   | Q =   | 1,55   | m³/s    |
| Vazão necessária                                                                     | Qn =  | 1,50   | m³/s    |
| Velocidade de Escoamento                                                             | v=    | 1,22   | m/s     |
| VERIFICAÇÃO                                                                          |       | OK     |         |
| Seção maior - Seção total de vazão, lâmina de água excepcional não pode alagar a rua |       |        |         |
| Altura da lâmina d'água                                                              | Hcm=  | 2,33   | m       |
| Área total                                                                           | Acm = | 2,40   | m       |
| Perímetro Molhado                                                                    | Pmm = | 3,17   | m       |
| Vazão - Capacidade                                                                   | Q=    | 15,09  | m³/s    |
| Vazão Necessária                                                                     | Qm=   | 15,05  | m³/s    |
| Velocidade de Escoamento                                                             | vm=   | 2,3094 | m/s     |
| VERIFICAÇÃO                                                                          |       | OK     |         |

**DADOS DE ENTRADA****Dados sobre o muro**

Inclinação do muro : 2,00 graus  
 Peso específico da pedra : 25,00 kN/m<sup>3</sup>  
 Porosidade dos gabiões : 25,00 %  
 Geotêxtil no terrapleno : Não  
 Redução do atrito : %  
 Geotêxtil sob a base : Não  
 Redução do atrito : %  
 Malha e diâm. do arame: 8x10, ø 2.7 mm CD

| Camada | Compr.<br>m | Altura<br>m | Início<br>m |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 1      | 1,50        | 1,00        | -           |
| 2      | 1,00        | 1,00        | 0,50        |

**Dados sobre o terrapleno**

Inclinação do 1º trecho : 5,00 graus  
 Comprimento do 1º trecho : 10,00 m  
 Inclinação do 2º trecho : graus  
 Peso específico do solo : 18,00 kN/m<sup>3</sup>  
 Ângulo de atrito do solo : 16,00 graus  
 Coesão do solo : 5,00 kN/m<sup>2</sup>

**Camadas Adicionais no Terrapleno**

| Camada | Altura inicial<br>m | Inclinação<br>graus | Peso específico<br>kN/m <sup>3</sup> | Coesão<br>kN/m <sup>2</sup> | Ângulo de atrito<br>graus |
|--------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|--------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|

Programa licenciado para: MACCAFERRI WEB BRASIL

Projeto: gabiaoC3

Arquivo: Noname

Data: 17/02/2021

**Dados sobre a fundação**

Altura da sup. superior : 0,00 m  
 Comprimento inicial : 10,00 m  
 Inclinação : 0,00 graus  
 Peso específico do solo : 18,00 kN/m<sup>3</sup>  
 Ângulo de atrito do solo : 16,00 graus  
 Coesão do solo : 5,00 kN/m<sup>2</sup>  
 Pressão adm. na fundação : 25,00 kN/m<sup>2</sup>  
 Altura do nível d'água : m

**Camadas Adicionais na Fundação**

| Camada | Prof.<br>m | Peso específico<br>kN/m <sup>3</sup> | Coesão<br>kN/m <sup>2</sup> | Ângulo de atrito<br>graus |
|--------|------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|--------|------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|

**Dados sobre a superfície freática**

Altura inicial : m  
 Inclinação do 1º trecho : graus  
 Comprimento do 1º trecho : m  
 Inclinação do 2º trecho : graus  
 Comprimento do 2º trecho : m

**Dados sobre as cargas**

Cargas distribuídas sobre o terrapleno  
     Primeiro trecho : 4,00 kN/m<sup>2</sup>  
     Segundo trecho : kN/m<sup>2</sup>  
 Cargas distribuídas sobre o muro  
     Carga : kN/m<sup>2</sup>  
 Linhas de carga sobre o terrapleno  
 Carga 1 : kN/m Dist. ao topo do muro : m  
 Carga 2 : kN/m Dist. ao topo do muro : m  
 Carga 3 : kN/m Dist. ao topo do muro : m  
 Linha de carga sobre o muro  
 Carga : kN/m Dist. ao topo do muro : m

