



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Elís Gomes de Souza

**Avaliação de um dispositivo de pré-tratamento de águas superficiais para abastecimento
na remoção de turbidez**

Florianópolis

2021

Elís Gomes de Souza

**Avaliação de um dispositivo de pré-tratamento de águas superficiais para abastecimento
na remoção de turbidez**

Dissertação/Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Ramon Lucas Dalsasso, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra

Souza, Elís Gomes de Souza

Avaliação de um dispositivo de pré-tratamento de águas superficiais para abastecimento na remoção de turbidez / Elís Gomes de Souza Souza ; orientador, Ramon Lucas Dalsasso, 2021.

119 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Água de abastecimento. 3. Pré-tratamento. 4. micropeneira. 5. Turbidez. I. Dalsasso, Ramon Lucas. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Elís Gomes de Souza

**Avaliação de um dispositivo de pré-tratamento de águas superficiais para
abastecimento na remoção de turbidez**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Maurício Luiz Sens, PhD.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcus Bruno Domingues Soares, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Maria

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Prof.(a) Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.(a)

Coordenador(a) do Programa

Prof.(a) Ramon Lucas Dalsasso, Dr.

Orientador(a)

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado à população brasileira, que ele possa contribuir de alguma forma com o conhecimento e desenvolvimento do país.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela educação que me deram e pelo carinho no acolhimento em sua casa em minhas idas à Florianópolis para assistir às aulas da pós-graduação. Ao meu irmão Artur, pelas dicas acadêmicas e minha irmã Eloá, pelo carinho.

Ao meu esposo, Bruno Francalacci, pelo companheirismo, compreensão e amor em todos os momentos desta e de tantas outras jornadas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso, por todo o suporte e orientação neste trabalho, pelo conhecimento compartilhado e, acima de tudo, pela paciência com o meu tempo no desenvolvimento deste projeto.

Ao colega Eng^o Benony Schmitz pelo suporte e incentivo para que eu continuasse a frequentar as disciplinas do mestrado e entrasse oficialmente no programa de pós-graduação, seu apoio foi crucial para que esta jornada se tornasse realidade. Que tenhamos mais líderes que valorizam e apoiam a qualificação profissional.

À amiga e colega de profissão Carolina Gemelli, por todas as dicas e informações durante este processo, desde o pré-projeto até a apresentação da defesa.

À Tubarão Saneamento S.A., nos nomes dos diretores Marcelo Matos, Paulo Canalles, Lucas Arrosti e Wagner Souza, que permitiu a instalação do experimento piloto nas dependências da concessionária, o uso da estrutura desta e do histórico dos dados de qualidade da água bruta. Às equipes de manutenção de rede e de operação da ETA, no nome do Eng^o Jorge Loffi, que sempre atenderam e ajudaram na instalação, ajustes do experimento, informações sobre a qualidade da água e suporte dentro do laboratório.

Ao Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC) da UFSC, nos nomes do Prof. Dr. Jarbas Bonetti e mestrandia Patrícia Tortora pela realização da análise granulométrica da água bruta e por toda a atenção dispendida.

Aos membros da banca, Prof. PhD. Maurício Sens, Prof. Dr. Bruno Pizzolatti e Prof. Dr. Marcus Soares que aceitaram doar seus tempos e compartilhar seus conhecimentos nesta banca de mestrado.

RESUMO

As águas superficiais, uma das principais fontes de captação de água para abastecimento, são suscetíveis à diversos fatores que podem influenciar na sua qualidade. A ocorrência de chuvas intensas em uma bacia, somada às suas características como: declividade do terreno, composição do solo, uso do solo, entre outras, estão associadas a variações nos parâmetros físico-químicos e biológicos da água, principalmente quanto a turbidez. Elevações de turbidez no manancial podem limitar os tipos de tratamento adequados à potabilização desta água, e excluem a possibilidade do uso de técnicas com simples operação e menor demanda por produto químico (ideal para pequenas comunidades e populações rurais). Tecnologias de pré-tratamento podem viabilizar o uso de técnicas simplificadas de tratamento de água, como a filtração lenta, e aumentar o acesso à água potável. Neste trabalho se realizou uma revisão bibliográfica de tecnologias de pré-tratamento de água bruta superficial estudadas e utilizadas para a remoção de turbidez, através de processo físico. Após a revisão, se desenvolveu uma tecnologia de pré-tratamento para a remoção de turbidez, através de peneiras, com simples instalação na captação de água superficial e com design compacto, no total se construiu três peneiras com diferentes mesh/aberturas: micropeneira 1 200/77 μm ; micropeneira 2 150/109 μm e micropeneira 3 80/170 μm . Apesar de o objetivo ser a instalação da tecnologia no manancial de captação, instalou-se o sistema piloto no terreno da ETA do município de Tubarão/SC (Brasil), concessionária Tubarão Saneamento S.A., e os testes foram realizados com a água bruta do rio Tubarão, no período entre março/2019 e fevereiro/2020. Para os testes se utilizou o delineamento fatorial 2^2 (turbidez da água bruta entre 29 e 133 uT; vazão entre 300 e 1000 L/h) com 3 repetições e ponto central com 3 repetições, a variável resposta foi a eficiência de remoção da turbidez nas peneiras com médias entre 6,47% e 10,68%. O tempo de colmatação médio variou de 220 a 2176 minutos, e o aumento da vazão teve maior associação com a diminuição do tempo de colmatação. A micropeneira 3 apresentou a menor eficiência de remoção de turbidez e o maior tempo de colmatação. Também se analisou a distribuição granulométrica e sólidos sedimentáveis presentes na água bruta do rio Tubarão que mostrou que o aumento da turbidez não está associado ao aumento da quantidade de sólidos sedimentáveis na água, no caso há evidências de que seja composta por partículas de solo de silte e argila. E que o aumento da turbidez esteja associado às chuvas intensas na região.

Palavras-chave: Água de abastecimento. Pré-tratamento. Micropeneira.

ABSTRACT

One of the main source of water supply, the surface water, is susceptible to several factors that can influence its quality. The occurrence of intense rain in a hydrographic basin, added to its characteristics such as: slope, soil composition, land use, among others, cause oscillations in the physical-chemical and biological parameters of this water, mainly in the turbidity parameter. The high turbidity in the raw water limits the types of water drinking treatment and exclude the possibility of using techniques with simple operation and less demand for chemical products (ideal for small communities and rural populations). Pre-treatment technologies can facilitate the use of simplified water treatment techniques, such as slow filtration, and increase access to drinking water for people. First of all, a bibliographical review of pretreating raw surface technologies to remove turbidity using a physical process was elaborated. After, a compact pretreatment technology was developed to remove turbidity of surface raw water, with easy installation on water intake. The choice was worked with fine screens and tried three different meshes: sieve 1, mesh 200 / 77 μ m; sieve 2, mesh 150 / 109 μ m and sieve 3, mesh 80 / 170 μ m. Although the goal was to install the technology in the on the water intake, the tests of the pilot system was installed next to the water treatment plant of city Tubarão / SC (Brazil), in the property of the Water and Waste Water Concessionary Tubarão Saneamento S.A.. For the tests of pilot was used the raw water from Tubarão river, using the same intake that supply the water treatment plant. The tests occurred since March/2019 to February/2020. The design of experiment used a factorial design 2x2 (raw water turbidity 29 uT and 133 uT; flow rate 300 and 1000 L/h) was used with 3 repetitions and central points with 3 repetitions, the response variable was the efficiency of removing turbidity in the sieves. the averages ranged from 6.47% and 10.68%. The average clogging time of the sieves ranged from 220 to 2176 minutes, and the increase of the flow was associated with the reduction of the clogging time of the fine screens. Sieve 3 was the least efficient to remove turbidity and the fine screen with the longest clogging time. The granulometric distribution and settleable solids present in the raw water of the Tubarão river were also analyzed, which showed that the increase of the turbidity was not associated with the increase of the settleable solids in the water, in this case there is evidence that it is composed of silt and clay soil particles. And the increase of the turbidity was associated with the intense rain on the region.

Keywords: Drinking water. Pretreatment. microscreen.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partículas presentes na água e seus tamanhos aproximados.....	21
Figura 2 – Tipos de fluxo na Peneira de banda (band screen).	26
Figura 3 – Esquema de funcionamento da peneira de tambor com fluxo de dentro para fora do tambor (drum screen)	27
Figura 4 – Peneira estática submersa com limpeza por ar.	28
Figura 5 – Peneira estática submersa em operação e em limpeza.....	28
Figura 6 – Grade fina do tipo estática para vazões entre 0-1.170 m ³ /h.....	28
Figura 7 – Ilustração da peneira multidisc.	29
Figura 8 – Ilustração funcionamento filtro AMIAD – modelo SAF 3000.....	31
Figura 9 – Filtro em manta: planta, corte e fotografias do experimento.	32
Figura 10 – Corte do sistema de captação subsuperficial.	33
Figura 11 – Vista em perspectiva do sistema de captação subsuperficial.....	33
Figura 12 - Vista do corte de filtro hidrociclone.	36
Figura 13 - Sub-bacias da Bacia do rio Tubarão e complexo lagunar.	38
Figura 14 – Mapa de suscetibilidade de erosão da bacia rio Tubarão e complexo Lagunar.....	40
Figura 15 – Mapa dos solos na Bacia do Rio Tubarão e Complexo Lagunar.....	41
Figura 16 – Principais pontos de monitoramento de águas superficiais na bacia do rio Tubarão e localização de bocas de minas de carvão abandonadas.....	43
Figura 17 – Boxplot do parâmetro pH nas águas superficiais da Bacia do Rio Tubarão.	44
Figura 18 - Boxplot do parâmetro Fe (ppm) nas águas superficiais da Bacia do Rio Tubarão.....	44
Figura 19 - Boxplot do parâmetro Mn (ppm) nas águas superficiais da Bacia do Rio Tubarão.....	44
Figura 20 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto pesquisa.....	46
Figura 21 – Mapa localização município de Tubarão/SC.	47
Figura 22 – Localização da captação de água e ETA dentro do município de Tubarão/SC.....	47
Figura 23 – Captação de água da Tubarão Saneamento S.A. no rio Tubarão.....	48
Figura 24 – Vista da ETA e localização do sistema piloto.	48
Figura 25 – Alternativas de formato da micropeneira.....	51

