

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ISABELA PURCKOTE SCORSIN
VINICIUS EDUARDO LEOPOLDINO RUPEL

**ESTABILIZAÇÃO DE UM CANAL DE DRENAGEM URBANO UTILIZANDO
TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL**

CURITIBA

2021

ISABELA PURCKOTE SCORSIN
VINICIUS EDUARDO LEOPOLDINO RUPEL

**ESTABILIZAÇÃO DE UM CANAL DE DRENAGEM URBANO UTILIZANDO
TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL**

Trabalho Final de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadores: Profº. Drº. Elvidio Gavassoni Neto;
Profª. Drª. Larissa De Brum Passini

CURITIBA
2021

TERMO DE APROVAÇÃO

ISABELA PURCKOTE SCORSIN
VINICIUS EDUARDO LEOPOLDINO RUPEL

ESTABILIZAÇÃO DE UM CANAL DE DRENAGEM URBANO NO CONJUNTO
VITÓRIA RÉGIA EM CURITIBA-PR, UTILIZANDO TÉCNICAS DE
ENGENHARIA NATURAL

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial à conclusão do
Curso de Engenharia Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do
Paraná, pela seguinte banca examinadora.

Prof^o. Dr^o. Elvídio Gavassoni Neto
Orientador – Departamento de Construção Civil, UFPR

Prof^a. Dr^a. Larissa De Brum Passini
Orientadora – Departamento de Construção Civil, UFPR

Eng^a. Lucy Marta Schellin
Secretaria Municipal do Meio Ambiente, PMC

Prof^a. Dr^a. Roberta Bomfim Boszczowski
Departamento de Construção Civil, UFPR

Curitiba, 25 de Março de 2021

AGRADECIMENTOS

Este trabalho finda um estudo iniciado ao fim de 2019, com frequentes discussões e trocas de ideias, advindo da união de grandes áreas da Engenharia Civil, em especial a Engenharia Natural e o estudo de estabilização e recuperação de encostas naturais. Contudo, a realização do presente trabalho só foi possível com o apoio e auxílio direto de diversas pessoas. Gostaríamos, portanto, de deixar os devidos e sinceros agradecimentos aqui registrados.

Aos nossos pais Edison Luiz Rupel, Leandra Leopoldino, quanto pais do autor Vinicius Rupel, Samuel Scorsin e Margarete Purckote, quanto pais da autora Isabela Scorsin, pelo amor e apoio incondicionais nessa extensa caminhada. Aos nossos avós Benedito Leopoldino, Maria Leopoldino, quanto avós do autor Vinicius Rupel e Miriam Purckote quanto avó da autora Isabela Scorsin, pela experiência, fraternidade e apoio nos dados.

Ao Prof. Dr. Elvídio Gavassoni Neto e à Prof.^a Dr.^a Larissa De Brum Passini por todos os conhecimentos divididos e passados na função de tutores e orientadores desse Trabalho Final de Curso, bem como em todas as matérias ofertadas na graduação, que nos possibilitaram ter o alicerce técnico para execução do trabalho. À Prof.^a Dr.^a Roberta Bomfim Boszczowski e à Eng.^a Lucy Marta Schellin por comporem a banca examinadora, dando sugestões e críticas de suma importância para o aprimoramento desse trabalho.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) por propiciar, em nome do autor Vinicius Rupel, uma ampla experiência profissional e pessoal quanto à Engenharia Civil. Ao PET Engenharia Civil, por estarem comigo por quase dois anos de graduação e a todos os petianos e petianas que conheci, os quais levo como amigos até hoje.

A todos os nossos amigos e amigas, em nome João Maurício Fernandes, Lorena Clavijo, Luan Kleber, Marcus de Camargo, Letícia Wan-Dall, Amanda Gusso, por estarem do nosso lado ao longo dos anos de curso, bem como pela parceria e sobre-humana paciência conosco. Aos nossos animais de estimação

que, embora não consigam compreender, foram de extrema importância para a manutenção da saúde mental, sobretudo nos períodos de confinamento.

Ao corpo docente da Universidade Federal do Paraná, por toda a transmissão de conhecimento realizada ao decorrer dos 5 anos de graduação e por toda a dedicação profissional. Aos engenheiros Cleyton Stresser, Marcelo Sefrin e Leandro Castelani por todo o auxílio na execução desse trabalho, seja nas dicas de referências, seja no auxílio para o correto dimensionamento das intervenções.

À Universidade Federal do Paraná, por fim, por nos possibilitar a realização do curso de Engenharia Civil e possibilitar outros diversos cursos, promovendo ensino, pesquisa e extensão à sociedade brasileira como um todo, como uma universidade pública, gratuita e de indiscutível qualidade.

RESUMO

Canais de drenagem urbanos estão sujeitos a processos desestabilizantes como erosão e movimentos de massas, em condições naturais tais canais possuem condições de adquirir configurações estáveis de equilíbrio. Contudo, o crescimento desordenado dos meios urbanos, atrelados à omissão do poder público e da própria sociedade com uma adequada gestão de bacias hidrográficas urbanas e um manejo inadequado dos canais de drenagem podem inviabilizar o equilíbrio desses sistemas. A ampla impermeabilização da superfície das bacias e a redução extensiva da camada vegetativa contribuem, por meio do aumento do escoamento superficial, com a ocorrência de enchentes e inundações, bem como com a potencialização de processos erosivos. Tais processos costumam ser solucionados por meio de abordagens da Engenharia tradicional, que buscam o aumento da capacidade do canal. Contudo, tais soluções podem não contribuir para a estabilização dos canais, podendo até mesmo serem rejeitadas pelos sistemas naturais em que estão inseridas. Com esse panorama, faz-se necessária a busca por alternativas que visem restabelecer o equilíbrio dos canais de drenagem urbana com o meio ambiente de maneira natural. A utilização de vegetação com função de estabilização de taludes, canais e rios, se apresenta como uma forma sustentável e adequada de solução de problemas em que comumente seriam aplicadas técnicas usuais de engenharia. Dessas alternativas de intervenção trata a Engenharia Natural, cujo uso para estabilização de um canal artificial urbano de drenagem é o principal objetivo deste trabalho. Como estudo de caso, considera-se o canal de drenagem urbana localizado no Conjunto Habitacional Vitória Régia, na Cidade Industrial, em Curitiba – PR. O projeto contempla a fase conceitual e básica da obra e resulta no memorial descritivo de dimensionamento das intervenções adotadas, desenhos de engenharia das intervenções adotadas e o orçamento para a implementação das técnicas de estabilização. Inicialmente foi realizado um estudo da área em que o canal está inserido, contemplando características socioeconômicas, ocupação e utilização, seguido do levantamento das características hídricas do local, bem como as características do solo. O resultado obtido demonstra que existe viabilidade na aplicação das técnicas de Engenharia Natural para estabilização do trecho de estudo.

Palavras-chave: Processos Erosivos. Bioengenharia de Solos. Estabilização de taludes.

ABSTRACT

Urban drainage channels are subject to destabilizing processes, such as erosion and mass movements. In natural conditions, these channels are able to acquire stabilized balanced conditions. However, the disordered growth of urban areas, along with the omission of public authorities and society itself, the management of urban watersheds and inadequate management of drainage channels may make the balance of these systems unfeasible. A wide waterproofing of the surface of the basins and the extensive reduction of the vegetative layer contribute to floods, due to the superficial drainage, potentializing erosion processes. These processes are usually solved by using traditional engineering approaches that seek to increase the channel capacity. Nonetheless, such solutions may not contribute to a stabilization of the channels, and may even be rejected by the natural systems in which they are inserted. Because of that, it is necessary to search for alternatives that aim to restore the balance of the urban drainage channels to the environment in a natural way. The use of vegetation that stabilizes slopes, channels and rivers, presents itself as a sustainable and appropriate way of solving problems in which the usual engineering techniques are commonly applied. Natural Engineering deals with these intervention alternatives, making the stabilization of an artificial urban drainage channel the main objective of this paper. As a case study, this paper considers an urban drainage channel located in the Vitória Régia Housing Complex, in the Industrial City, in Curitiba - PR. The project contemplates a conceptual and basic phase of the work and results in the descriptive memorandum for the dimensioning of the adopted measures, the engineering drawings of these measures, and the budget for the implementation of the stabilization techniques. Initially, a study was carried out in the area where the channel is, considering its socioeconomic characteristics, occupation, and use, followed by a survey of the water characteristics of the place, as well as the characteristics of the soil. The result makes the feasibility in the application of Natural Engineering techniques to stabilize the study area clear.

Keywords: Erosive processes. Soil Bioengineering. Slope stabilization.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE QUADROS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE SÍMBOLOS	14
1. INTRODUÇÃO	21
1.1. OBJETIVO.....	24
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1. ESTABILIZAÇÃO DE CANAIS URBANOS.....	26
2.1.1. Processos de Perda de Estabilidade	26
2.1.2. Processos Fluviais	27
2.1.3. Estudos de Caso	28
2.2. ENGENHARIA NATURAL.....	29
3. PROJETO CONCEITUAL	32
3.1. PLANO DIRETOR E ZONEAMENTO DA ÁREA.....	34
3.2. A BACIA DO RIO BARIGUI.....	35
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL.....	40
3.4. ESTUDOS HIDRÁULICO-HIDROLÓGICOS.....	48
3.5. DIAGNÓSTICO DO CANAL.....	58
3.6. ALTERNATIVAS DE SOLUÇÕES.....	62
3.6.1. Retaludamento	62
3.6.2. Plantio de Banquetas	63
3.6.3. Parede Krainer	63
3.6.4. Esteira Viva	64
3.6.5. Paliçada Viva	65
3.6.6. Feixes Vivos	66
3.6.7. Não Intervenção	66
3.7. RECOMENDAÇÕES PARA O PROJETO BÁSICO.....	67
4. PROJETO BÁSICO	68
4.1. ESCOLHA DAS INTERVENÇÕES DE PROJETO.....	68
4.2. MATERIAIS UTILIZADOS.....	70