**Dados sobre as ações sísmicas**

Coeficiente horizontal : Coeficiente vertical :

**RESULTADOS DAS ANÁLISES****Empuxos Ativo e Passivo**

|                                  |   |             |
|----------------------------------|---|-------------|
| Empuxo Ativo                     | : | 10,75 kN/m  |
| Ponto de apl. ref. ao eixo X     | : | 1,52 m      |
| Ponto de apl. ref. ao eixo Y     | : | 0,61 m      |
| Direção do empuxo ref. ao eixo X | : | 14,00 graus |
| Empuxo Passivo                   | : | 0,00 kN/m   |
| Ponto de apl. ref. ao eixo X     | : | 0,00 m      |
| Ponto de apl. ref. ao eixo Y     | : | 0,00 m      |
| Direção do empuxo ref. ao eixo X | : | 0,00 graus  |

**Deslizamento**

|                              |   |            |
|------------------------------|---|------------|
| Força normal sob a base      | : | 49,81 kN/m |
| Ponto de apl. ref. ao eixo X | : | 0,78 m     |
| Ponto de apl. ref. ao eixo Y | : | -0,03 m    |
| Força tangente sob a base    | : | 8,70 kN/m  |
| Força resistente na base     | : | 18,03 kN/m |

**Coef. de Segurança Contra o Deslizamento** : **1,90**

**Tombamento**

|                    |   |                |
|--------------------|---|----------------|
| Momento Atuante    | : | 6,40 kN/m x m  |
| Momento Resistente | : | 45,25 kN/m x m |

**Coef. de Segurança Contra o Tombamento** : **7,07**

**Tensões Atuantes na Fundação**

|                                    |   |                         |
|------------------------------------|---|-------------------------|
| Excentricidade                     | : | -0,03 m                 |
| Tensão normal na borda externa     | : | 29,23 kN/m <sup>2</sup> |
| Tensão normal na borda interna     | : | 37,18 kN/m <sup>2</sup> |
| Tensão máx. admissível na fundação | : | 25,00 kN/m <sup>2</sup> |

---

Programa licenciado para: MACCAFERRI WEB BRASIL

---

Projeto: gabiaoC3

Arquivo: Noname

Data: 17/02/2021

---

**Estabilidade Global**

Distância inicial à esquerda : m  
Distância inicial à direita : m  
Distância inicial abaixo da base : m  
Máxima profundidade permitida no cálculo : m  
Centro do arco ref. ao eixo X : 0,12 m  
Centro do arco ref. ao eixo Y : 2,53 m  
Raio do arco : 2,94 m  
Número de superfícies pesquisadas : 57

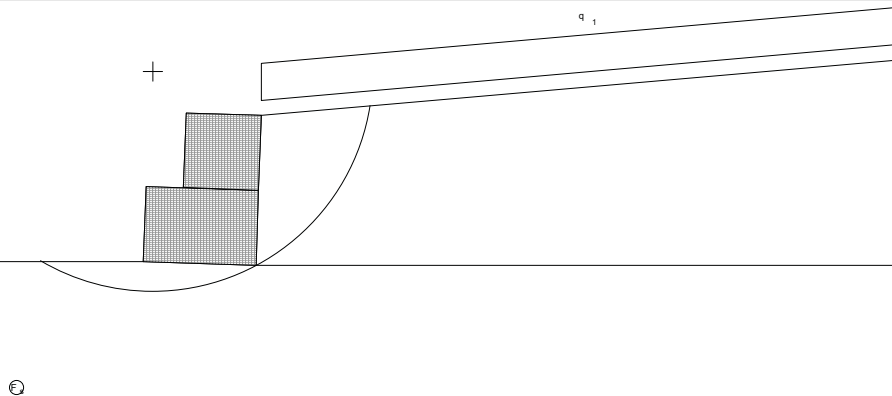
**Coef. de Segurança Contra a Rup. Global : 1,42**