Figura 26 – Croqui do formato e funcionamento da micropeneira sanfonada.....	51
Figura 27 – Fluxograma do experimento em modo de funcionamento.	54
Figura 28 – Sistema piloto, desenho esquemático em 3D.....	55
Figura 29 – Delineamento fatorial, distribuição gráfica do plano de amostragem de vazão água bruta vs turbidez.....	60
Figura 30 – Estrutura da micropeneira sanfonada de pré-tratamento. A: Vista inferior e externa da micropeneira, sem fechamento da estrutura. B: Vista superior e interna da micropeneira, sem fechamento da estrutura. C: Vista inferior e externa da micropeneira, com fechamento da estrutura. D: Vista superior e externa da peneira, com fechamento da estrutura.	65
Figura 31 – Sistema piloto instalado.	65
Figura 32 – A: Caixa estanque de peneiras. B: Vista lateral do Sistema Piloto. C: Vista interna do compartimento fechado.	66
Figura 33 – Turbidez e cor verdadeira da água do rio Tubarão captada pela Tubarão Saneamento S.A. (período entre 04/2018 a 02/2019).....	68
Figura 34 – Gráfico da turbidez, ferro e manganês dissolvidos no rio Tubarão.	69
Figura 35 – Análise granulométrica da água bruta do rio Tubarão com turbidez de 34 uT.....	70
Figura 36 – Análises de sólidos sedimentáveis da água bruta do rio Tubarão.....	71
Figura 37 – Mapa de localização das estações pluviométricas escolhidas.....	73
Figura 38 – Turbidez da água captada no rio Tubarão (14 a 17/10/2019).	74
Figura 39 – Precipitação total nas estações pluviométricas na região da Bacia do Rio Tubarão (14 a 16/10/2019).	74
Figura 40 - Turbidez da água captada no rio Tubarão (12 a 16/10/2019).....	76
Figura 41 - Precipitação total nas estações pluviométricas na região da Bacia do Rio Tubarão (12 a 16/11/2020).	76
Figura 42 – Diagrama de caixa por micropeneira e tempo de colmatação.	80
Figura 43 – Teste de Tukey – diferença de médias para tempo de colmatação das peneiras (min).	81
Figura 44 – Gráfico de resíduo de eficiência – micropeneira 1.	86
Figura 45 – Gráfico de efeitos principais para eficiência – Médias ajustadas, da micropeneira 1 (mash 200).	87
Figura 46 – Gráfico de interação para eficiência – médias ajustadas, da micropeneira 1 (mash 200).	87

Figura 47 – Gráfico de Cubo (médias ajustadas) de eficiência - micropeneira 1 (mash 200).....	88
Figura 48 – Gráfico de resíduo de eficiência – micropeneira 2.	89
Figura 49 – Gráfico de efeitos principais para eficiência – Médias ajustadas, micropeneira 2 (mash 150).....	90
Figura 50 – Gráfico de interação para eficiência – médias ajustadas, da micropeneira 2 (mash 150).....	91
Figura 51 – Gráfico de Cubo (médias ajustadas) para eficiência da micropeneira 2 (mash 150).....	91
Figura 52 – Gráfico de resíduo de eficiência – micropeneira 3.	93
Figura 53 – Gráfico de efeitos principais da eficiência – Médias ajustadas, micropeneira 3 (mash 80).	94
Figura 54 – Gráfico de interação para eficiência – médias ajustadas, da micropeneira 3 (mash 80).	94
Figura 55 – Gráfico de Cubo (médias ajustadas) para eficiência da micropeneira 3 (mash 80).	95
Figura 56 – Teste de comparação Tukey entre médias de remoção de turbidez das peneiras.	96
Figura 57 – Gráficos de resíduos da eficiência de remoção de turbidez considerando amostras das 3 peneiras.	97
Figura 58 – Exemplo de arranjo com mais de uma micropeneira na mesma tubulação de captação de água.	100
Figura 59 – Ilustração de instalação do dispositivo no manancial de captação para atendimento de uma residência rural.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Denominação das frações granulométricas do solo conforme diâmetro da partícula pela Embrapa.	20
Tabela 2 - Denominação das subdivisões da fração areia conforme diâmetro da partícula pela Embrapa.	20
Tabela 3 – Classificação dos solos conforme diâmetro da partícula pela ABNT NBR 6.502/1995.	20
Tabela 4 – Classificação de tamanho de partículas pela ISO 14.688-1/2017.	20
Tabela 5 – Limites de parâmetros da água bruta para o uso de tecnologias de tratamento.	23
Tabela 6 - Matriz para a escolha do material mais adequado para o dispositivo.	49
Tabela 7 – Parâmetros, métodos e equipamentos.	58
Tabela 8 - Níveis das variáveis independentes do delineamento fatorial de cada peneira.	59
Tabela 9 – Delineamento experimental fatorial.	60
Tabela 10 – Resumo de características das técnicas e tecnologias de pré-tratamento.	63
Tabela 11 – Dimensionamento comprimento das micropeneiras, para vazão de 20 L.min ⁻¹ e taxa de abertura maior que 3 cm ² .L ⁻¹ .min quando a peneira estiver 50% obstruída.	64
Tabela 12 – Perda de carga calculadas nas micropeneiras para vazão de 20 L.min ⁻¹	64
Tabela 13 – Análise de água bruta do rio Tubarão (04/2018 a 02/2019).	67
Tabela 14 – Análise de água bruta do rio Tubarão (04/2019 a 03/2020).	68
Tabela 15 – Testes iniciais.	78
Tabela 16 – ANOVA pré-teste da eficiência de remoção de turbidez por micropeneiras.	79
Tabela 17 – Tempo de colmatção das micropeneiras.	80
Tabela 18 – Resumo estatístico do tempo de colmatção de cada micropeneira em minutos.	81
Tabela 19 – Análise de variância do tempo de colmatção das peneiras.	81
Tabela 20 – Regressão linear da micropeneira 1 quanto ao tempo de colmatção em minutos considerando as variáveis turbidez da água bruta em uT e vazão em L.h ⁻¹	82
Tabela 21 – Dados da regressão linear da micropeneira 1 quanto ao tempo de colmatção.	82

Tabela 22 – Análise de variância do tempo de colmatação versus vazão e turbidez da água bruta - micropeneira 1 (mash 200).....	82
Tabela 23 – Regressão linear da micropeneira 2 quanto ao tempo de colmatação em minutos considerando as variáveis turbidez da água bruta em uT e vazão em L.h ⁻¹	83
Tabela 24 – Dados da regressão linear da micropeneira 2 quanto ao tempo de colmatação.....	83
Tabela 25 – Dados da regressão linear da micropeneira 2 quanto ao tempo de colmatação.....	83
Tabela 26 – Regressão linear da micropeneira 3 quanto ao tempo de colmatação em minutos considerando as variáveis turbidez da água bruta em uT e vazão em L.h ⁻¹	84
Tabela 27 – Dados da regressão linear da micropeneira 3 quanto ao tempo de colmatação.....	84
Tabela 28 – Análise de variância do tempo de colmatação versus vazão e turbidez da água bruta - micropeneira 3 (mash 80).....	84
Tabela 29 – Delineamento amostral fatorial ajustado, micropeneira 1 (mash 200).....	84
Tabela 30 – Delineamento amostral fatorial ajustado, micropeneira 2 (mash 150).....	85
Tabela 31 – Delineamento amostral fatorial ajustado, micropeneira 3 (mash 80).....	85
Tabela 32 – Resultados do plano amostral da micropeneira 1(mash 200).....	85
Tabela 33 – Análise de variância com dois fatores da eficiência da micropeneira 1 (mash 200).....	86
Tabela 34 – Resultados do plano amostral da micropeneira 2 (mash 150).....	88
Tabela 35 – Análise de variância com dois fatores da eficiência da micropeneira 2 (mash 150).....	89
Tabela 36 – Resultados do plano amostral da micropeneira 3 (mash 80).....	92
Tabela 37 – Análise de variância com dois fatores da eficiência da micropeneira 3 (mash 80).....	92
Tabela 38 – Resumo estatístico das 3 peneiras quanto à eficiência de remoção.....	96
Tabela 39 – Análise de variância quanto à eficiência de remoção de turbidez para as 45 amostras das 3 peneiras.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP:	Ação Civil Pública
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANOVA:	Análise de variância
APHA:	American Public Health Association
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAM	Drenagem ácida de mina
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP	estimativa pontual
ETA	Estação de tratamento de água
FIME	Filtração em múltiplos estágios
FM	Filtração em margem
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Intervalo de confiança
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISSO	International Organization for Standardization
GL	Grau de liberdade
LOC	Laboratório de Oceanografia Costeira
MPF	Ministério Público Federal
NBR	Norma Técnica Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
QM	quadrado médio
RH	Região hidrográfica
SB	Sub-bacia
SC	Santa Catarina
SIECESC	Sindicato da Indústria de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina

SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SQ	soma dos quadrados
TAC	Termo de ajustamento de conduta

LISTA DE SÍMBOLOS

®	Marca registrada
° C	grau Celsius
”	polegada
Δ	amplitude
μg	micrograma
μm	micrômetro
Ag	Prata
As	Arsênio
cv	cavalo-vapor
cm	centímetro
cm ²	centímetro quadrado
Co	Cobalto
Cu	Cobre
Fe	ferro
g	grama
h	hora
há	hectáre
hp	horse-power
km ²	quilômetro quadrado
kW	quilowatt
L	litro
m	metro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
mca	metro de coluna de água
mL	mililitro
mg	miligrama
min	minuto
mm	milímetro
Mn	manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel

Pb	Chumbo
pH	potencial hidrogeniônico
s	segundo
s ²	segundo ao quadrado
Se	selênio
uT	unidade de turbidez
uH	unidade Hazen

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Objetivos.....	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	Revisão bibliográfica	19
2.1	Turbidez em Mananciais superficiais	19
2.1.1	Fatores naturais	19
2.1.2	Fatores antrópicos	22
2.2	Relação entre a qualidade da água bruta e a tecnologia de tratamento de água	22
2.3	Técnicas de pré-tratamento de água superficial para remoção de turbidez e instalação na captação	23
2.3.1	Gradeamento – grades finas e microgrades	23
2.3.1.1	<i>Peneira de banda contínua (Band screens).....</i>	25
2.3.1.2	<i>Peneira de tambor (drum screen – Brackett green®)</i>	26
2.3.1.3	<i>Peneira estática submersa (Passive Intake Screens).....</i>	27
2.3.1.4	<i>Peneira de discos (multidisc screen)</i>	29
2.3.1.5	<i>Microgrades, micropeneiras ou telas</i>	29
2.3.2	Filtração.....	31
2.3.2.1	<i>Filtração em manta.....</i>	31
2.3.2.2	<i>Filtração na calha do rio – sistema de captação subsuperficial</i>	32
2.3.3	Sedimentação.....	33
2.3.3.1	<i>Tanque de sedimentação.....</i>	33
2.3.3.2	<i>Hidrociclone</i>	35
2.4	Bacia do rio Tubarão e complexo Lagunar.....	36
2.4.1	Solo	38
2.4.2	Atividades Econômicas com impacto na qualidade das águas	41