4.2.1. Materiais Inertes	70
4.2.2. Materiais Vegetativos	71
4.3. DIMENSIONAMENTO DAS INTERVENÇÕES ESCOLHIDAS	74
4.3.1. Banqueta Vegetada	74
4.3.2. Paliçada Viva	79
4.3.3. Grade Viva	96
4.3.4. Parede Krainer	104
4.3.5. Canaletas de Drenagem	112
4.4. QUANTITATIVO E CUSTOS ESTIMADOS	116
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
6. REFERÊNCIAS	127
ANEXO A – PRANCHA DE LOCALIZAÇÃO DO CANAL	136
ANEXO B – PRANCHA DE DETALHAMENTO DAS INTERVENÇÕES	138
ANEXO C – PRANCHA LOGINTUDINAL DAS INTERVENÇÕES	140

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA VILA DE VITÓRIA RÉGIA EM REFERÊNCIA AO BRASIL.....	32
FIGURA 2 - TRECHO DE ESTUDO DO CANAL DE DRENAGEM DA RUA MAJOR VICTOR FEIJÓ, VITÓRIA RÉGIA, CURITIBA, PR.....	34
FIGURA 3 - ZONEAMENTO DA REGIÃO DE INTERESSE	35
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO BARIGUI NO ESTADO DO PARANÁ.....	36
FIGURA 5 - MAPA DE USO DO SOLO NA BACIA DO RIO BARIGUI	39
FIGURA 6 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM DO CANAL DE ESTUDO.....	41
FIGURA 7 - PERFIL DE ELEVAÇÃO DO TALVEGUE PRINCIPAL.....	43
FIGURA 8 - CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CANAL	44
FIGURA 9 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO SUL DE CURITIBA, EM DESTAQUE O BAIRRO DA CIC	45
FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO EM PLANTA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS CONSIDERADAS	47
FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DO CANAL DE ESTUDO RELACIONADO AO CANAL DE REFERÊNCIA.....	48
FIGURA 12 - SEÇÕES TRANSVERSAIS CONSIDERADAS.....	48
FIGURA 13 - ALTURA DA LÂMINA DE ÁGUA NAS SEÇÕES.....	54
FIGURA 14 - ÁBACO DE DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS	56
FIGURA 15 - EXTENSÃO DO CANAL SEM PONTOS DE EROSIÃO.....	59
FIGURA 16 - EXTENSÃO DO CANAL COM VEGETAÇÃO DE MARGEM	59
FIGURA 17 - PONTOS DE EROSIÃO NO EXUTÓRIO	60
FIGURA 18 - PROCESSO MODERADO DE EROSIÃO AO LONGO DO CANAL	60
FIGURA 19 - VEGETAÇÃO ARBUSTIVA E AUSÊNCIA DE LIMPEZA NO CANAL.....	61
FIGURA 20 - BANQUETAS COM ESTACAS PLANTADAS ENRAIZANDO	63
FIGURA 21 - MODELO DE PAREDE KRAINER SIMPLES	64
FIGURA 22 - MODELO DE ESTEIRA VIVA.....	65
FIGURA 23 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UMA PALIÇADA VIVA.....	66
FIGURA 24 - INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO NA ADOÇÃO DAS INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA NATURAL	68
FIGURA 26 - ESPÉCIES POSSÍVEIS PARA AS INTERVENÇÕES ESCOLHIDAS.....	73
FIGURA 26 - EXEMPLO DE GRAMA-CURITIBANA (<i>AXONOPUS COMPRESSUS</i>).....	74
FIGURA 27 - MODELO ESQUEMÁTICO DE BANQUETA VEGETADA.....	75
FIGURA 28 - ESQUEMA DE GEOMETRIA PADRÃO DAS BANQUETAS VEGETADAS.....	78
FIGURA 29 - MODELO ESQUEMÁTICO DE PALIÇADA VIVA	79
FIGURA 30 - ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL.....	81

FIGURA 31 - CONFIGURAÇÃO DOS EMPUXOS NA PALIÇADA VIVA	84
FIGURA 32 - EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NO PILARETE.....	88
FIGURA 33 - DETERMINAÇÃO DE MOMENTO E CORTANTE NAS LONGARINAS	90
FIGURA 34 - CONFIGURAÇÃO DAS LIGAÇÕES ESTRUTURAIS.....	94
FIGURA 35 - ESQUEMA GRADE VIVA.....	97
FIGURA 36 – DETALHE LIGAÇÃO GRADE VIVA.....	104
FIGURA 37 - ESQUEMA PAREDE KRAINER	105
FIGURA 38 – DETALHE LIGAÇÃO PAREDE KRAINER.....	109
FIGURA 39 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA CANALETA DE DRENAGEM	115

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO CANAL.....	53
QUADRO 2 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO CANAL PARA VAZÃO DE CANAL COMPLETO.....	55
QUADRO 3 - RESULTADOS DAS TENSÕES NO CANAL	57
QUADRO 4 - RELAÇÃO DAS ESPÉCIES POSSÍVEIS PARA UTILIZAÇÃO ..	72
QUADRO 5 - DADOS DO SOLO	80
QUADRO 6 - ESPAÇAMENTO ENTRE PILARETES	82
QUADRO 7 - DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DE FIXA	85
QUADRO 8 - VERIFICAÇÃO DOS PILARETES.....	89
QUADRO 9 - VERIFICAÇÃO DAS LONGARINAS	91
QUADRO 10 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO CANAL APÓS PALIÇADA VIVA.....	95
QUADRO 11 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS RECALCULADOS PARA VAZÃO COMPLETA.....	96
QUADRO 12 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO CANAL APÓS PAREDE KRAINER.....	111
QUADRO 13 - PARÂMETROS HIDRÁULICOS RECALCULADOS PARA VAZÃO COMPLETA APÓS PAREDE KRAINER	111
QUADRO 14 - RESULTADOS DAS TENSÕES NA SEÇÃO COM PAREDE KRAINER.....	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO BARIGUI	37
TABELA 2 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA SUB BACIA INFLUENTE NO CANAL DE ESTUDO.....	41
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO	51
TABELA 4 - COEFICIENTE DE DEFLÚVIO DA BACIA DE INTERESSE.....	51
TABELA 5 - TENSÃO CISALHANTE MÁXIMA PARA EROÇÃO DOS MATERIAIS	58
TABELA 6 - PROPRIEDADES DA MADEIRA <i>EUCALYPTUS CITRIODORA</i> ..	70
TABELA 7 - PRECIPITAÇÕES ACUMULADAS MENSAIS MÉDIAS DE CURITIBA DE 1981 A 2010	76
TABELA 9 - VALORES CARACTERÍSTICOS DO PROJETO	86
TABELA 10 - VALORES DE CÁLCULO DO PROJETO	87
TABELA 10 - PARÂMETROS OBTIDOS ATRAVÉS DO DIMENSIONAMENTO – PAREDE KRAINER	109
TABELA 11 - CARACTERIZAÇÃO DAS CANALETAS.....	113
TABELA 12 - DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA CANALETA.....	114
TABELA 13 - RELAÇÃO DA QUANTIDADE DE PLANTAS UTILIZADAS POR METRO LINEAR E CUSTOS POR INTERVENÇÕES.....	117
TABELA 14 - ESTIMATIVA DE CUSTOS PAREDE KRAINER.....	118
TABELA 15 – ESTIMATIVA DE CUSTOS CANALETA DE DRENAGEM	119
TABELA 16 – ESTIMATIVA DE CUSTOS DE BANQUETA VEGETADA	120
TABELA 17 – ESTIMATIVA DE CUSTOS DA PALIÇADA VIVA.....	120
TABELA 18 – ESTIMATIVA DE CUSTOS DA GRADE VIVA.....	121
TABELA 19 – ESTIMATIVA DE CUSTOS POR METRO LINEAR.....	121
TABELA 20 – ESTIMATIVA DE CUSTO TOTAL DE OBRA	122
TABELA 21 – ESTIMATIVA DE CUSTO TOTAL DE OBRA COM MUTIRÃO	122

LISTA DE SÍMBOLOS

- A : Perda de solo por unidade de área ($t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$);
- A_{bacia} : Área da bacia de deflúvio (km^2);
- A_n : Área molhada (m^2);
- B : Largura da parede (m);
- c : Coeficiente de deflúvio (%);
- C_l : Fator de correção relacionado a largura e profundidade do canal (adimensional);
- CM : Fator de uso e manejo do solo (adimensional);
- c' : Intercepto coesivo (kPa);
- c_{cor}' : Coesão corrigida do solo da fundação (kPa);
- D : Comprimento da rampa (m);
- d_{anc} : Diâmetro da ancoragem metálica (m);
- D_f : Comprimento de fixa (m);
- d_g : Diâmetro do madeiramento utilizado nas grades vivas (m);
- D_k : Diâmetro do madeiramento da parede Krainer (mm);
- d_p : Diâmetro do pilarete (m);
- d_{pf} : Diâmetro do parafuso (mm);
- d_0 : Diâmetro da pré-furação (mm);
- e : Ângulo do talude contido (graus);
- Ea : Empuxo ativo do solo (kN/m);
- E_{cd_0} : Módulo de elasticidade de cálculo (MPa);
- E_{ck_0} : Módulo de elasticidade característico (MPa);

e_m : Excentricidade do peso da madeira em relação ao ponto de tombamento (m);

Ep : Empuxo passivo do solo (kN/m);

Es : Empuxo de sobrecarga (N);

e_s : Excentricidade do peso de solo dentro das gavetas em relação ao ponto de tombamento (m);

e_{xc} : Excentricidade em relação ao centro de massa da seção (m);

F_C : Força concentrada (kN);

Fr : Número de Froude (adimensional);

FS : Fator de segurança (adimensional);

g : Aceleração da gravidade (m^2/s);

h : Profundidade média do canal (m);

h_a : Profundidade do escoamento (m);

H_{ext} : Comprimento do pilarete externo ao solo (m);

H_j : Altitude exutório (m);

H_m : Altitude máxima (m);

h_s : Altura do estrato (m);

ΔH : Amplitude Altimétrica (m);

I : Inclinação longitudinal (m/m);

i : Intensidade pluviométrica (mm/h);

I_c : Índice de conformação da bacia (m^2/m^2);

I_d : Índice de drenagem da bacia (m/m^2);

$I_{méd}$: Inclinação longitudinal média (m/m);

$i_{máx}$: Intensidade pluviométrica máxima (mm/h);

$i_{m\acute{a}x}^{1,5 \text{ anos}}$: Intensidade pluviométrica máxima para vazão de canal completo (mm/h);

I_p : Momento de Inércia da seção do pilarete (m^4);

K : Índice de erodibilidade do solo ($t.h. MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$);