**Estabilidade Interna**

---

| Camada | H<br>m | N<br>kN/m | T<br>kN/m | M<br>kN/m x m | $\tau$ Máx<br>kN/m <sup>2</sup> | $\tau$ Adm.<br>kN/m <sup>2</sup> | $\sigma$ Máx<br>kN/m <sup>2</sup> | $\sigma$ Adm.<br>kN/m <sup>2</sup> |
|--------|--------|-----------|-----------|---------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1      | 1,00   | 19,25     | 1,15      | 9,61          | 1,15                            | 34,74                            | 19,28                             |                                    |

---

**DADOS SOBRE O SOLO**

| Solo           | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | c<br>kN/m <sup>2</sup> | $\phi$<br>graus | Solo           | $\gamma$<br>kN/m <sup>3</sup> | c<br>kN/m <sup>2</sup> | $\phi$<br>graus |
|----------------|-------------------------------|------------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|------------------------|-----------------|
| B <sub>s</sub> | 18,00                         | 5,00                   | 16,00           | F <sub>s</sub> | 18,00                         | 5,00                   | 16,00           |

**CARGAS**

| Carga          | Valor<br>kN/m <sup>2</sup> | Carga | Valor<br>kN/m |
|----------------|----------------------------|-------|---------------|
| q <sub>1</sub> | 4,00                       |       |               |

**VERIFICAÇÕES DE ESTABILIDADE**

|                            |      |                           |                        |
|----------------------------|------|---------------------------|------------------------|
| Coef. de Seg. Deslizamento | 1,90 | Tensão na base (esquerda) | 29,23kN/m <sup>2</sup> |
| Coef. de Seg. Tombamento   | 7,07 | Tensão na base (direita)  | 37,18kN/m <sup>2</sup> |
| Coef. de Seg. Rup. Global  | 1,42 | Máxima tensão admissível  | 25,00kN/m <sup>2</sup> |

## **APÊNDICE D – SEÇÕES TRANSVERSAIS E IMPLANTAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE ESTABILIZAÇÃO DA MARGEM**

# CORTE C1-C1'

# CORTE C2-C2'

# CORTE C3-C3'

## PALIÇADA VIVA

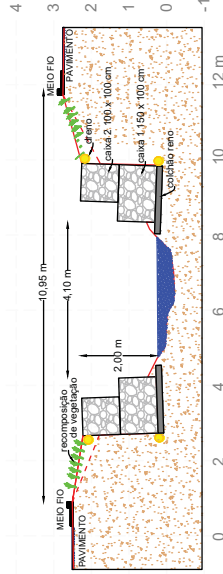
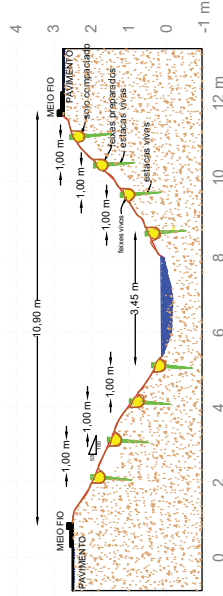
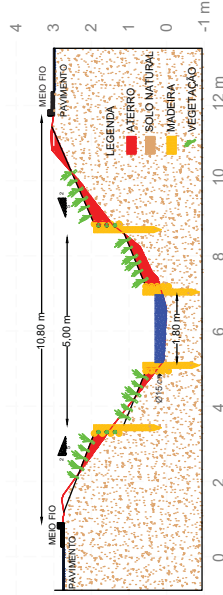
ESCALA 1:200