2.4.3	Monitoramento da qualidade da água na Bacia do Rio Tubarão	43
3	Materiais e métodos	46
3.1	Fluxograma do projeto Pesquisa.....	46
3.2	Experimento piloto	47
3.2.1	Localização do experimento.....	47
3.2.2	Definição das premissas do projeto.....	49
3.2.3	Definição das características do dispositivo	49
3.2.3.1	<i>Material</i>	49
3.2.3.2	<i>Abertura de passagem dos sólidos</i>	50
3.2.4	Elaboração do dispositivo de pré-tratamento e do experimento piloto.....	50
3.2.4.1	<i>Formato da face de peneiramento.....</i>	50
3.2.4.2	<i>Dimensionamento da micropeneira sanfonada de pré-tratamento e do experimento piloto</i>	52
3.2.5	Caracterização da água bruta do rio Tubarão	56
3.2.5.1	<i>Análise do histórico</i>	56
3.2.5.2	<i>Análise granulométrica</i>	56
3.2.5.3	<i>Análise de sólidos sedimentáveis.....</i>	57
3.2.5.4	<i>Análise da precipitação a montante da captação e impacto na turbidez.....</i>	57
3.2.6	Testes iniciais.....	58
3.2.6.1	<i>Eficiência de remoção</i>	58
3.2.6.2	<i>Tempo de colmatação e perda de carga.....</i>	58
3.2.7	Delineamento experimental	59
3.2.8	Análise dos resultados	60
4	Resultados.....	62
4.1	Tecnologias de pré-tratamentos de água superficial para remoção de turbidez	62
4.2	Micropeneira sanfonada e experimento piloto	64
4.3	Análise da água bruta do rio tubarão	66

4.3.1	Análise do histórico	66
4.3.2	Análise granulométrica	70
4.3.3	Análise de sólidos sedimentáveis	70
4.3.4	Análise da precipitação na bacia vs turbidez na água do rio Tubarão	72
4.4	Resultados dos testes iniciais.....	77
4.4.1	Eficiência de remoção de turbidez	77
4.5	Resultados do Tempo de colmatação	79
4.5.1	Micropeneira 1 – mash 200.....	82
4.5.2	Micropeneira 2 – mash 150.....	83
4.5.3	Micropeneira 3 – mash 80.....	83
4.6	Resultados da Eficiência de remoção de turbidez	84
4.6.1	Micropeneira 1 – mash 200.....	85
4.6.2	Micropeneira 2 – mash 150.....	88
4.6.3	Micropeneira 3 – mash 80.....	92
4.6.4	Análise das três peneiras	95
5	Considerações finais	98
5.1.1.1	<i>Sugestão de instalação da micropeneira sanfonada em manancial superficial ...</i>	99
6	Conclusões	102
	REFERÊNCIAS.....	103
	APÊNDICE A – Planilha com todos os resultados das amostras realizadas com as três peneiras.....	110
	APÊNDICE B – Resultado completo da análise granulométrica por difração a laser.....	112
	ANEXO A – Licença do software de estatística Minitab.....	113

1 INTRODUÇÃO

633 milhões de pessoas no mundo não têm acesso à uma fonte de água potável, 4% de toda a população urbana e 16% de toda a população rural, segundo dados da OMS (2015). E, aproximadamente, 16,3 % dos brasileiros não são atendidos com abastecimento de água (SNIS, 2019), estima-se 34.253.981 habitantes. Em 2010, 35,4% dos domicílios da área rural brasileira não tinham acesso adequado à água (FUNASA com dados do Censo Demográfico – IBGE 2010), considera-se acesso adequado quando o domicílio tem rede interna de água vinda de rede geral, poço ou nascente e água de chuva armazenada em cisterna. Nesta estatística não é avaliada a qualidade desta água de consumo, apenas se há ou não o acesso e a forma deste.

Em 2015, membros da ONU assinaram o documento: “Transformando o Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” que reúne 17 objetivos, tem como sexto objetivo “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos” e define a meta de “até 2030, alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos”.

A Lei Federal Brasileira nº 11.445/2007 estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico no país, e em 2020 teve trechos alterados pela Lei Federal Brasileira nº 14.026/2020, que atualizou o marco legal do saneamento básico brasileiro. Os padrões de potabilidade da água estão definidos na Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde Nº 05/2017; a portaria também estabelece que a água bruta superficial deverá ser submetida ao processo de filtração e que toda a água distribuída deve conter concentração de cloro residual. Entende-se, assim, que qualquer concepção de tratamento de água, cujo manancial seja superficial, deverá conter, no mínimo, filtração e dosagem de cloro.

Para a concepção de um projeto de estação de tratamento de água, principalmente quando se trata de pequenas comunidades – em que o serviço pode se tornar oneroso ao usuário e onde há dificuldade de mão-de-obra especializada - é importante priorizar instalações simples, com os equipamentos e operação que forem estritamente necessários e, quando couber, evitar a coagulação química e reduzir ou até eliminar o tratamento (RITCHER & NETTO, 1991).

Como alternativa ao tratamento de água nas áreas rurais, enquadram-se as operações de filtros lentos, quando se dispõe de um manancial passível à esta técnica, os quais são considerados excelentes alternativas para o fornecimento de água potável, pois não exigem mão-de-obra técnica avançada (PIZZOLATTI, 2010).

Entretanto, apontou-se que a qualidade da água bruta é a principal limitação para o uso da filtração lenta, que não deve ter cor e turbidez elevadas a ponto de sobrecarregar o filtro com partículas que irão reduzir sua carreira de filtração (HUISMAN; WOOD, 1974; VISSCHER et al., 1987; HESPANHOL, 1987; GRAHAM; MBWETTE, 1987; DI BERNARDO; DANTAS, 2005b). O uso desta tecnologia é adequado quando a turbidez da água bruta for sempre menor que 10 uT (DI BERNARDO, 1993).

A filtração direta é uma opção de tratamento que dispensa a necessidade das unidades de floculação e decantação e, conseqüentemente, diminui a demanda de investimento, mas, esta tecnologia é adequada para água bruta com baixos níveis de turbidez, cor e fitoplânctons (LIMA & CAPELO-NETO, 2015). Para o uso de filtração direta ascendente ou descendente a turbidez da água bruta deve estar em 100% do tempo ≤ 100 uT (DI BERNARDO, 2003). Com a piora da qualidade da água o tratamento passa a apresentar problemas: diminuição da qualidade da água tratada e da carreira de filtração e, conseqüente, aumento dos volumes de água dispendidas na lavagem dos filtros (LIMA & CAPELO-NETO, 2015).

Outra opção de tratamento com operação simplificada é a filtração dupla, mas a água bruta para a operação adequada deve ter turbidez sempre menor que 200 uT (DI BERNARDO, 2003).

A água superficial, especificamente a de rio, é um manancial acessível para parte da população. Entretanto, está exposta à perigos permanentes e à uma poluição repentina por esgoto ou distúrbios devidos à chuva intensa, transporte ou lançamento de substâncias perigosas, refletindo sua função de corpo receptor da bacia hidrográfica (SCHMIDT, 2003). As características e substâncias químicas dissolvidas na água natural de rios e lagos estão diretamente relacionadas com a geoquímica do solo e das rochas da bacia hidrográfica em que está inserida (VON SPERLING, 2007).

Com a deterioração da qualidade da água dos rios brasileiros, a partir da década de 60, se observou uma tendência ao uso do tratamento do tipo convencional (DI BERNARDO; BRANDÃO & ELLER, 1999).

Neste contexto, as tecnologias de pré-tratamentos, para redução de turbidez, aparecem como alternativas para viabilizar processos de tratamento simples, acessíveis e que demandem o mínimo de produto químico.

O pré-tratamento pode ser realizado dentro do manancial ou fora dele, algumas tecnologias demandam intervenções na calha ou na margem do curso hídrico como o caso de algumas grades finas e peneiras disponíveis no mercado que precisam de uma infraestrutura para apoiá-las e conduzir a água até elas. A filtração na calha do rio também demanda

intervenção, neste caso com um preenchimento em parte do leito com materiais específicos para realizar a filtração, a sua manutenção é facilitada pela autolimpeza da superfície filtrante pelo próprio fluxo do rio. Já a filtração em margem, apesar de não ter intervenção direta no manancial e apresentar resultados bastante motivadores, é limitada aos locais com condições hidrogeológicas favoráveis para o tratamento. As barragens, muito utilizadas para represar águas de rio e criar um reservatório na captação, podem ser usadas como pré-tratamento por sedimentação, entretanto também se constituem da construção de um anteparo transversal ao fluxo do rio e o alagamento de área. A depender da complexidade da obra no leito de um rio, há a demanda de mão de obra, uso de maquinário, além de aporte de recursos financeiros e naturais significativos. Estes requisitos dificultam a adoção destas técnicas em pequenas captações de água e sistemas isolados individuais, como em propriedades rurais.

Neste contexto se concluiu que há poucas alternativas para o pré-tratamento de água superficial voltadas para os pequenos usuários. Verificada esta lacuna, o presente trabalho se propôs a desenvolver e testar um dispositivo de pré-tratamento que possa ser instalado dentro do manancial superficial e que seja uma alternativa de pré-tratamento para captação de água com o objetivo de remover turbidez.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver e testar o desempenho de um dispositivo de micropeneiramento para a remoção de turbidez, como pré-tratamento de água bruta superficial para o consumo humano.

1.1.2 Objetivos específicos

De forma específica, o trabalho teve os seguintes objetivos:

- Pesquisar as tecnologias de pré-tratamento para a remoção de turbidez de água bruta por processo físico que foram objeto de estudo na comunidade científica e/ou que estejam disponíveis no mercado;
- Dimensionar e projetar um tipo de tecnologia de pré-tratamento, que utilize o processo de micropeneiramento, que possa ser instalado em manancial superficial e que seja de fácil transporte e implantação;
- Avaliar o desempenho da tecnologia, considerando a abertura de passagem de sólidos; vazão de funcionamento; remoção de turbidez; perda de carga e tempo de colmatação total da micropeneira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TURBIDEZ EM MANANCIAS SUPERFICIAIS

2.1.1 Fatores naturais

A relação entre a concentração de sólidos suspensos e a descarga líquida em um curso hídrico é influenciada pelos seguintes fatores: 1) a intensidade da precipitação; 2) a variação temporal e da forma do hidrograma - diante dos diferentes tipos de uso da terra que podem facilitar ou dificultar a ocorrência dos processos erosivos; 3) a declividade da bacia hidrográfica; entre outros (REID et al., 1997).