K_a : Coeficiente de empuxo ativo (adimensional);

K_{mod} : Coeficiente de minoração (adimensional);

K_{mod1} : Coeficiente de minoração relativo à duração do carregamento (adimensional);

K_{mod2} : Coeficiente de minoração relativo à umidade do material (adimensional);

K_{mod3} : Coeficiente de minoração relativo à qualidade do madeiramento (adimensional);

K_p : Coeficiente de empuxo passivo (adimensional);

L : Comprimento do canal principal (m);

L_{bacia} : Comprimento da bacia (m);

L_{anc} : Comprimento de ancoragem (m);

L_{arg} : Largura média do canal (m);

L_f : Comprimento da peça submetida a tensão (mm);

L_h : Espaçamento horizontal das grades vivas (m);

L_p : Distância entre pilaretes (m);

LS : Índice topográfico (adimensional);

$L_{talvegue}$: Comprimento do talvegue (m);

L_v : Espaçamento vertical das grades vivas (m);

M_d : Momento desestabilizante (kN.m);

M_e : Momento estabilizante (kN.m);

$M_{m\acute{a}x}$: Momento atuante máximo (kN.m);

$Mn_{m\acute{a}x,d}^+$: Momento máximo positivo de cáculo atuante no eixo normal (kN.m);

$Mn_{m\acute{a}x,d}^-$: Momento máximo negativo de cáculo atuante no eixo normal (kN.m);

$Mt_{m\acute{a}x,d}^+$: Momento máximo positivo de cáculo atuante no eixo tangencial (kN.m);

$Mt_{m\acute{a}x,d}^-$: Momento máximo negativo de cáculo atuante no eixo tangencial (kN.m);

P : Fator de práticas conservacionistas (adimensional);

P_{bacia} : Perímetro da bacia (m);

P_h : Perímetro molhado (m);

P_k : Carga atuante sobre as peças da parede Krainer (N);

P_m : Carga de manuteno (kN);

P_{mn} : Parcela normal da carga de manuteno (kN);

P_{mt} : Parcela tangencial da carga de manuteno (kN);

$Q_{1,5}$: Vazão de canal completo (m³/s);

Q : Vazão de projeto (m³/s);

q_{eq} : Carga distribuída equivalente (kN/m);

Q_{long} : Carga atuante nas longarinas (kN);

Q_{pil} : Carga atuante no pilarete (kN);

q_s : Peso próprio do solo (kN/m);

q_{sn} : Parcela normal do carregamento de peso próprio do solo (kN/m);

q_{st} : Parcela tangencial do carregamento de peso próprio do solo (kN/m);

q_w : Carregamento de peso da grade viva (kN/m);

q_{wn} : Parcela normal do carregamento de peso próprio da grade viva (kN/m);

q_{wt} : Parcela tangencial do carregamento de peso próprio da grade viva (kN/m);

R : ndice de erosividade (MJ.mm. h⁻¹.ha⁻¹. ano⁻¹);

R_h : Raio hidráulico (m);

R_{vd1} : Resistência das ligações quanto ao cisalhamento (kN);

R_x : Resultante das forças horizontais (kN);

R_y : Resultante das forças verticais (kN);

S : Declividade do leito do canal (%);

S_c : Empuxo calculado (kN/m);

s_p : Espaçamento entre pilaretes (m);

t : Duração da chuva (minutos);

T_c : Tempo de concentração da bacia (horas);

T_R : Tempo de recorrência (anos);

U_{amb} : Umidade ambiente (%);

V : Velocidade de escoamento (m/s);

$V_{m\acute{a}x}$: Esforço cortante atuante máximo (kN);

W : Empuxo de terra aplicado ao último ramo da estrutura (kPa);

W_m : Peso da madeira (N);

W_s : Módulo da seção do pilarete (m³);

W_{solo} : Peso do solo dentro das gavetas (N);

W_y : Módulo resistente (mm³);

y : Altura da lâmina de água (m);

ϕ' : Ângulo de atrito efetivo;

α_e : Coeficiente para cálculo do embutimento da ligação (adimensional);

α : Ângulo de inclinação do talude (graus);

η : Coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional);

η_{eq} : Coeficiente de rugosidade de Manning equivalente (adimensional);

μ : Coeficiente de atrito entre a base da parede e solo (graus);

λ_{fl} : Coeficiente de flambagem segundo a classe de umidade (adimensional);

$\rho_{ap (12\%)}$: Massa específica aparente à umidade de 12% (kg/m^3);

β : Parâmetro de cálculo à resistência cisalhante das ligações (adimensional);

β_{lim} : Parâmetro limite de cálculo à resistência cisalhante das ligações (adimensional);

$\delta_{m\acute{a}x}$: Máxima deformação atuante (mm);

δ_{lim} : Deformação limite (mm);

γ : Peso específico da água (kN/m^3);

γ_c : Coeficiente de minoração quanto à compressão (adimensional);

γ_{sat} : Peso específico saturado do solo (kN/m^3);

γ_t : Coeficiente de minoração quanto à tração (adimensional);

γ_v : Coeficiente de minoração quanto ao cisalhamento (adimensional);

γ_{wa} : Coeficiente de ponderação para resistência à tração do aço (adimensional);

γ_{wood} : Peso específico da madeira (kN/m^3);

τ_0 : Tensão tangencial média na seção (N/m^2);

τ_l : Tensão cisalhante no leito do canal (N/m^2);

τ_m : Tensão cisalhante nas margens do canal (N/m^2);

$\tau_{m\acute{a}x}$: Esforço cisalhante atuante máximo (MPa);

σ_c : Tensão de compressão atuante (MPa);

σ_e : Tensão de escoamento (MPa);

$\sigma_{m\acute{a}x}^+$: Máxima tensão de tração atuante (MPa);

$\sigma_{m\acute{a}x}^-$: Máxima tensão de compressão atuante (MPa);

σ_t : Tensão de tração atuante (MPa);

σ_{t90} : Tensão de tração atuante perpendicular às fibras (MPa);

f_{cd_0} : Resistência de cálculo à compressão da madeira (MPa);

f_{ck_0} : Resistência característica à compressão paralela às fibras da madeira (MPa);

f_{ed90} : Resistência de cálculo ao embutimento (MPa);

f_{td_0} : Resistência de cálculo à tração paralelo às fibras (MPa);

f_{td90} : Resistência de cálculo à tração perpendicular às fibras (MPa);

f_{tk_0} : Resistência à tração paralela às fibras (MPa);

f_{tk90} : Resistência à tração perpendicular às fibras (MPa);

f_{vd90} : Resistência de cálculo ao cisalhamento perpendicular às fibras (MPa);

f_{vk90} : Resistência ao cisalhamento perpendicular às fibras; (MPa);

f_{yd} : Resistência de cálculo ao escoamento (MPa);

f_{yk} : Resistência característica ao escoamento (MPa);

1. INTRODUÇÃO

A conservação das margens de rios e canais é de grande interesse e importância para os mais variados municípios do Brasil e em Curitiba não é diferente. A cidade, por vezes, dita como capital ecológica, é conhecida pela urbanização, pela miscigenação entre as áreas densamente edificadas e as áreas verdes, pelos parques urbanos e pela preservação urbana em geral.

Na maioria das cidades brasileiras, as margens dos rios são ocupadas por populações de baixa renda assentadas informalmente em função de sua exclusão de áreas urbanizadas (CORAZZA et al.,2008). Com a ocupação desordenada surgem diversos problemas ambientais urbanos como inundações, proliferação de doenças veiculadas à água, ao despejo de efluentes sanitários nos corpos hídricos, aos deslizamentos de terra, enchentes e ao aumento do escoamento superficial (SILVA et al., 2016).

Mitigar os problemas encontrados nos rios urbanos é essencial para a manutenção da qualidade de vida da população local, tornando-se necessária a revitalização desses sistemas naturais. Para Alencar (2017) o processo de revitalizar implica em reestabelecer algumas funções originais e criar outras novas, fazendo com que o corpo d'água atinja uma condição de equilíbrio nova. Por mais que existam diversas técnicas tradicionais para a recuperação de rios e canais, elas podem ser agressivas ao ecossistema local, promovendo sua descaracterização. Técnicas de engenharia natural tendem a se adaptar melhor ao meio que se inserem, uma vez que buscam emular os ecossistemas locais e promovem maior adequação da intervenção à paisagem.

Nesse contexto, a conservação, a estabilização e os estudos das margens de cursos de água se fazem necessárias, se não pela urbanização propriamente dita, pela sua função social e para garantir a segurança dos cidadãos que circundam esses ambientes. As ações do poder público para lidar com os problemas nos canais, muitas vezes, mostram-se ineficazes à medida que são recorrentes as manifestações patológicas e as reclamações dos moradores das regiões circundantes. Portanto, as medidas adotadas resultam em gastos elevados, sobretudo aqueles com retrabalho e manutenção.

As instabilidades das margens são geradas por diversos fatores, desde intervenções humanas, como intensa ocupação, até causas naturais. Contudo, em centros urbanos densos esse cenário se intensifica, alterando as características das encostas dos cursos de água.

Esse panorama encontra-se presente no maior bairro da capital paranaense, a CIC (Cidade Industrial de Curitiba), segundo o IBGE (2010), mais especificamente na vila Vitória Régia, que é onde concentra o estudo de caso objeto deste trabalho. Muitos dos canais de drenagem presentes na vila sofrem com insuficiência em capacidade drenagem, instabilidade de margens, processos erosivos e ocupação da calha do canal por vegetação inadequada. Com isso, é justificada uma proposta de intervenção técnica de estabilização das margens dos canais de drenagem. A vila Vitória Régia possui uma numerosa população e situa-se na divisa com Araucária, município da região metropolitana de Curitiba. A maior parte dos loteamentos da vila fica próxima aos canais de drenagem, e o adequado funcionamento dos diversos canais da área é importante para a segurança e saúde da população do bairro. Além disso o funcionamento dos canais de drenagem pode interferir nas condições fluviais do rio Barigui o que é de importância para toda a população da bacia desse rio.

Para a estabilização, é possível lançar mão, dentre outros métodos, da engenharia natural ou da engenharia convencional tais como o retaludamento, a retificação e a impermeabilização do leito e margens dos canais.