## ESTEIRA VIVA

ESCALA 1:200

## GABIÃO

ESCALA 1:200

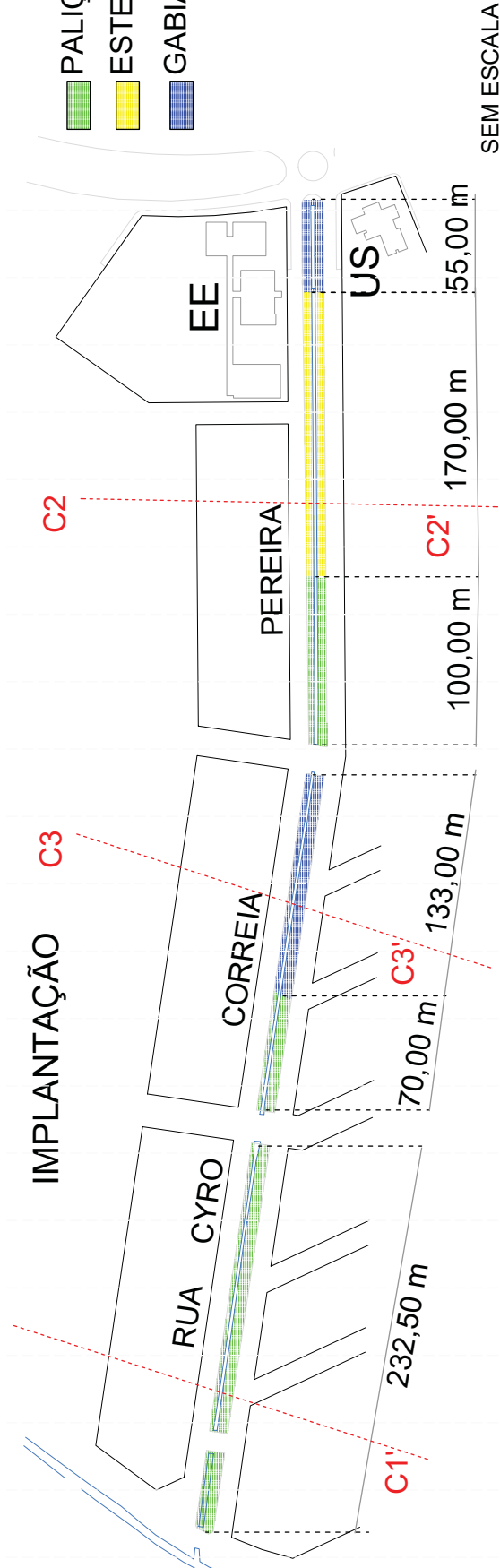


C1

IMPLANTAÇÃO C3

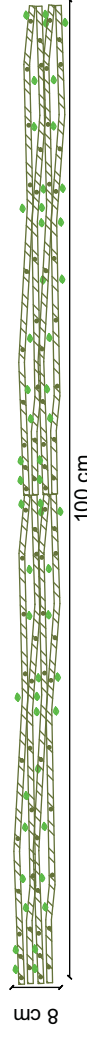
C2

- PALIÇADA VIVA
- ESTEIRA VIVA
- GABIÃO



SEM ESCALA

## DETALHE DOS FEIXES - PALIÇADA E ESTEIRA VIVA



8 cm

SEM ESCALA

| SEÇÕES TRANSVERSAIS E IMPLANTAÇÃO |                                                  |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| TÍTULO                            | RECUPERAÇÃO DO CANAL DA RUA CYRO CORREIA PEREIRA |
| AUTOR                             | CLEYTON STRESSER DA SILVA                        |
| CLIENTE                           | PREFEITURA DE CURITIBA                           |
| LOCAL                             | BAIRRO VITÓRIA REGIA, CIC, CURITIBA/PR           |
| PROFESSORES                       | LARISSA DE BRUM PASSINI E ELVÍDIO GAVASSONI NETO |
| DATA                              | JANEIRO DE 2021                                  |
| ESCALA                            | 01                                               |
| INDICADA                          |                                                  |