Nos países tropicais, como exemplo o Brasil e a Colômbia, em que existe uma época de chuva e de estiagem relativamente definidas, as águas superficiais, em épocas de chuva, acabam apresentando variação na qualidade, principalmente com o aumento das concentrações dos parâmetros turbidez, sólidos suspensos e microorganismos (DI BERNARDO; BRANDÃO & ELLER, 1999).

A turbidez em águas superficiais tende a ser maior em bacias hidrográficas com solos erodíveis, pois o escoamento superficial da chuva no terreno proporciona o carreamento de partículas do solo, como argila, silte, fragmentos de rocha e óxidos metálicos para os corpos d'água (LIBÂNIO, 2010). Vários tipos de partículas são encontrados na água, como bactérias, vírus, colóides coagulados quimicamente, precipitados químicos, flocos biológicos, sólidos orgânicos, etc (HENDRICKS, 2010). A composição geoquímica do solo e das rochas da bacia hidrográfica influenciam diretamente as características e substâncias químicas dissolvidas na água natural de rios e lagos (VON SPERLING, 2007).

A água superficial, particularmente a de rio, é um manancial acessível para parte da população. Entretanto, a mesma característica que o torna acessível também o expõe a perigos permanentes e a uma poluição repentina por esgoto ou devido à chuva intensa, transporte ou lançamento de substâncias perigosas, refletindo sua função de corpo receptor da bacia hidrográfica (SCHMIDT, 2003).

Na Tabela 1, partículas de solo foram denominadas conforme seu diâmetro, sendo este “o tamanho nominal de abertura correspondente à dimensão da peneira imediatamente superior pela qual a partícula passou, sendo retida na peneira imediatamente abaixo” (EMBRAPA, 2012). Sendo a argila a menor partícula, seguida do silte, areia e cascalho, calhau e matacão. Na tabela 2 a subdivisão para os tamanhos de partículas de areia.

Nas Tabela 3 e Tabela 4 também são apresentadas classificações para faixas de tamanho de partículas, conforme ABNT e ISO. As classificações da ABNT e ISO são muito

semelhantes quanto ao tipo de partícula: argila, silte, areia e pedregulho, a grande diferença é que a ISO traz uma subdivisão de tamanho em: grosso, médio e fino.

Tabela 1 – Denominação das frações granulométricas do solo conforme diâmetro da partícula pela Embrapa.

Diâmetro (mm)	Denominação
>200	Matacão
200 - 20	Calhau
20 - 2,0	Cascalho
2,0 - 0,21	Areia grossa
0,21 - 0,05	Areia fina
0,05 - 0,002	Silte
<0,002	Argila

Fonte: Embrapa, 2012.

Tabela 2 - Denominação das subdivisões da fração areia conforme diâmetro da partícula pela Embrapa.

Diâmetro (mm)	Denominação
2,00 - 1,00	Areia muito grossa
1,00 - 0,50	Areia grossa
0,50 - 0,21	Areia média
0,21 - 0,10	Areia fina
0,10 - 0,05	Areia muito fina

Fonte: Embrapa, 2012.

Tabela 3 – Classificação dos solos conforme diâmetro da partícula pela ABNT NBR 6.502/1995.

Diâmetro (mm)	Denominação
2,00 – 60,0	Pedregulho
0,06 – 2,00	Areia
0,002 - 0,06	Silte
<0,002	Argila

Fonte: ABNT, 1995.

Tabela 4 – Classificação de tamanho de partículas pela ISO 14.688-1/2017.

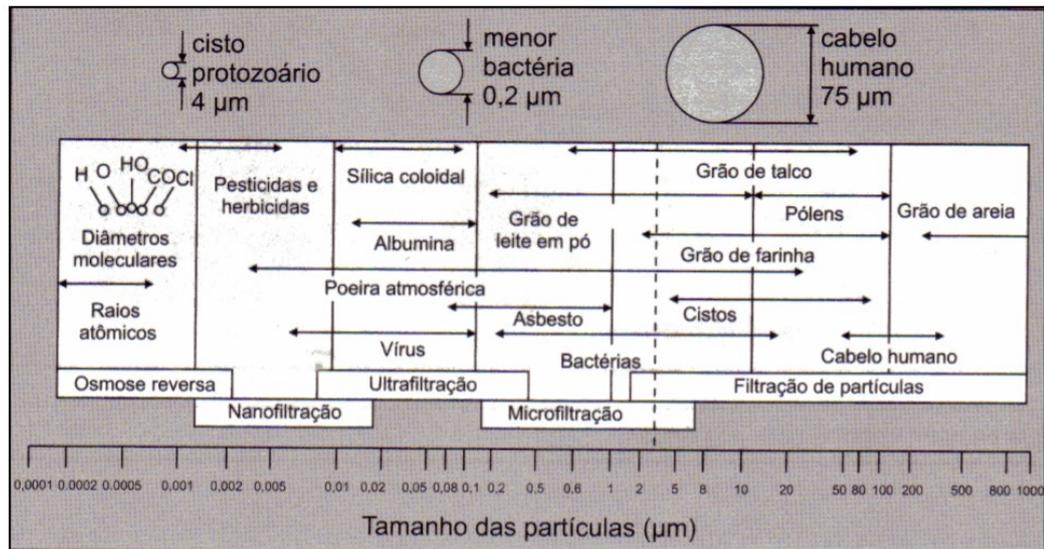
Faixa de tamanho da partícula (mm)	Denominação
>20 até ≤ 63	Cascalho grosso
>6,3 até ≤ 20	Cascalho médio
>2 até ≤ 6,3	Cascalho fino
>0,63 até ≤ 2,0	Areia grossa
>0,20 até ≤ 0,63	Areia média
>0,063 até ≤ 0,20	Areia fina
>0,02 até ≤ 0,063	Silte grosso
>0,0063 até ≤ 0,02	Silte médio
>0,002 até ≤ 0,0063	Silte fino
≤0,002	Argila

Fonte: International Standard, 2017.

A partir deste ponto do texto a classificação de tamanho de partículas seguirá as faixas conforme ISO 14.688-1/2017.

A Figura 1 apresenta alguns tipos de partículas presentes na água e seus respectivos tamanhos. Segundo Di Bernardo (1993) as partículas de menor tamanho são mais difíceis de serem removidas nas ETAs, por apresentarem menor velocidade de sedimentação.

Figura 1 – Partículas presentes na água e seus tamanhos aproximados.



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

A turbidez da água é um parâmetro que indica a saúde do corpo hídrico (Davies-Colley and Smith 2001). É um parâmetro prático de ser medido e pode evidenciar a presença de contaminantes químicos e microbianos, que têm implicações significativas para a qualidade da água (OMS, 2017). Segundo a Organização Mundial da Saúde (2005) a turbidez da água quando abaixo de 5 uT é geralmente aceitável para os consumidores e 25 uT é o máximo permitido. No Brasil, o máximo permitido de turbidez pela Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde nº 05 para água tratada em estação de tratamento para o abastecimento público pós filtração ou pré-desinfecção é de 1 uT em 95% das amostras (quando o tratamento for por filtro lento ou apenas desinfecção, quando o manancial for subterrâneo) e 0,5 uT em 95 % (quando o tratamento for por filtro rápido – tratamento completo ou filtração direta).

A turbidez descreve opacidade ou a nebulosidade da água, ela não é uma medida direta de partículas suspensas, mas uma medida geral do efeito de dispersão e absorção que as partículas suspensas têm sobre a intensidade de dispersão de luz da água (Health Canada, 2012). A forma como as partículas interferem na passagem de luz depende de uma série de fatores, incluindo o tamanho, forma, número, composição, cor e índice refrativo das partículas, o comprimento de onda (cor) da luz que reflete sobre elas e o índice refrativo da água, como muitos fatores afetam esta intensidade da dispersão da luz, não é possível relacionar medidas de turbidez diretamente ao número, tamanho ou tipo de partículas que estão na água. (Health

Canada, 2012). Apesar da complexidade da interação, pode-se generalizar que a intensidade da dispersão da luz aumenta à medida que a turbidez aumenta (APHA et al., 2012).

A turbidez na água pode ser o resultado da presença de diversos tipos de partículas como as de natureza inorgânicas: argila, silte, areia, precipitados de óxidos de metais (ferro e manganês) e hidróxidos, e as de natureza orgânica: materiais orgânicos das mais diversas fontes, organismos biológicos tais como as algas, cianobactérias, zooplâncton e filamentosos, até comunidades bacterianas macroscópicas como os biofilmes (Health Canada, 2012).

2.1.2 Fatores antrópicos

Muitas das partículas que chegam até os cursos hídricos são o resultado de um processo de erosão do solo que ocorre por fatores naturais e antrópicos dentro da bacia hidrográfica. Dentre os antrópicos o uso do solo, como exemplo o agrícola, acaba propiciando a erosão laminar por deixar o solo exposto nos períodos que antecedem o plantio (PRADO & NÓBREGA, 2005). Outra modificação humana que interfere significativamente nas taxas de produção de sedimentos dentro das bacias hidrográficas são as estradas sem pavimentação (RAMOS-SCHARRÓN & MACDONALD, 2007). Elas podem representar uma fonte significativa de sedimentos, devido à sua conectividade com canais de macrodrenagem e a alta compactação do solo e conseqüente baixa capacidade de infiltração das águas que acaba concentrando o escoamento superficial e acarretando em perda de solo por erosão hídrica (STOLF et al, 2018).

Zumach (2003) realizou uma série de amostragens da água do rio Itajaí-Açu na altura do município de Blumenau. As análises reuniram amostras de 1999 a 2002, e dentre vários parâmetros analisou-se turbidez e sólidos sedimentáveis. Os resultados foram de 0,1 mL/L de sólidos sedimentáveis para turbidez da água entre 6,99 e 283 uT. O valor máximo encontrado foi de 0,5 mL/L e aconteceu com turbidez de 28,7 a 101 uT. Neste caso a relação de turbidez por sólidos sedimentáveis variou de 57,4 a 2.830 mL/L.

2.2 RELAÇÃO ENTRE A QUALIDADE DA ÁGUA BRUTA E A TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Veras e Di Bernardo (2008) atentam que o tratamento de água de abastecimento, que venha de manancial superficial, deve ter ao menos duas etapas: a primeira é o pré-tratamento, onde se faz a separação de sólidos grosseiros e na segunda etapa as partículas finas e microorganismos remanescentes.