A engenharia natural é um subdomínio da Engenharia que tem objetivos técnicos, ecológicos, estéticos, construtivos e econômicos, recorrendo principalmente à utilização de materiais construtivos vivos (SCHIECHTL, 1980). Portanto, trata-se de uma alternativa aos métodos convencionais de engenharia, sobretudo ao uso de materiais inertes como concreto utilizado na canalização e revestimento de cursos de água em meios urbanos. Técnicas construtivas de Engenharia Natural podem ser utilizadas para solucionar problemas estruturais de estabilização geotécnica e fluviais, controlar processos erosivos superficiais, e simultaneamente projetar ecossistemas em equilíbrio dinâmico (SOUSA, 2017). As técnicas da engenharia natural não são modernas no que diz respeito

à cronologia da engenharia, entretanto, o estabelecimento como uma área técnica e reconhecida cientificamente é recente (SUTILI; GAVASSONI, 2017).

Trata-se de uma prática mais comum em países europeus, sendo ainda relativamente desconhecida em cenário nacional, portanto, justificando o objetivo deste trabalho uma vez que o mesmo possa eventualmente servir à divulgação e à disseminação dessa prática que busca intervir tecnicamente findando em uma condição mais semelhante à natural.

Para a realização de intervenções, incluindo aquelas que se utilizam das técnicas de engenharia natural, é necessária a composição de diversos dados e estudos. Como o diagnóstico dos processos de instabilidade, através da análise da ocorrência de processos erosivos e caracterização hidráulico-hidrológica da área de estudo, do canal e da bacia hidrográfica. Sendo considerado o volume de chuvas, o fluxo e a drenagem do local em questão, estudo geológico-geotécnico do solo do local, levantamento florístico da vegetação local, levantamento de espécies vegetais nativas passíveis de utilização nas técnicas de Engenharia Natural bem como de materiais inertes também empregados no local. Após o diagnóstico e levantamento das soluções é possível estabelecer diretrizes para o projeto básico.

Um forte motivador para a escolha da engenharia natural como enfoque neste trabalho vale-se pela sua segurança, facilidade de construção e manutenção, bem como seu custo, de maneira geral, menor se comparado às medidas convencionais, além da melhor integração ao ecossistema e seu caráter estético inerente. Esses valores por si só já são fortes motivadores, contudo a eles somam-se o fato de a área de estudo estar em uma área de vulnerabilidade social, em que a comunidade se mostra bastante engajada para a solução dos problemas de instabilidade desses canais. Sendo, portanto, as soluções com engenharia natural mais acessíveis para a construção até mesmo com o auxílio dos moradores locais, por meio de mutirões conforme experiências prévias na América Central (PETRONE; PRETI, 2005) e Equador (PETRONE; PRETI, 2013).

Utilizar métodos de engenharia convencional, sobretudo para obras de pequeno porte, pode influir em um maior custo geral para a aplicação (DURLO;

SUTILI, 2014). Além desse fator, o maquinário utilizado para a execução dos métodos convencionais, sobretudo os de grande porte, pode acarretar em um impacto adicional ao ambiente o qual destina-se a obra dimensionada (LEWIS, 2000). Tendo em vista as características vegetativas dos canais da vila, bem como a sua proximidade a um braço do rio Barigui, uma intervenção que esteja melhor integrada ao meio ambiente apresenta benefícios técnicos, ambientais e sociais.

O presente trabalho busca apresentar um projeto de estabilização fluvial, pautado, sobretudo, em conceitos da Engenharia Natural e suas técnicas, assim, é possível verificar a viabilidade de intervenção baseada na engenharia natural no canal levantado. Além disso, são importantes, a discussão e a disseminação de temas pouco abordados nas graduações em engenharia civil de maneira geral, que podem mostrar-se vantajosos nos quesitos técnicos, econômicos e socioambientais.

1.1. OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo elaborar um projeto básico de estabilização baseado em técnicas de engenharia natural de um trecho de canal artificial de drenagem urbana localizado na vila de Vitória Régia, na Cidade Industrial de Curitiba, o qual deságua em um braço do rio Barigui.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para a obtenção do objetivo levantado, o presente trabalho inicia-se com a breve revisão bibliográfica dos temas correlatos e seguem com a caracterização geral da bacia hidrográfica na qual o canal de interesse está inserido, com dados de biomas, dados morfométricos e aspectos geológicos. O projeto é dividido em duas fases: conceitual e básica. O projeto conceitual tem como objetivo o levantamento de dados suficientes para elencar possíveis

intervenções a se adotar. Para tal, é realizada uma caracterização da sub bacia do canal de maneira particular e detalhada, bem como realização dos estudos e cálculos hidrológicos necessários ao dimensionamento. Por fim, há a discussão das possíveis soluções para a estabilização das margens para, a posteriori, adoção de uma medida particular e definitiva, que servirá de base para o projeto executivo. O projeto básico, por sua vez, tem como objetivo o dimensionamento das soluções de intervenção escolhidas. Para tal, é realizado a escolha das intervenções e subsequente escolha dos materiais a serem utilizados no dimensionamento. Posteriormente é realizado o dimensionamento propriamente dito, seguido do levantamento do quantitativo dos materiais e da execução de um orçamento inicial para a implementação das soluções de estabilização.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os itens a seguir abordarão aspectos de fundamental importância para a realização dos estudos sobre os canais urbanos, processos fluviais, estabilidade de taludes e execução de obras de engenharia natural. A compreensão desses temas, aliada à caracterização geomorfológica da bacia, permite a adequada análise do local, a detecção de problemas e a adoção de soluções de estabilização.

2.1. ESTABILIZAÇÃO DE CANAIS URBANOS

Para entender como manejar um curso d' água é necessário que se conheça a movimentação dos corpos sólidos e conseqüentemente seu fluxo. Também é fundamental a compreensão de como se dá a estabilidade para que se estabeleçam técnicas de prevenção de fenômenos de instabilidade e solução de eventos (DURLO; SUTILI, 2012).

2.1.1. Processos de Perda de Estabilidade

A água é um agente condicionante e deflagrador dos processos de instabilização de encostas, destacando como principal fator o fluxo d'água em solos e rochas (GODOIS, 2011).

Quando dentro da normalidade de fluxo de água em um canal, a movimentação de taludes se manifesta na forma de erosões e transportes inofensivos, por outro lado, quando o fluxo é aumentado, perdas maiores de estabilidade, como deslizamentos, são esperadas (DURLO; SUTILI, 2012).

Segundo os mesmos autores, os fenômenos de perda de estabilidade mais comuns são os rastejos, os fluxos, os deslizamentos e os desmoronamentos, destacando alguns fatores favoráveis aos movimentos como alteração no teor de umidade da massa, a retirada da tensão superficial, a elevação do peso do corpo e a conseqüente mudança do centro de gravidade

da massa de solo, a elevação da pressão devido à mudança no nível do lençol freático, a lavagem dos materiais cimentantes, a erosão subterrânea, o umedecimento repentino do solo e o seu inchamento.

2.1.2. Processos Fluviais

O cenário dos processos fluviais é sempre uma bacia hidrográfica. Uma bacia hidrográfica consiste na área de drenagem de uma rede de canais interligados (DURLO; SUTILI, 2012).

As precipitações que acontecem na área da bacia influenciam diretamente nos fluxos dos canais de drenagem, bem como suas características de geometria, tipo do solo e vegetação da bacia e das margens (SUTILI; DURLO; BRESSAN, 2004).

A ocupação territorial urbana, sem o devido planejamento integrado das diversas infraestruturas necessárias ao desenvolvimento harmônico da cidade, desencadeou o surgimento de problemas de drenagem por ocasião dos eventos hidrológicos de alta intensidade (RIGHETTO, 2009).

Com o desenvolvimento urbano, novas construções, ocupações, pavimentações, redução das áreas permeáveis, o assoreamento da rede de drenagem se torna mais evidente e a capacidade de escoamento é reduzida. A obstrução do escoamento pode afetar os condutos de drenagem ao longo do fluxo ou em áreas específicas, como no leito maior dos rios. Consequentemente, há um aumento na probabilidade de ocorrência de enchentes e maximização dos seus efeitos (DURLO; SUTILI, 2005). Assim, os hidrogramas de cheias, têm seus picos antecipados e acentuados. A combinação desses processos com a canalização dos cursos de água agrava o quadro apresentado, levando as redes de drenagem a crises de insuficiência, aumento da carga orgânica e de poluentes, reduzindo substancialmente a biodiversidade e a potencialidade de usos múltiplos da água (CARDOSO, 2012).

Segundo Binder (2002), um dos objetivos de intervenções em rios na Europa, para amenizar os problemas decorrentes da urbanização, é recuperar o funcionamento de ecossistema típico de águas correntes, através da aplicação de obras hidráulicas adaptadas à natureza. O conceito de reintegração da água

ao cenário urbano insere-se em um contexto bastante complexo, onde múltiplas demandas urbanísticas, ambientais e sociais exigem uma nova postura de governos, planejadores e cidadãos para o seu adequado equacionamento (CARDOSO, 2012).

2.1.3. Estudos de Caso

Quando se trata da recuperação de margens de rios há diversos estudos sobre o tema no Brasil, como exemplo o de Schmeier (2012) no Rio Grande do Sul e alguns estudos locais em Curitiba (Castelani (2018), Sefrin (2019) e Silva (2019)).

O projeto de Castelani (2018), para recuperação das margens do parque São Lourenço, localizado em Curitiba, identificou problemas de deslizamentos de solo e erosão das margens dos lagos e propôs intervenções de Engenharia Natural para solucionar os pontos de instabilidade encontrados. Para escolha do método adequado e análise da sua aplicabilidade, foram realizados diversos estudos do solo, da hidrologia e da vegetação.

Seguindo as diretrizes do estudo elaborado por Castelani (2018), o projeto de Sefrin (2019), propôs a revitalização de um trecho do Rio Bacacheri inserido no Parque General Iberê de Mattos, no município de Curitiba, através de técnicas de Engenharia Natural para mitigação dos impactos em rios urbanos.

Os dois estudos citados nos parágrafos anteriores embasam a aplicabilidade das técnicas da bioengenharia em lagos e canais do município de Curitiba. Há também o trabalho de Silva, Joenck e Bloinski (2019), que aborda a recuperação das margens de um canal na mesma região de desenvolvimento deste estudo de caso e é de fundamental importância para comparação dos dados e análise da hidrografia da região.

Com base no que foi apresentado por Silva, Joenk e Boinski (2019), a geometria de um canal pode ser determinada através de levantamento planialtimétrico no local que delimite sua seção. A próxima verificação deve ser por meio da verificação da velocidade de escoamento da água no trecho de estudo.

Cada localidade apresenta diferentes fórmulas que relacionam a intensidade de precipitação, duração e frequência das chuvas para obtermos a chuva de projeto. Seguindo as diretrizes da região em questão deve ser calculado o tempo de concentração da bacia e estimado seu tempo de retorno.

Com esses dados, é possível avaliar a intensidade das chuvas e a vazão de projeto por meio do método racional. Esse processo caracteriza o canal de forma a possibilitar a detecção de problemas de drenagem e estudos de recuperação.

2.2. ENGENHARIA NATURAL

Entende-se a Engenharia Natural como um braço da Engenharia Civil que ganha destaque por ter fins econômicos, construtivos, técnicos e também ecológicos (SCHIECHTL, 1980). Essas características são muito importantes e diferenciam a engenharia natural da sua vertente tradicional, que recorre apenas à utilização de materiais inertes e atribui finalidade paisagística ou de restauração ecológica às plantas (SAULI; CORNELINI, 2005).

A engenharia natural surge para contribuir para uma melhor compatibilização entre as necessidades de uso das sociedades humanas e a capacidade dos sistemas naturais para as preencherem (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Caracteriza-se pelo fato de que plantas ou partes delas são usadas como materiais de construção vivos, de forma que, no decorrer de seu desenvolvimento, elas contribuem significativamente para proteger o solo contra diversas formas de erosão (EFIB, 2015).

A Bioengenharia de Solos, termo inicialmente utilizado no Brasil para denominar a Engenharia Natural, tem sua base na manipulação de materiais vegetais combinados com técnicas de Engenharia tradicional para mitigar problemas de instabilidade de solos e taludes. As plantas ganham notoriedade por exercerem funções estruturais e fugirem do estigma do uso restrito para fins estéticos, ecológicos ou paisagísticos (LEWIS, 2000). Um dos grandes pontos positivos dessa técnica consiste no fato de possuir um baixo custo, por utilizar

material natural retirado do ambiente, propiciando a estabilização dos taludes e reduzindo o impacto visual expressivamente (GRAY; SOTIR, 1996).

As primeiras aplicações dessa técnica datam desde o império romano (SILVA, 2012). A estrutura de pensamento da Engenharia Natural nasceu na Europa, provavelmente porque a pressão para usá-la era muito alta, devido à população densa e também à sua antiga história de trabalho de segurança, originalmente manual, transformada ao longo do tempo em uma ciência complexa e orientada para a aplicação (EFIB, 2015). A vegetação como material de construção, associada a sistemas construtivos usando materiais inertes foi usada em circunstâncias muito diversas desde sua aplicação em guerras até a segurança de margens de canais (FERNANDES; FREITAS, 2011).

A engenharia natural consiste em um conjunto de abordagens técnicas à gestão dos sistemas ecológicos que vão desde as disciplinas de caracterização e avaliação dos sistemas biofísicos e de uso (FERNANDES; FREITAS, 2011).

As técnicas de engenharia natural servem como instrumento de estabilização de cenários erosivos e sedimentação de rios e canais, em sua maioria apresentam baixo custo e de pouca complexidade, evitando assim obras grandiosas com uso de máquinas pesadas e dando lugar a intervenções simples (SUTILI, 2001).

Um dos limitantes da engenharia natural está ligado à escassez de mão de obra qualificada, sendo necessário o desenvolvimento de sua profissionalização, bem como atenção à sazonalidade para realização das obras, visto que o material vegetal deve estar no estado adequado e também em condições climáticas locais favoráveis ao enraizamento (SCHMEIER, 2013).

Schiechtl e Stern (1996, 1997) classificam as funções da Engenharia Natural em quatro: geotécnica, que promove proteção da superfície do solo e de margens da erosão e aumento da estabilidade de taludes; ecológica, que modifica as características climatológicas locais e proporciona um ambiente adequado para o crescimento de outras espécies de plantas e animais; econômica, que reduz os custos de construção e manutenção e cria áreas que podem ser utilizadas com outras finalidades e, por fim, a estética, capaz de melhorar os aspectos visuais da paisagem e harmonizar as intervenções com a paisagem local.

As vantagens no uso de plantas, como alternativa construtiva à materiais inertes tradicionais, se dão na capacidade dos materiais vegetais de regenerar partes danificadas, na adaptação às mudanças ambientais e na melhoria da qualidade ambiental geralmente proporcionada de forma mais econômica (MAFFRA,2014). As aplicações de técnicas de Engenharia Natural, contudo, enfrentam algumas limitações, como áreas que não aceitam o crescimento de determinadas espécies de plantas, substratos que não possuem capacidade de suporte das intervenções, movimentações e fluxos de alta velocidade, necessidade de se aguardar períodos de dormência vegetativa para execução de algumas técnicas (MAFFRA, 2014).

A Engenharia Natural considera muitos métodos de construção e revegetação, a escolha das técnicas irá depender das características do local em questão, principalmente de vegetação e também do efeito que é objetivado. Os ganhos proporcionados pela aplicação da Bioengenharia vão além da viabilidade econômica e ambiental da solução, proporcionando também bônus estético (FISRWG, 1998)

A gestão e valorização das linhas de água em espaço urbano maximizando o seu valor e funcionalidade ecológica dentro das exigências hidráulicas estritas da suscetibilidade dos usos marginais, constitui um domínio onde a Engenharia Natural tem desenvolvido não só inúmeras intervenções como desenvolvido trabalhos de investigação e desenvolvimento experimental que permitem tipologias de intervenção com garantias de segurança hidráulica muito mais significativas (FERNANDES; FREITAS, 2011).

A estabilidade de um talude fluvial pode ser alcançada por meio da redução da velocidade do fluxo de água ou pelo aumento das forças de resistência do talude (DURLO; SUTILI, 2014).

3. PROJETO CONCEITUAL

O projeto conceitual visa a correta caracterização da área de estudo, do diagnóstico das manifestações patológicas de desestabilização dos sistemas fluviais em consideração e da descrição causa-efeito entre as características observadas e os problemas identificados. Ao fim da caracterização, o projeto busca possíveis soluções as quais correspondam de maneira efetiva à problemática levantada previamente. Terminando com prescrições específicas para a fase de projeto básico.

O canal de drenagem, objeto de análise deste trabalho, localiza-se na zona sudeste de Curitiba (Figura 1), especificamente na vila de Vitória Régia, no maior Bairro de Curitiba, a Cidade Industrial de Curitiba (CIC).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA VILA DE VITÓRIA RÉGIA EM REFERÊNCIA AO BRASIL



FONTE: OS AUTORES (2021)

A CIC possui uma população aproximada de 186.083 habitantes segundo estimativas de 2016 do Banco de Dados do Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC). O último dado oficial de população data do ano de 2010, em que o Censo levantou um montante de 172.822 pessoas vivendo no bairro. Além disso, a Cidade Industrial conta com uma área de 43,38 km² e

pertence à Bacia Hidrográfica do Rio Barigui. Devido à extensão da Cidade Industrial, ela é subdividida em três áreas, a porção norte em que estão as vilas Jardim Gabinete e Vila Sandra, entre outras, a área central em que engloba as vilas Itatiaia e Oswaldo Cruz, por exemplo, e por último a parte sul, com a Vila Verde e Vitória Régia, onde insere-se o canal de estudo deste trabalho. A vila Vitória Régia encontra-se próximo à divisa do município de Araucária com o Município de Curitiba e seus loteamentos estão dispostos às margens do rio Barigui.

O conjunto Vitória Régia possui cinco canais de drenagem (Figura 2) artificiais, de largura estreita, retilíneos, pouco profundos, sem revestimento e que drenam o bairro no sentido sudoeste desde as zonas relativamente mais altas do bairro até um canal artificial extravasor de maior largura, praticamente paralelo ao rio Barigui no trecho em que este margeia o Vitória Régia. O canal objeto deste projeto situa-se no canteiro central da rua Major Victor Feijó, e será tratado, especificamente, do trecho de 158 metros finais do referido canal, compreendidos entre duas ruas transversais (Rua Professor Fernando Carneiro e Rua José Laurindo de Souza), como mostrado destacado em vermelho na Figura 2. Em ambas extremidades existem pontilhões com alas de concreto armado, sobre os quais cruzam as referidas ruas transversais.

FIGURA 3 - ZONEAMENTO DA REGIÃO DE INTERESSE



FONTE: IPPUC ADAPTADO (2018)

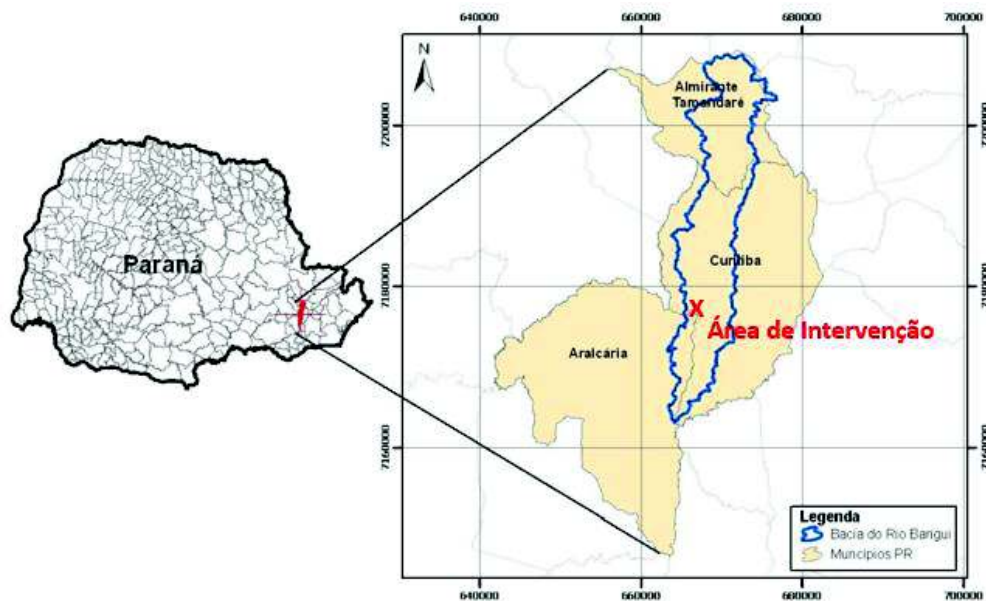
3.2. A BACIA DO RIO BARIGUI

O rio Barigui possui aproximadamente 66 km de extensão, nascendo na Serra da Betara, em Almirante Tamandaré, ao norte da Região Metropolitana de Curitiba, e se desenvolvendo inicialmente em sentido sul, passando por diversos bairros do município de Curitiba, incluindo a CIC, no qual situa-se o trecho do canal objeto deste estudo, e deságua no Rio Iguazu, no Bairro da Caximba em Curitiba, bairro limítrofe com os municípios Araucária e Fazenda Rio Grande. Sendo um dos importantes rios de Curitiba, suas águas banham os parques Tanguá, Tingui, Anibal Khury e Barigui.