Isto se deve à exposição das águas superficiais à atmosfera e conseqüentemente à variação das concentrações das substâncias ali presentes. Neste caso, técnicas de tratamento

com menor capacidade de absorção das variações dos parâmetros apresentam limitações no seu uso, como mostra a Tabela 5. Conforme a tabela os valores máximos de turbidez e de cor verdadeira na água bruta captada de um manancial é que definem qual tecnologia de tratamento utilizar ou não utilizar. Das tecnologias apresentadas a que mostra menor capacidade de absorção é o filtro lento.

Neste sentido, Wegelin (1987) comenta que a principal causa do recuo do uso de filtros lentos, no tratamento de água, se dá pela sensibilidade da técnica ao nível de turbidez da água bruta, para níveis acima de 10 uT se faz necessário o pré-tratamento da água antes de passar pelo filtro, do contrário, os sólidos suspensos na água bruta logo causam o entupimento dos filtros, que acabam resultando em problemas operacionais.

Neste sentido, o pré-tratamento ou tratamento preliminar pode ser um aliado para reduzir os picos de turbidez e viabilizar a utilização de uma gama maior de tecnologias de tratamento para a potabilização da água.

Tabela 5 – Limites de parâmetros da água bruta para o uso de tecnologias de tratamento.

Parâmetros	Tecnologias de tratamento			
	Filtração direta descendente/ ascendente (Di Bernardo, 2003)	Dupla filtração (Di Bernardo, 2003)	Filtração lenta (Di Bernardo; Dantas, 2005)	Filtração lenta (Cleasby, 1991)
Turbidez (uT)	90% ≤ 10	90% ≤ 100	90% < 5	
	95% ≤ 25	95% ≤ 150	95% < 10	5
	100% ≤ 100	100% ≤ 200	100% < 15	
Cor verdadeira (uH)	90% ≤ 20	90% ≤ 50		
	95% ≤ 25	95% ≤ 75	95% < 5	-
	100% ≤ 50	100% ≤ 100	100% < 10	

Fonte: Di Bernardo (2003), Di Bernardo (1993) e Cleasby (1991).

2.3 TÉCNICAS DE PRÉ-TRATAMENTO DE ÁGUA SUPERFICIAL PARA REMOÇÃO DE TURBIDEZ E INSTALAÇÃO NA CAPTAÇÃO

2.3.1 Gradeamento – grades finas e microgrades

O gradeamento é a retenção de partículas por uma tela, ou grade de barras longitudinais, com aberturas menores que as partículas que serão retidas. As grades e telas têm diversas larguras, formatos e aberturas (HENDRICKS, 2010).

Metcalf e Eddy (2016) classificaram os tipos de grades pelo tamanho do material gradeado, sendo: grade grosseira, > 6 mm; grades finas, 0,5 a 6 mm; e microgrades, < 0,5 mm. Os autores, também expõem, que a microfiltração é o processo de separação de material

particulado de um líquido, o diâmetro dos poros, que reterão as partículas, varia de 0,05 a 2 μm , este processo se enquadra em separação por membranas.

Para Hendricks (2010) as grades variam de microgrades, com aberturas que variam de 1 a 60 μm , à telas de lixeiras, com abertura de 80-160 mm, as grades finas têm o propósito de tratamento da água, já as grades grosseiras têm a função de proteção de equipamentos. Para Tsutiya (2006), as grades grosseiras têm de 7,5 a 15 cm de espaçamento entre barras e são dispositivos para se instalar na captação de água e servem para reter materiais grosseiros flutuantes ou em suspensão que estão no curso hídrico, elas retêm partículas importantes para a proteção de adutoras e equipamentos de bombeamento, pois evitam a entrada de materiais com tamanho suficiente para bloquear tubulações e/ou danificar o rotor de um conjunto motobomba, mas não servem para remoção de turbidez.

As micropeneiras constituem-se de malhas com diferentes aberturas de filtração, que têm como objetivo reter sólidos não coloidais em suspensão (HELLER & PÁDUA, 2010).

A NBR 12.209/2011 define os gradeamentos conforme aberturas de passagem de sólidos como: grade grossa, de 40 a 100 mm; grade média, de 20 a 40 mm; grade fina, de 10 a 20 mm, e peneiras, de 0,25 a 10 mm. A partir deste ponto do texto as tecnologias que envolvem gradeamentos e peneiras serão denominadas conforme a NBR 12.209.

Conforme os materiais são retidos e não a limpeza da grade a área útil desta diminui, conseqüentemente, a velocidade da água passante na grade aumenta, assim como a perda de carga. Para uma pressão disponível constante de água, o que diminui é a vazão. Por este motivo, a limpeza do gradeamento influencia na capacidade hidráulica do dispositivo de retenção de sólidos.

O design de uma grade é uma arte que envolve: a seleção dos materiais, cálculos estruturais, componentes mecânicos, hidráulica, limpeza, transporte do material gradeado, disposição das grades ou telas e a manutenção destas (HENDRICKS, 2010). O autor ainda cita que o sucesso de um gradeamento não está, apenas, na eficácia de reter partículas, mas também nas suas funções suporte: limpeza das grades; ter acessórios para a coleta e remoção dos sólidos; ser feito de material durável, forte e não corrosivo; e prover um sistema que tenha fácil manutenção. Tudo isto faz parte da tecnologia do gradeamento, e neste contexto, o autor conclui que, a consequência disto, é que o desenvolvimento de tecnologias de gradeamentos está junto de empresas, que adquiriram experiência na área e desenvolveram produtos, e por isto os gradeamentos são primeiramente encontrados em catálogos de indústrias.

As empresas não costumam apresentar em seus catálogos a eficiência do equipamento quanto à remoção de parâmetros específicos, visto que tal eficiência depende do tamanho das

partículas presentes na água superficial onde será instalado o equipamento e assim não conseguem garantir uma eficiência padrão, desta forma se resguardam de futuras reivindicações vindas dos clientes.

Esta revisão se limitou a pesquisar técnicas para remoção de partículas que compõe a turbidez da água bruta para a instalação na captação.

2.3.1.1 Peneira de banda contínua (Band screens)

Diversas marcas, consolidadas no mercado mundial (mais de 80 anos de experiência), oferecem esta tecnologia. O princípio do funcionamento é o de uma esteira com giro contínuo e vertical, acionada por uma engrenagem, posicionada fora da água e dentro da água, na parte inferior, fica a segunda engrenagem, que guia o giro completo. Nesta “esteira” é onde se posicionam os gradeamentos finos, também chamados de peneiras. Ela foi concebida para ser instalada junto da captação de água superficial.

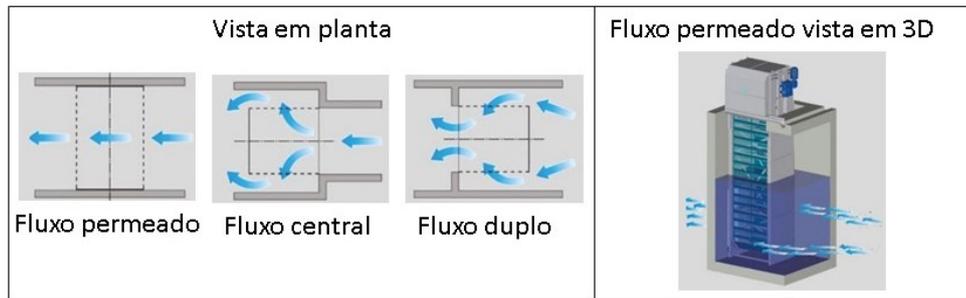
O objetivo dela é a remoção de partículas presentes na água com tamanho $> 0,5$ mm, como partículas com tamanho maior ou igual a partículas de areia grossa, tem como vantagem atender à grandes variações do nível de água do manancial de captação, pois sua estrutura chega a até 20 metros de comprimento na vertical; tem limpeza automática ou semi-automática por sprays de água posicionados na parte superior do equipamento; pode devolver ao rio o material gradeado, sem a geração de resíduos; a manutenção pode ser realizada em campo por operador treinado, sem necessidade de deslocamento do equipamento.

O fluxo de água pode transpassar a peneira por apenas um dos lados, ou entrar pelos dois lados, como demonstra a Figura 2, isto aumenta a capacidade do equipamento.

Para a sua instalação é necessária uma estrutura em concreto para apoiar o equipamento e seu funcionamento é elétrico.

As aberturas das malhas podem variar de 0,5 a 10 mm, sendo capaz de reter partículas do tamanho de pedregulhos (conforme Tabela 4), a largura da peneira chega a 5 metros, dependendo do fornecedor. Estes equipamentos têm grande capacidade de vazão filtrada, chega à 5.500 L/s com a malha limpa.

Figura 2 – Tipos de fluxo na Peneira de banda (band screen).



Fonte: Ovivo Worldwide Experts in Water Treatment (2010), adaptado pela autora.

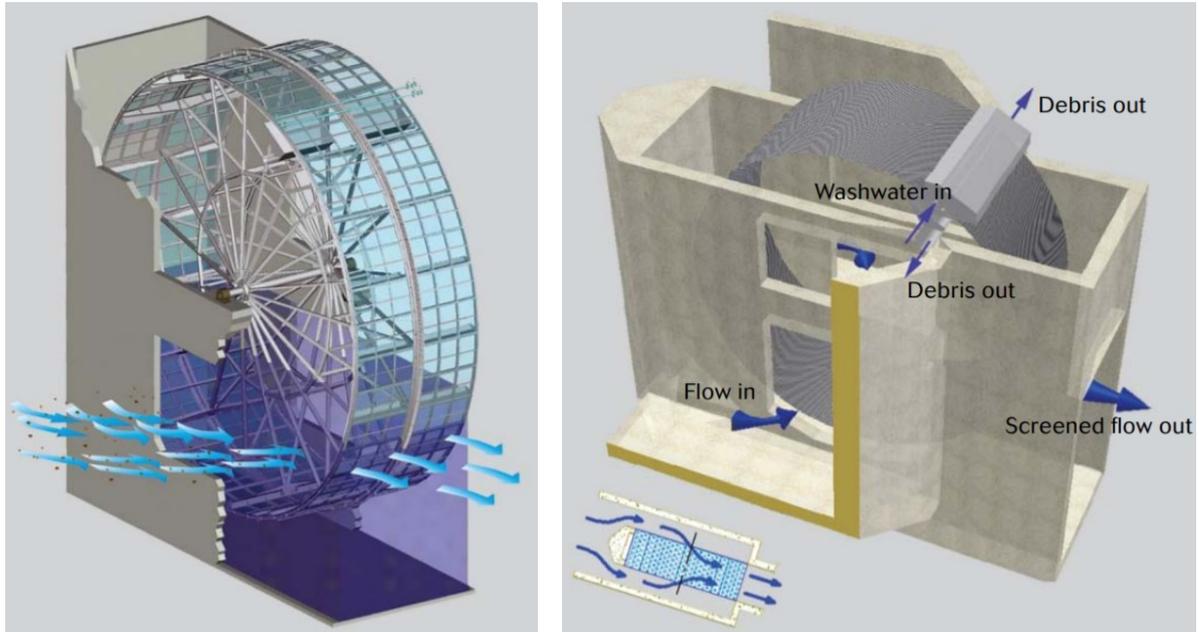
Há opções deste tipo de peneira no mercado que respeitam o estabelecido na seção 316b, da *Water Pollution Control Act (CWA)/2002*, da *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, que define que as tecnologias de captação de água devem minimizar impactos ambientais, possibilitando à retenção de peixes e crustáceos e devolução ao manancial sem comprometer a saúde destes indivíduos.