A bacia do rio Barigui é composta de mais de quatrocentas micros bacias e é a maior bacia dentre as presentes no município de Curitiba, com cerca de 264,84 km² de área com forma alongada, representando 35% do total de área das bacias do município, como pode ser visto na Figura 4. O principal rio da bacia é o próprio rio Barigui, contudo não é o único presente nela, estima-se que cerca de 80% dos principais cursos de água de Curitiba estejam presentes nessa bacia. O rio Tanguá, o rio Uvu e o Rio Campo Comprido estão entre os principais afluentes presentes na margem direita do Rio Barigui. À margem esquerda estão presentes, dentre outros afluentes, o Rio Vila Formosa, o Córrego da Vila Izabel

e o Córrego Mercês-Barigui. Sendo o Vitória Régia banhado pelo rio Barigui por cerca de 10,4 km antes do seu desague no rio Iguaçu, o sistema fluvial caracterizado por um rio de ordem 6, ou seja, possui diversos rios e cursos de água nascendo em toda a sua extensão. Essa ordem, como comentado, implica em uma complexidade considerável, justificando assim o canal extravasor localizado na área.

FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO RIO BARIGUI NO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: BRISKI ET AL. (2009)

A bacia hidrográfica do rio Barigui, junto com suas outras 400 sub-bacias formam o sistema hidrográfico da bacia do Alto Iguaçu. Esse sistema tem como principal função o abastecimento da demanda de água domiciliar urbano e industrial, contudo a bacia do Barigui propriamente dita não atende a esse padrão. A bacia em questão não fornece água diretamente para os sistemas de tratamento e captação, suas principais funções hidrográficas urbanas consistem em atender as demandas de escoamento superficial, atividades industriais e atividades rurais.

Os parâmetros morfométricos, levantados por BRISKI et al. (2009), estão presentes na Tabela 1. É interessante observar que o índice de conformação – Indicado na Equação 1 – da bacia, de maneira geral, indica 0,124, o que

significaria que esta bacia é pouco propícia para inundações, em função do formato alongado destacado anteriormente na Figura 4.

TABELA 1 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO BARIGUI

Parâmetros	Resultados
Área da Bacia	264,840 km ²
Perímetro da Bacia	147.789,890 m
Comprimento Canal principal	65.053,580 m
Comprimento da Bacia	46.148,950 m
Índice de Conformação	0,124
Densidade de drenagem	2,410 km/km ²
Altitude máxima	1.210,000 m
Altitude mínima	864,000 m
Amplitude altimétrica	346,000 m

FONTE: ADAPTADO DE BRISKI; GÓES; JUNIOR; KURTA (2009)

As características da bacia como escoamento total e superficial estão diretamente atreladas ao clima da região na qual está inserida, bem como suas taxas de precipitação, evaporação e de sua dinâmica atmosférica. Portanto, é necessário ter uma noção da climatologia local para embasar as decisões necessárias para o dimensionamento de quaisquer intervenções quanto aos cursos de água, ainda que de tamanho relativamente reduzido como o canal objeto deste projeto.

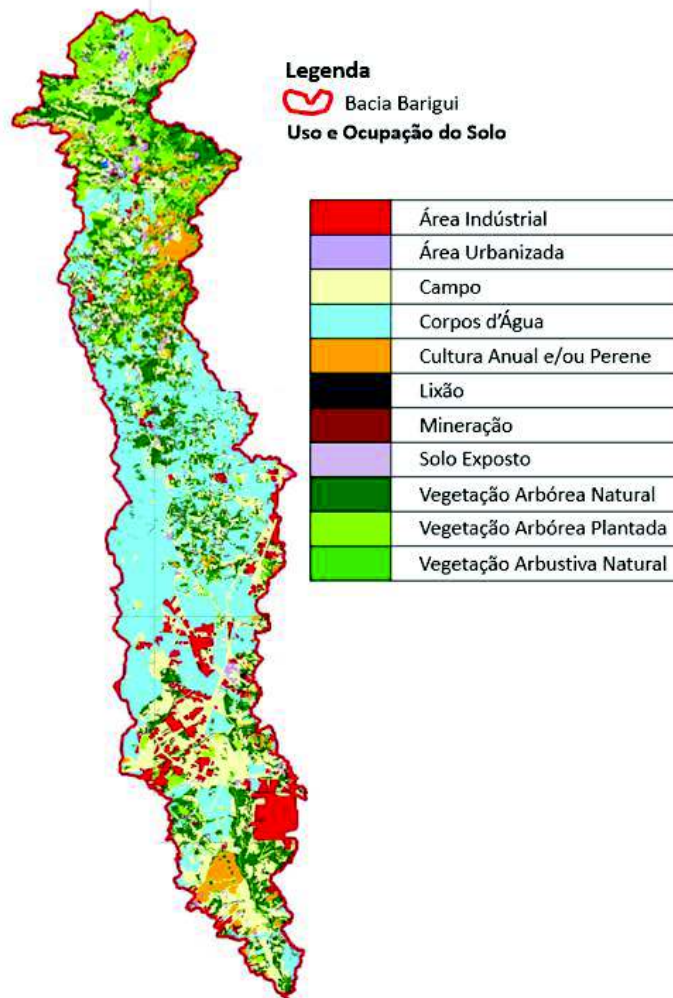
Segundo a classificação de Koppen, o clima predominante é o Cfb (Clima subtropical com verões frescos). Ou seja, esse clima representa a presença de umidade constante e elevada, invernos brandos e clima pluvial quente-temperado. Por tratar-se de um clima úmido, há a presença de chuvas

distribuídas pelo ano, com precipitações superiores a 30 mm. A umidade constante favorece o uso de soluções de Engenharia Natural no projeto de estabilização, uma vez que a vegetação tem sua taxa de sucesso intimamente ligada à quantidade de água disponível. As temperaturas médias nos períodos mais frios, entre os meses de maio a setembro, variam de -3°C a 18°C . Nos períodos mais quentes, de novembro a março, por sua vez, a temperatura média pode variar de 10°C até 22°C . Segundo o SIMEPAR (2007), tais padrões de temperatura podem indicar que devido ao período de dormência de algumas espécies vegetais com propagação vegetativa as obras utilizando-se de técnicas de engenharia natural com tais espécies tenham que ser realizadas no final desse período de dormência, o que coincide com as semanas finais do inverno e início da primavera.

O uso do solo, bem como sua organização espacial, é de importante conhecimento antes de algum empreendimento quanto aos canais de drenagem. As diversas alterações antrópicas realizadas pela sociedade que habita a bacia do rio Barigui geram importantes transformações quanto à dinâmica natural dos escoamentos, por exemplo.

Na bacia do rio Barigui, é notável a predominância de usos urbanos e usos industriais. Mas também notam-se as presenças de atividades agropecuária e cobertura vegetal natural, como mostra a Figura 5.

FIGURA 5 - MAPA DE USO DO SOLO NA BACIA DO RIO BARIGUI



FONTE: ADAPTADA DE SUDERHSA (2009)

Com relação ao solo e a distribuição dos diferentes tipos de solo na bacia, a SUDERHSA (2007) indica para os solos da bacia uma composição de cerca de 10,07% de terraços aluvionários, 45,92% de solos residuais transportados sob complexo gnáissico, 14,94% sobre metapelitos da Formação Capiru e 12,55% sobre parcelas carbonáticas, também da Formação Capiru, composto por seguimentos recentes não consolidados, quartenários sobre embasamento cristalino do Complexo Atuba e Formação Guabirotuba. Tais composições de solos transportados podem indicar sistemas fluviais suscetíveis às instabilizações por movimentos de massas e processos erosivos.

Em função das características climáticas a flora local caracteriza-se (principalmente em períodos anteriores à sua extensiva urbanização) por

cobertura vegetal extensa e volumosa, formada por florestas com características subtropicais propriamente ditas.

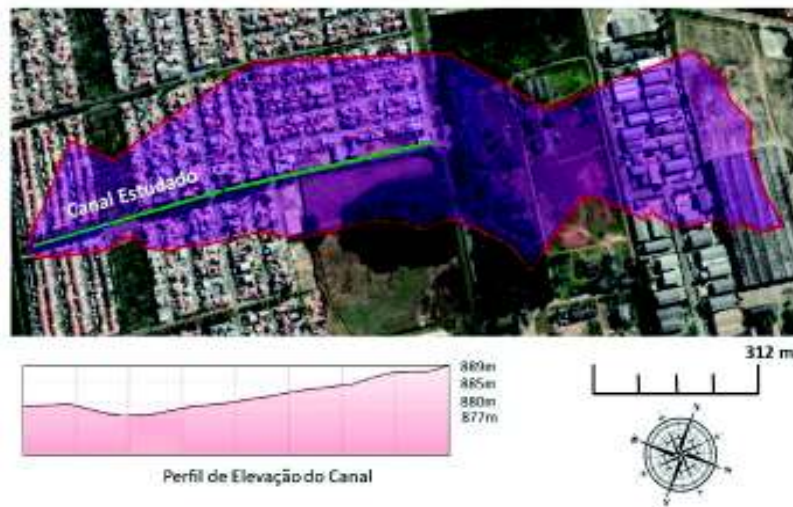
Seguindo os padrões subtropicais, Curitiba está localizada no Bioma Mata Atlântica, constituído de diversas formações florestais, sendo predominante na região em questão a Floresta Ombrófila Mista, também conhecida por Mata de Araucária que possui presença evidente da Araucária angustifolia (pinheiro do Paraná). Tais formações florestais caracterizam-se por grande diversidade vegetal, na qual, algumas espécies já foram identificadas como espécies com propriedades biotécnicas¹ (Souza, 2015).

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL

A área contribuinte para a drenagem do canal da rua Major Victor Feijó, no conjunto Vitória Régia é de 390064 m², tendo como exutório o canal extravasor ao lado do rio Barigui, conforme exemplificado na Figura 6. Esse valor representa uma pequena parcela da bacia do rio Barigui, aproximadamente 0,15%, e sendo menor que 2 km² justifica-se o uso do método racional para estimativa da vazão de projeto. Os resultados morfométricos obtidos pelo levantamento da bacia de estudos estão apresentados na Tabela 2.

¹ Propriedade biotécnica: Característica do material construtivo vivo que, por aspectos morfológicos e mecânicos, desempenham função técnica. Seus conjuntos de ações conferem efeitos positivos nas propriedades da mecânica dos solos (Souza, 2015).

FIGURA 6 - DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE DRENAGEM DO CANAL DE ESTUDO



FONTE: OS AUTORES (2021)

TABELA 2 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA SUB BACIA INFLUENTE NO CANAL DE ESTUDO

Parâmetros	Resultados	Símbolos
Área da Bacia	380.289,000 m ²	A_{bacia}
Perímetro da Bacia	3.500,000 m	P_{bacia}
Comprimento Canal principal	803,000 m	L
Comprimento do Talvegue	1.420,000 m	$L_{talvegue}$
Comprimento da Bacia	1385,000 m	L_{bacia}
Índice de Drenagem	0,004 m/m ²	I_d
Índice de Conformação	0,203 m ² /m ²	I_c
Altitude máxima	909,000 m	H_m
Altitude exutório	879,000 m	H_j
Amplitude altimétrica	29,000 m	ΔH
Inclinação média	2,700 %	$I_{méd}$

FONTE: OS AUTORES (2021)

O índice de conformação (*IC*), indicador do formato da bacia, é dado por (Wilken,1978):

$$IC = \frac{A_{bacia}}{L_{bacia}^2}, \quad (1)$$

em que A_{bacia} é área da bacia e L_{bacia} o comprimento axial da bacia.

O índice de conformação (*IC*), indicador do formato da bacia, é calculado conforme Wilken (1978), resultando em um valor de 0,198. Um valor de $IC = 1$ indicaria uma bacia perfeitamente quadrada, por outro lado quanto menor o valor de *IC* mais alongada é a bacia. Portanto, o índice obtido indica bacia alongada, conforme observa-se na Figura 6 da bacia. As bacias com formatos alongados são menos suscetíveis a cheias.

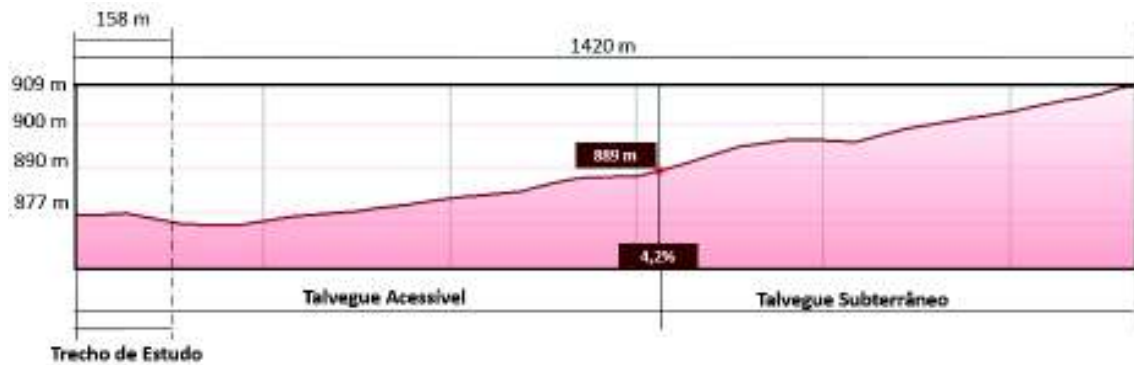
O comprimento do talvegue principal foi obtido com auxílio do mapa dos corpos hídricos de Curitiba fornecido pelo IPPUC (2011) e, para a porção encanada subterrânea e, portanto, inacessível, foi estimado seu percurso através das curvas de níveis da área, indicando os cursos principais de escoamento.

A altimetria da bacia foi extraída com auxílio do software Google Earth (Figura 7). Nela percebemos uma inclinação média de 2,7% sobre o talvegue principal, e uma altitude de 879 m no exutório, estando próximo da altitude de 864 m, a mínima da bacia do rio Barigui. O canal possui, portanto, uma inclinação suave, diminuindo os riscos de erosão de leito em função das velocidades de escoamento serem relativamente mais baixas que canais com leitos mais inclinados. Por outro lado, pode haver cheias para além da incisão do canal, principalmente no caso de canais obstruídos por falta de limpeza regular, uma vez que o tamanho dos materiais transportados é pequeno e os maiores são depositados ao longo do leito do rio.

Além disso, parte do curso da água é submerso à vila, ficando acessível, apenas, após a entrada no início do canal escavado. No presente trabalho o enfoque será em um trecho acessível do canal. Contudo, para os estudos gerais,

a parte submersa deve ser considerada. A seguir, na Figura 7, é mostrado o perfil de elevação de todo o canal estudado, bem como a inclinação à montante no momento de transição entre o talvegue acessível e inacessível.

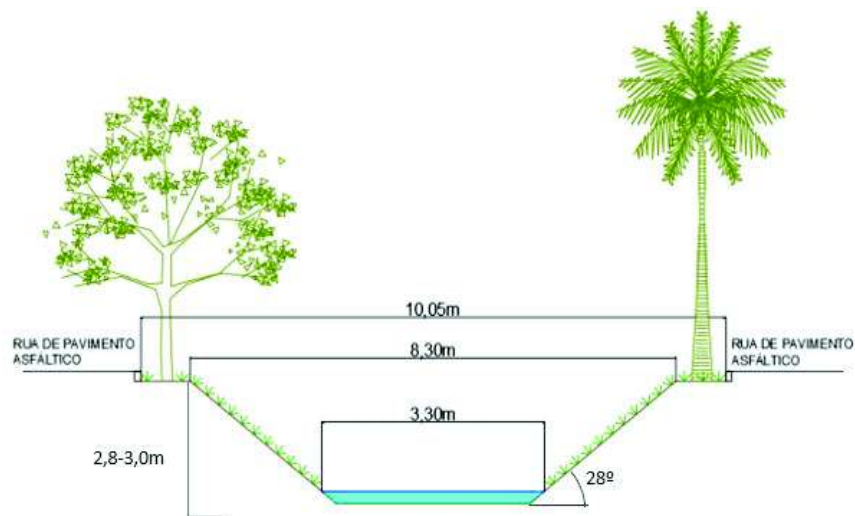
FIGURA 7 - PERFIL DE ELEVAÇÃO DO TALVEGUE PRINCIPAL



FONTE: (A) GOOGLE EARTH, (B) OS AUTORES (2021)

Quanto a geometria do canal, foi utilizado o trabalho realizado por STRESSER et. al (2019) para um canal vizinho localizado alguns metros do canal de estudo como aproximação no presente projeto básico, uma vez que atual pandemia do COVID 19 impede o acesso dos autores ao canal para efetuar medições de campo. O canal apresenta formato trapezoidal, com uma profundidade aproximada de 2,80 m até 3,00 m ao longo de sua extensão, bem como uma inclinação média do talude de 28° (53%) em ambos os lados, como mostrado na Figura 8. Tanto a profundidade do leito quanto a inclinação dos taludes fluviais encontram-se dentro dos limites técnicos da maior parte das obras de estabilização de Engenharia Natural (DURLO; SUTILI, 2012).

FIGURA 8 - CONFIGURAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CANAL



FONTE: ADAPTADA DE STRESSER ET AL. (2019)

Pela Figura 8 é possível aferir a característica trapezoidal do canal, com largura superior média de 8,30 m e largura inferior média de 3,30 m. Além disso, está representada as características da vegetação presente nas margens do canal. Trata-se em grande parte de vegetação rasteira composta por gramíneas e herbáceas, cobrindo quase que inteiramente a superfície dos taludes fluviais, embora haja alguns trechos sem cobertura, nas alas dos extremos do trecho em consideração. As gramíneas, desde que haja cobertura suficiente, auxiliam no controle dos processos erosivos, principalmente na erosão laminar. Entretanto, as raízes das gramíneas não são suficientes para atirantar ou aumentar a coesão em profundidade suficiente para evitar o movimento de massas nos taludes fluviais. Além disso, a predominância de uma única espécie sobre os taludes diminui as chances do sistema natural encontrar novas configurações de equilíbrio em função de eventos extremos ou pragas, pela ausência de uma flora que dê subsistência a um ecossistema. A existência também de vegetação de grande porte, incluindo algumas espécies exóticas dentro da seção do canal possuem efeitos negativos para a estabilidade do sistema fluvial: peso e efeito alavanca da copa sobre os taludes; vorticiamente do escoamento laminar sobre os taludes e obstrução da seção drenante.

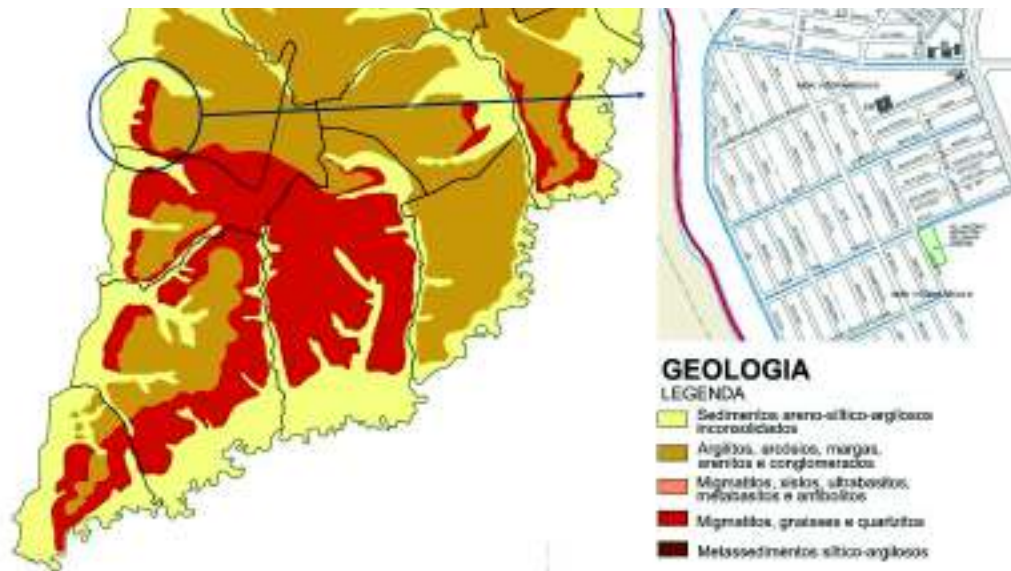
Ao decorrer do canal, é verificado a existência de interferências, sobretudo transversais, como tubulações, pontes e passagens do arruamento. Com a

passagem do arruamento, o canal segue com a tubulação de maneira subterrânea. As pontes, podem levar ao estrangulamento dos canais e prejudicam, ou até mesmo impedem, a continuidade de obras que fazem a naturalização do canal.