2.3.1.2 Peneira de tambor (*drum screen – Brackett green®*)

Outro leiaute de gradeamento fino é a peneira de tambor, com capacidade para até 35 m³/s. É como um grande cilindro, com diâmetros que variam de 6 a 20 metros e largura efetiva de 6 metros, que gira em torno de um eixo horizontal, posicionado na face circular, e a peneira é toda a face retangular. A água entra paralela ao eixo e sai por toda a superfície da peneira que está submersa, dependendo da configuração dos canais, pode-se fazer o fluxo inverso, em que a água entra pela peneira para dentro do tambor. O tambor gira continuamente e no topo recebe um spray de água para limpeza da tela, (Figura 3).

A abertura da tela pode ter de 0,11 a 6,00 mm, neste caso consegue remover partículas com tamanho maior ou igual a partículas de areia fina (conforme Tabela 4). A instalação precisa da construção de um canal próximo à captação e seu funcionamento demanda energia elétrica. E também conta com modelos compatíveis com a lei EPA CWA 316b na proteção de peixes.

Figura 3 – Esquema de funcionamento da peneira de tambor com fluxo de dentro para fora do tambor (drum screen)



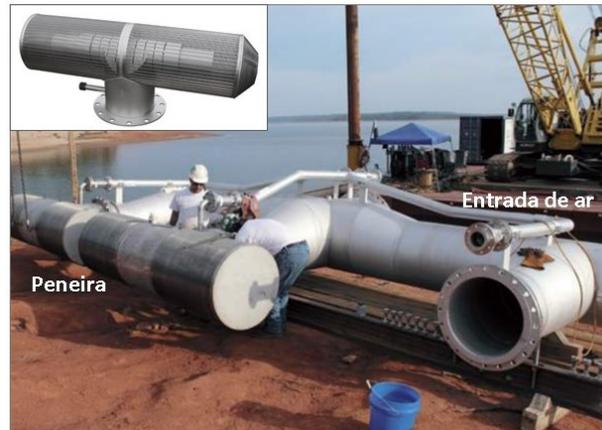
Fonte: Ovivo Worldwide Experts in Water Treatment (2016).

2.3.1.3 Peneira estática submersa (*Passive Intake Screens*)

Este tipo de peneira tem modelo comercializado desde 1968 e tem mais de 4.000 peneiras como esta instaladas pelo mundo (JOHNSON SCREENS, 2019). Estas peneiras têm baixa perda de carga e são posicionadas totalmente submersas na captação; são feitas para vazões maiores que $1,150 \text{ m}^3/\text{s}$; são modulares, pode-se acoplar mais peneiras e, para tal, apenas ajustar o arranjo das conexões e a faixa das aberturas da peneira variam de 1 a 10 mm, retém partícula com tamanho maior ou igual a partículas de que areia grossa, deve trabalhar com velocidades menores que $0,15 \text{ m/s}$ para propiciar que um peixe jovem consiga desviar do fluxo sem ser arrastado para a superfície da peneira (JOHNSON SCREENS, 2019). A limpeza é feita por bombeamento de ar, de dentro para fora da peneira.

A filtração é feita por gravidade, não depende de energia elétrica, mas a limpeza sim.

Figura 4 – Peneira estática submersa com limpeza por ar.



Fonte: Adaptado pela autora, Aqseptence Group (2019).

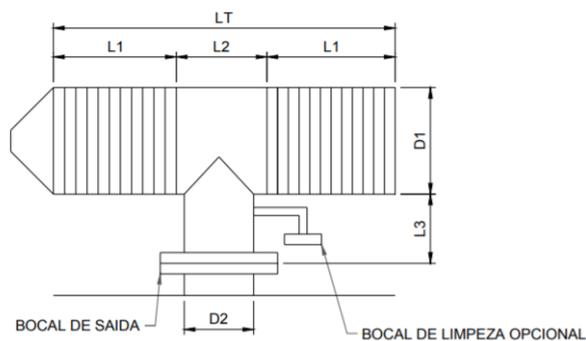
Figura 5 – Peneira estática submersa em operação e em limpeza.



Fonte: Adaptado pela autora, Aqseptence Group (2019).

Há outros modelos no mercado brasileiro que também se enquadram neste tipo de pré-tratamento para a captação instalação na captação e que atendem faixas de vazão de 0 até 1.170 m^3/h , os modelos são do tipo simples e tipo T. Os diâmetros (D_1 , conforme Figura 6) variam de 12” a 36” e a coluna de água necessária para o funcionamento de 0,6 m a 1,85 m. A abertura das grades finas varia de 1 a 4,5 mm. A maior capacidade está no modelo tipo T de D_1 de 36”, 2 mm de abertura e com 1,85 m de coluna d’água disponível. A maior taxa de passagem de água da linha é de $3.600 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, referente ao modelo tipo T com D_1 de 30” e abertura de 4,5 mm. Este modelo também possui conexão para limpeza, que pode ser realizada com ar ou água.

Figura 6 – Grade fina do tipo estática para vazões entre 0-1.170 m^3/h .



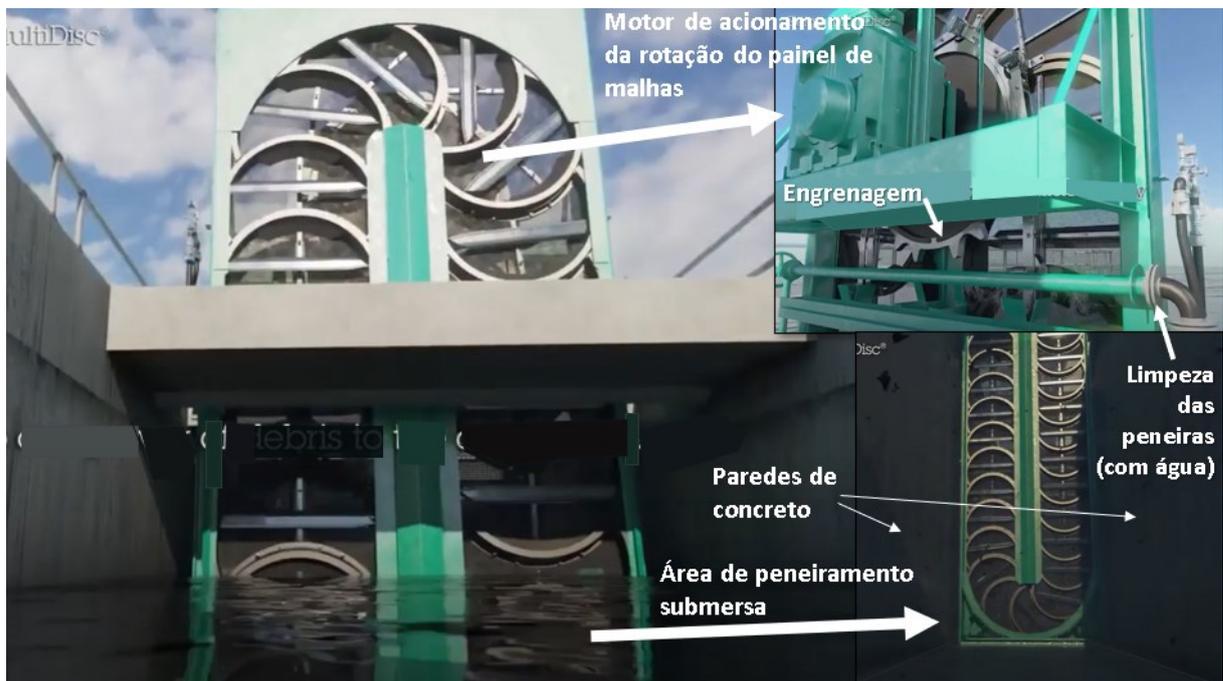
Fonte: Prominas, 2018.

2.3.1.4 Peneira de discos (multidisc screen)

Este tipo de tela consiste em um painel de malha rotativo em forma de foice feito em plástico polietileno ou polióxido de polietileno. Uma única corrente de transporte conecta os painéis pela face traseira e percorre uma unidade de deflexão na parte inferior e uma roda dentada acoplada a uma unidade de acionamento na parte superior. Os painéis de malha são executados em uma estrutura guia (BILFINGER WATER TECHNOLOGIES, 2014).

O equipamento é posicionado em um canal construído próximo à captação, a largura pode ser de 1,0 a 3,5 m, e comprimento vertical de 1,2 a 25 m. Também é uma boa opção para rios com grande variação da lâmina d'água. A capacidade é de até 50.000 m³/h e a abertura das peneiras pode ser de 0,2 a 10 mm (BILFINGER WATER TECHNOLOGIES, 2014), retém partículas com tamanho maior ou igual a de areia média. Seu funcionamento demanda energia elétrica. Há opções desta tecnologia com proteção conforme EPA CWA 316b. A limpeza é feita pelo borrifamento de água perpendicular à face de peneira e com fluxo contrário, isto é feito na parte superior, livre da lâmina de água.

Figura 7 – Ilustração da peneira multidisc.



Fonte: Bilfinger Water Technologies, 2014.

2.3.1.5 Microgrades, micropeneiras ou telas

As micropeneiras podem funcionar com bombeamento ou por gravidade, a primeira opção permite que se submeta a peneira à taxas de filtração maiores e aberturas menores, pois possibilita que a carga hidráulica disponível seja adequada à necessidade para atravessar a tela.

Entretanto, são sistemas mais caros do que os de funcionamento por gravidade (HELLER & PÁDUA, 2010).