As tubulações, mesmo no caso apenas de drenagem pluvial, provocam processos de corrosão de margem e fundo, com posterior processo de retro erosão, que são deletérios às condições do canal. Além disso, pelo odor e cor nas observados em campo – realizadas em duas campanhas de campo, sendo uma em março de 2020 e outra em junho de 2020 – no local acredita-se que haja o lançamento de efluentes no canal, prejudicando suas características ecológicas, estéticas e de lazer. Ainda, no caso de intervenções de Engenharia Natural, as espécies vegetais utilizadas têm de ser tolerantes à contaminação por efluentes da água do canal.

A geologia da região da vila de Vitória Régia está inserida na área de migmatitos, gnaisses e quartiztos como se vê no mapa geológico da Figura 9.

FIGURA 9 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA REGIÃO SUL DE CURITIBA, EM DESTAQUE O BAIRRO DA CIC



FONTE: ADAPTADA DE IPPUC (1998)

Os quartzitos e gnaisses são rochas metamórficas, ou seja, são uma formação proveniente da transformação de outras rochas já existentes com o passar dos anos. As rochas metamórficas apresentam resistência maior se comparadas às rochas sedimentares, como os argilitos, contudo, se comparado às rochas ígneas, apresenta menor resistência e são mais deformáveis. O arranjo orientado dos grãos dessa formação, aliado às suas deformações, implicam no ataque facilitado dos agentes de intemperismos, necessitando uma atenção maior. Além disso, essas características proporcionam a alteração da rocha mãe.

Os sedimentos inconsolidados apresentam um baixo grau de compactação por não sofrerem o processo de cimentação durante a formação da bacia do rio Barigui, e, por consequência, a sub bacia de interesse à qual o canal pertence. Esses sedimentos inconsolidados são comumente encontrados às margens de rios, como é o caso em questão, e podem acarretar em recalques expressivos. Por ser constituído, em grande parte, de grãos mais finos, dificulta a permeabilidade da água e, portanto, a expulsão dela do solo, tornando os recalques duradouros através dos anos.

Os argilitos, por sua vez, são rochas sedimentares, de granulação finas e constituídas por minerais nas frações dos siltes e, principalmente, materiais argilosos. Elas apresentam facilidade em se esfoliar em lâminas finas e paralelas. Essa característica de fissilidade não confere a essas rochas alta capacidade portante.

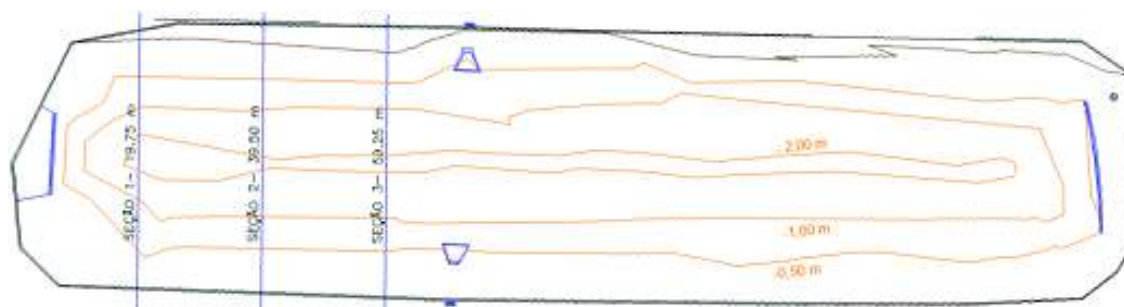
A região de estudo encontra-se às margens do rio Barigui e isso confere aspectos de um terraço fluvial. Além disso, parte do bairro da CIC está localizada sobre o solo Guabirota, que é um solo sedimentar bastante comum no município de Curitiba. A formação Guabirota é caracterizada, entre outros fatores, por depósitos aluvionares recentes, sendo predominantemente sedimentos pelíticos.

Estudos em campo mostraram que o solo presente nas margens dos canais de drenagem trata-se de fato de um terraço fluvial, sendo um solo silto-argiloso, possuindo uma cor escura, indicando presença de matéria orgânica. Essas características são endossadas pelos estudos prévios de Stresser et al.

(2019). A presença de argila e matéria orgânica é importante para o sucesso da vegetação implantada em obras de engenharia natural por questões de umidade e nutrientes. Contudo tais materiais, por suas baixas propriedades de engenharia (resistência e permeabilidade) podem favorecer processos de movimentos de massa. Além disso, mesmo no caso dos requisitos de vegetação um solo sem materiais granulares pode levar ao apodrecimento das raízes.

Para o estudo morfométrico das seções e do leito do canal utilizou-se as três seções finais (seção 1, 2 e 3) (Figura 10) do canal levantado e subdividido por Stresser et al. (2019), por mostrarem uma maior correlação com as condições geométricas do canal em estudo, visto sua proximidade e semelhança, como indicado na Figura 11. As dimensões das seções escolhidas são melhor apresentadas na Figura 12. Os dados apresentados por Stresser et al. (2019) não mostram o nível de água da ocasião do levantamento. A geometria das seções da Figura 12 revelam um padrão trapezoidal de calha com profundidades em torno de 3 m e taludes com inclinação máxima de 28°. As margens são curtas, pois são interrompidas pelas pistas de rolamento da rua, uma vez que o canal se insere no canteiro central da via.

FIGURA 10 - LOCALIZAÇÃO EM PLANTA DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS CONSIDERADAS



FONTE: ADAPTADA DE STRESSER ET AL. (2019)

prévios das características das sub bacia de interesse, desenvolvidos nos tópicos anteriores. Os estudos do ambiente de interesse são importantes para quaisquer obras de engenharia, ainda mais da engenharia natural, a qual o preceito de intervenções pauta-se na interação do projeto realizado com o meio ao qual o projeto está inserido.

O leito do curso de água, em sua totalidade, apresenta inclinação variável ao decorrer de sua extensão. Mais a montante, com revestimento em tubulação de concreto sob áreas urbanizadas de maneira subterrânea a declividade é de 3,7%. Já se considerarmos todo o talvegue principal, a declividade média é de 2,7%, portanto, a declividade usada será o desnível máximo. Segundo DNIT (2005) a fórmula de Kirpich (Equação 2) fornece valores aceitáveis de tempos de concentração para bacias pequenas e médias.

$$T_c = 0,95 * \left(\frac{L^3}{\Delta H}\right)^{0,385}; \quad (2)$$

em que:

T_c = Tempo de concentração da bacia (horas);

L = Comprimento do talvegue principal (km);

ΔH = Amplitude Altimétrica (m).

Para $L = 1,417$ km, $\Delta H = 29,00$ m, o uso da Equação 2 resultou em um $T_c = 0,3886$ h, ou 23,32 min, o que resulta que chuvas de duração moderada são suficientes para que toda a bacia contribua simultaneamente com vazão na seção de controle, localizada no final do trecho objeto deste estudo.

O tempo de recorrência (T_R) é determinado pela importância do empreendimento, bem como sua grandiosidade, valor e risco e é uma escolha do projetista.

O canal de drenagem sob análise foi construído com a urbanização da região, sendo, portanto, artificial. Segundo o Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo (SINICESP), o tempo de

recorrência para canais artificiais é de 10 a 25 anos. Para o presente projeto conceitual foi considerado o tempo de retorno de 25 anos.

Para a Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Suderhsa), a chuva de projeto é a definição da precipitação a qual irá gerar um hidrograma ou uma vazão de projeto para determinada bacia hidrográfica. Para a determinação dessa precipitação existem várias formas, as principais para a região de Curitiba são as curvas IDF desenvolvidas por Parigot de Souza (1959), Pfastetter (1959) e Prado Velho, desenvolvida por Frendrich e Freitas (1989).

Segundo a Suderhsa, as três curvas IDF apresentam resultados muito próximos para chuvas com duração de até 2 horas na região de Curitiba, podendo ser usadas de maneira indistinta. A duração utilizada nesta etapa será o próprio tempo de concentração, o qual foi obtido como sendo 23,32 min, portanto, cabendo quaisquer das curvas IDF apresentadas.

Por possuir dados mais atuais, e também por apresentar o maior valor de precipitação, foi escolhida a curva do Prado velho (Equação 3). Frendrich e Freitas ratificaram a equação de Parigot de Souza e, com dados disponíveis (1981 a 1988) obtiveram uma nova expressão. Para tanto utilizaram o posto do Prado Velho (Lat. 25° 27'S; Long. 49° 15'W; altitude: 884m).

$$i_{m\acute{a}x} = \frac{3221,07.T_R^{0,258}}{(t+26)^{1,01}}; \quad (3)$$

em que:

t = Duração da chuva, aqui utilizada como o tempo de concentração (min);

$i_{m\acute{a}x}$ = Intensidade máxima (mm/h).

O uso da Equação 3, utilizando o valor de $t = T_c$ resultou em um valor de 144,12 mm/h como precipitação máxima de projeto, valor que é caracterizado entre muito forte e muitíssimo forte pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), mostrado na Tabela 3. O alto valor de chuva, combinado com um tempo de concentração relativamente alto para uma bacia de dimensão da monta de 380.289 m², pode ser explicado pela sua baixa declividade, culminando em um tempo de concentração elevado, mesmo para uma precipitação