A NBR 12.213/1992 recomenda usar área igual ou superior a $1,7 \text{ cm}^2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}$, para o dimensionamento do projeto; e a velocidade resultante deve ser igual ou inferior a $10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Em telas o coeficiente de perda de carga é calculado pela equação e se deve considerar 50% da área útil da peneira obstruída:

$$k = 0,55 \cdot (1 - \varepsilon^2) \cdot \varepsilon^{-2} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

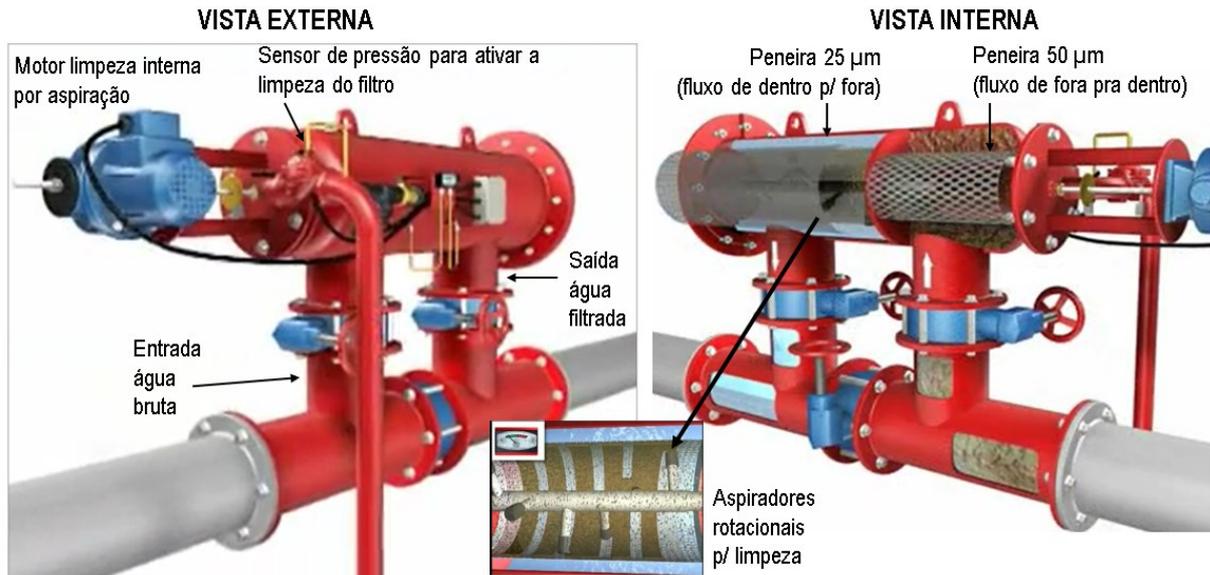
ε = porosidade, razão entre a área livre (útil) e a área total da tela.

Em 2003, Silveira testou uma micropeneira quanto à eficiência de remoção de: algas; cor aparente e turbidez, da água bruta superficial da Lagoa do Peri (Florianópolis/SC), manancial de captação da estação de tratamento de água da Lagoa do Peri, o tratamento da unidade era composto por coagulação seguida de filtração direta descendente. O objetivo do estudo foi avaliar a influência do pré-tratamento no tempo de carreira dos filtros.

O equipamento testado foi a micropeneira autolimpante, modelo SAF 3000 (marca AMIAD) com abertura de malha de 25 e 50 μm , retém partículas com tamanho maior ou igual a partículas de silte. Segundo catálogo da AMIAD, linha SAF Filters, a capacidade máxima é de $150 \text{ m}^3/\text{h}$; a pressão mínima de trabalho é de 2 bar ($\approx 20,39 \text{ m.c.a.}$) e a máxima de 10 bar ($\approx 101,97 \text{ m.c.a.}$); funciona com motor elétrico de 0,25 HP ($\approx 0,75 \text{ kW}$) e a área de filtração é de 3.000 cm^2 . Os critérios de retrolavagem da tela da micropeneira são: diferencial de pressão maior que 0,5 bar ($\approx 5,10 \text{ m.c.a.}$), intervalo de tempo definido e operação manual.

O teste realizado por Silveira (2003) usou vazão de $10,8 \text{ m}^3/\text{h}$, que resulta em uma taxa de permeabilidade de $0,06 \text{ L} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$. A água bruta usada teve turbidez baixa, de no máximo 7,7 uT e, apesar de não ser o foco do trabalho, os resultados da máxima remoção de turbidez foi de 13,33 %.

Figura 8 – Ilustração funcionamento filtro AMIAD – modelo SAF 3000.



Fonte: Amiad Water Sytems, 2020.

2.3.2 Filtração

2.3.2.1 Filtração em manta

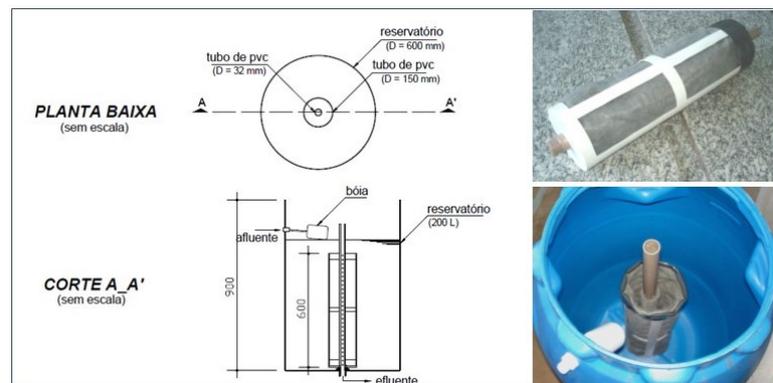
O filtro em manta é uma estrutura móvel composta por manta não tecida e areia que pode ser instalada dentro da captação e serve para tratar a água bruta superficial na entrada da tubulação de adução da captação.

Tavares (2008) desenvolveu e testou o pré-filtro vertical composto por duas camadas de manta não-tecida com recheio de areia (tamanho efetivo de 0,28 mm), o filtro foi construído com formato de cilindro oco com 0,60 m de altura, diâmetro externo de 0,15 m, onde se posicionou a primeira manta não tecida, e diâmetro interno de 0,032 m, onde se posicionou a segunda manta, este espaço entre elas foi preenchido com areia (ver Figura 9). O diâmetro médio das fibras foi de 27 a 100 µm, neste retém partículas com tamanho maior ou igual a partículas de silte, entretanto, conforme colmata a manta e diminui a taxa de filtração ela tende a reter partículas menores.

Para testá-lo se utilizou de um reservatório com nível constante, mas, se entende que o dispositivo poderia ser instalado na captação. O objetivo foi reduzir a área necessária para a instalação da pré-filtração, antecedente à filtração lenta, em comparação à área necessária para a instalação de um filtro de pedregulho. Para o teste se utilizou água bruta do Lago do Ipê, município de Ilha Solteira/SP (Brasil), com turbidez entre 3-12 uT. O pré-filtro trabalhou com taxa de filtração de 0,38-3,00 m³.m⁻².dia, com esta configuração tem capacidade para tratar de 4,47-35,34 L.h⁻¹.

Os testes mostraram que a eficiência de remoção da turbidez aumenta com a redução da taxa de filtração, remoção média de 81,7% (taxa de $0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}$) e 77,4% (taxa de $3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}$), a remoção de sólidos suspensos foi de 80-100%. O dispositivo também se mostrou eficiente na remoção de algas, cianobactérias, fitoflagelados e diatomáceas, com uma média de 95%. Para efetuar a limpeza se deve removê-lo e instalar outro no lugar, e a limpeza é feita de forma manual, remove-se a areia e as mantas e lava-se em qualquer recipiente (TAVARES, 2008).

Figura 9 – Filtro em manta: planta, corte e fotografias do experimento.



Fonte: Adaptado pela autora, Tavares (2008)

2.3.2.2 Filtração na calha do rio – sistema de captação subsuperficial

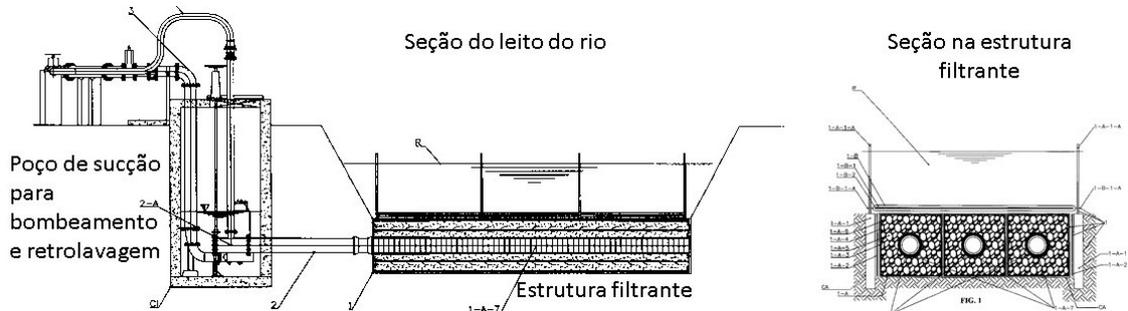
A tecnologia é um pedido de patente, de 2013, depositado pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). A invenção envolve método, equipamentos e instalações para uma captação subsuperficial com pré-filtração de água de rio.

Em resumo, a tecnologia consiste em uma estrutura filtrante composta por gabião, manta, pedras tipo rachão, areia torpedo e tubos ranhurados, posicionada em uma cavidade no leito do rio (entre os taludes) e perpendicular ao fluxo da água, dotada de pilares fundeados no leito do rio; um reservatório na margem, que recebe a água subterrânea e superficial filtrada e coletada pela estrutura anterior e serve como poço de sucção; sistema de bombeamento para adução da água captada e retrolagem da estrutura filtrante dotado de bombas submersíveis, com barrilete composto por conexões e registros que possibilitam tais manobras.

Este tipo de captação traz como vantagens: a possibilidade de captar a água subterrânea e a água que flui no rio com uma qualidade melhor, especialmente quanto à turbidez, sem necessidade da construção de barragem de nível e sem risco de entupimento por folhas ou materiais maiores; tem ótima relação de custo/benefício; otimização do aproveitamento da água captada; maior segurança operacional; redução de custos por minimizar o consumo de produtos químicos e da produção de lodo; número menor de paradas da produção da estação pela piora da qualidade da água em eventos de chuvas; e fácil manutenção (ANDREOLI et al. 2013). O

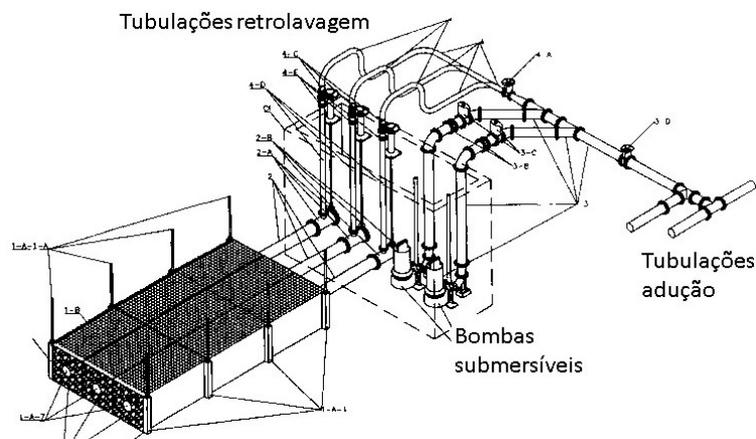
inventor não especificou qual o tamanho de partícula será retido no filtro, mas posiciona a patente como solução para remoção de turbidez.

Figura 10 – Corte do sistema de captação subsuperficial.



Fonte: ANDREOLI et al. (2013), adaptado pela autora.

Figura 11 – Vista em perspectiva do sistema de captação subsuperficial.



Fonte: ANDREOLI et al. (2013), adaptado pela autora.

2.3.3 Sedimentação

O princípio do processo unitário sedimentação é a força gravitacional (HENDRICKS, 2011). A separação sólida-líquida pode ocorrer por gravidade, conforme o peso da partícula, ou por centrifugação, vórtex e centrífuga.

2.3.3.1 Tanque de sedimentação

O Ministério da Saúde da Nova Zelândia (2007) apresentou a pré-sedimentação como opção de pré-tratamento de águas superficiais para pequenos sistemas de abastecimento. Ponderou que pequenas partículas (incluindo micro-organismos) não seriam removidas nessa unidade, já que a sedimentação delas é mais lenta. E destacou que para uma boa eficiência no processo é importante cuidar da hidráulica da entrada e da saída da unidade, de tal forma que a água entre no tanque sem causar turbulência, se possível com defletores para distribuir a vazão na seção e não criar caminho preferencial e, também, instalar a saída no topo do tanque e o mais

longe possível da entrada, para dar tempo da partícula chegar ao fundo e não ser arrastada para a unidade seguinte.

Sammarrae et al. (2009) fizeram uma simulação hidráulica, para testar a eficiência de remoção de partículas com diâmetro médio entre 20-250 μm , em um tanque de sedimentação de 20 m de comprimento, 3 metros de largura e 280 m^3 com e sem defletores e velocidade de entrada da água correspondente (vazão sobre área da seção perpendicular ao fluxo) de 0,0014 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. A eficiência de remoção dos tanques de sedimentação sem defletores por tamanho médio de diâmetro de partícula foi de: 16%, 20 μm ; 19%, 50 μm ; 24%, 80 μm ; 49%, 120 μm ; 87%, 170 μm ; 94%, 200 μm e 97%, 250 μm . Concluíram que a eficiência de remoção aumenta com o aumento do tamanho da partícula e que o uso de defletores aumenta a eficiência de remoção.

Em 2010, Kwak et al. testaram a eficiência da pré-sedimentação de água bruta superficial com turbidez alta, em época de chuva na Korea - estação de tratamento de água Songjeon, combinada à flotação. Concluíram que as cargas de sólidos, incluindo partículas maiores, diminuíram substancialmente com a aplicação de pré-sedimentação, durante a estação chuvosa. No entanto, os resultados da avaliação da distribuição do tamanho de partícula indicaram que as partículas menores precisam ser removidas por um processo de filtração, mesmo que o processo de flotação seja eficaz para diminuir as cargas de sólidos.

Em 2018, Jahanshahi e Taghizadeh testaram a diferença entre o uso e o não uso da pré-sedimentação dentro da seguinte sequência de tratamento: pré-cloração; pré-sedimentação; coagulação/floculação/decantação; filtro rápido e cloração final. Os parâmetros testados foram: turbidez; cloro residual e tempo de carreira dos filtros (por jartest).

A pesquisa de Jahanshahi e Taghizadeh (2018) mostrou que, para água bruta com até 30 uT, a utilização da pré-sedimentação não influencia na carreira de filtração dos filtros (24 horas), todavia, tem a desvantagem de provocar um custo maior com pré-cloração, para diminuir a quantidade de algas que se proliferam no tanque de pré-sedimentação, principalmente em clima tropical ou em dias quentes e ensolarados. Também concluíram, que a eficiência da pré-sedimentação é diretamente proporcional ao aumento da turbidez da água bruta, em momentos de chuva intensa, quando a água bruta tem turbidez entre 35-105 uT, o tanque de pré-sedimentação funciona como um amortecedor da variação de sólidos e faz com que a carreira de filtração (intervalo de entre retrolavagens), dos filtros rápidos, se mantenha em 24 horas com a pré-sedimentação e cerca de três vezes menor (8 horas) sem a pré-sedimentação.

2.3.3.2 Hidrociclone

Os hidrociclones, também conhecidos pelos nomes de ciclone hidráulico, ciclone de líquido, cones de separação e separadores centrífugos, constituem uma classe importante de equipamentos destinados principalmente à separação de suspensões sólido-líquido (SILVA, 1989; CASTILHO & MEDRONHO, 2000; SOUZA et al., 2000).

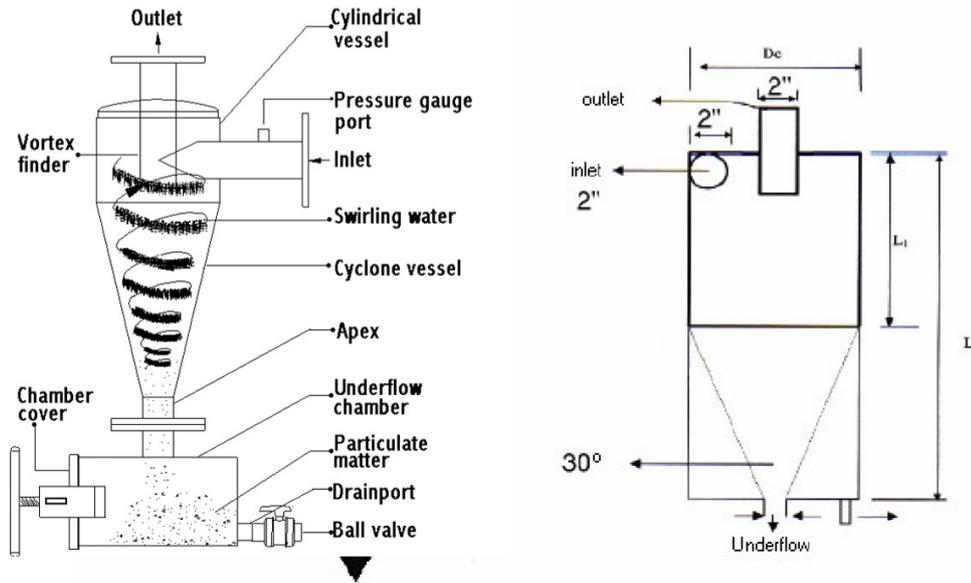
López et al. (1992) afirmam que hidrociclones são pré-filtros que conseguem separar até 98% de partículas maiores que 100 μm , separando apenas partículas mais densas que a água. Segundo Cabello (1996), são capazes de eliminar as partículas com densidade superior a 1,5 g/cm^3 e tamanho maior que 74 μm , a perda de carga nestes sistemas varia de 0,3-0,7 bar. Os autores citados também afirmam, que a grande diferença entre o hidrociclone e outros tipos de filtro é que no primeiro a perda de carga se mantém constante ao longo do tempo, varia apenas com a vazão de entrada, nos outros a perda de carga aumenta à medida que se acumulam sedimentos na superfície do material filtrante.

No dispositivo, as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca a separação dos sólidos da água, como uma sedimentação centrífuga (Souza et al., 2000)

O vortex é formado pela combinação da posição de entrada da água, tipo tangencial ou espiral à parede do filtro cônico, e dimensões das entradas e saídas de líquidos e concentrado (ver Figura 12). A água com partículas suspensas entra pelo tubo de alimentação e é animada por um movimento rotacional descendente até o orifício de fundo. Como esta abertura é relativamente pequena, parte do líquido sai carregando partículas grossas e a parte do líquido que não conseguiu sair, retorna, formando um vórtice ascendente interno, que segue para a saída superior, juntamente com as partículas finas (Flintoff et al., 1987; Rietema, 1961; Silva, 1989).

A centrifugação faz parte do processo, de separação de sólidos e líquidos, da sedimentação por gravidade, pois a força que age sobre determinada partícula ocorre dentro de um campo de força (HENDRICKS, 2011).

Figura 12 - Vista do corte de filtro hidrociclone.



Fonte: MAILAPALLI et al. 2007.

Tavares (2004) testou o separador centrífugo como pré-tratamento para a remoção de turbidez e de sólidos suspensos da água. Um dos testes foi com a água do rio Cubatão Sul - município de Palhoça - SC (Brasil), na ETA Morro dos Quadros - como pré-tratamento de filtração direta ascendente, as eficiências alcançadas foram: 33,0% de remoção de sólidos sedimentáveis, 31,0% para sólidos suspensos totais com purga constante (abertura de fundo com passagem reduzida para a saída de concentrado durante todo o tempo de funcionamento) e 3,4% com purga a cada 10 minutos (purga é a saída de água concentrada com sólidos pelo fundo do separador), 84,5% e 86% para sólidos dissolvidos totais com purga constante e purga de dez minutos. Entretanto, o parâmetro turbidez aumentou, após a passagem pelo equipamento, a autora concluiu que isto se deve à natureza dos sólidos presentes na água (argila), que, além de não serem removidos junto com as partículas mais pesadas pela saída inferior do separador, ainda sofreram cisalhamento no vórtex formado na saída da água clarificada, que, neste caso, saiu mais turva do que entrou, a remoção de turbidez variou de -44,9% a -6%. Também concluiu que a água que passou pelo pré-tratamento ficou com partículas com uma velocidade de sedimentação menor do que a água *in natura*.

2.4 BACIA DO RIO TUBARÃO E COMPLEXO LAGUNAR

A bacia do rio Tubarão e complexo Lagunar está na região hidrográfica catarinense nº 9 (Lei Estadual Nº 10.949/1998), nasce na Serra Geral e verte para o Oceano Atlântico (SANTA CATARINA, 2016). Tem uma área drenada de 4.685 km² e se une à bacia do rio D'Una no Complexo Lagunar das lagoas de Santo Antônio dos Anjos, Imaruí e do Mirim, (SANTA

CATARINA, 2016). Ela é dividida em 05 (cinco) sub-bacias: D'uma e Complexo Lagunar, Capivari, Braço do Norte, Formadores do Tubarão e Baixo Tubarão (Figura 13), tal divisão considerou o agrupamento dos municípios pertencentes ao mesmo curso d'água principal, também definiu seus exutórios (saída da sub-bacia hidrográfica) definido como pontos de controles dos usos da água dentro da bacia (Comitê da Bacia do rio Tubarão e complexo lagunar, 2011).

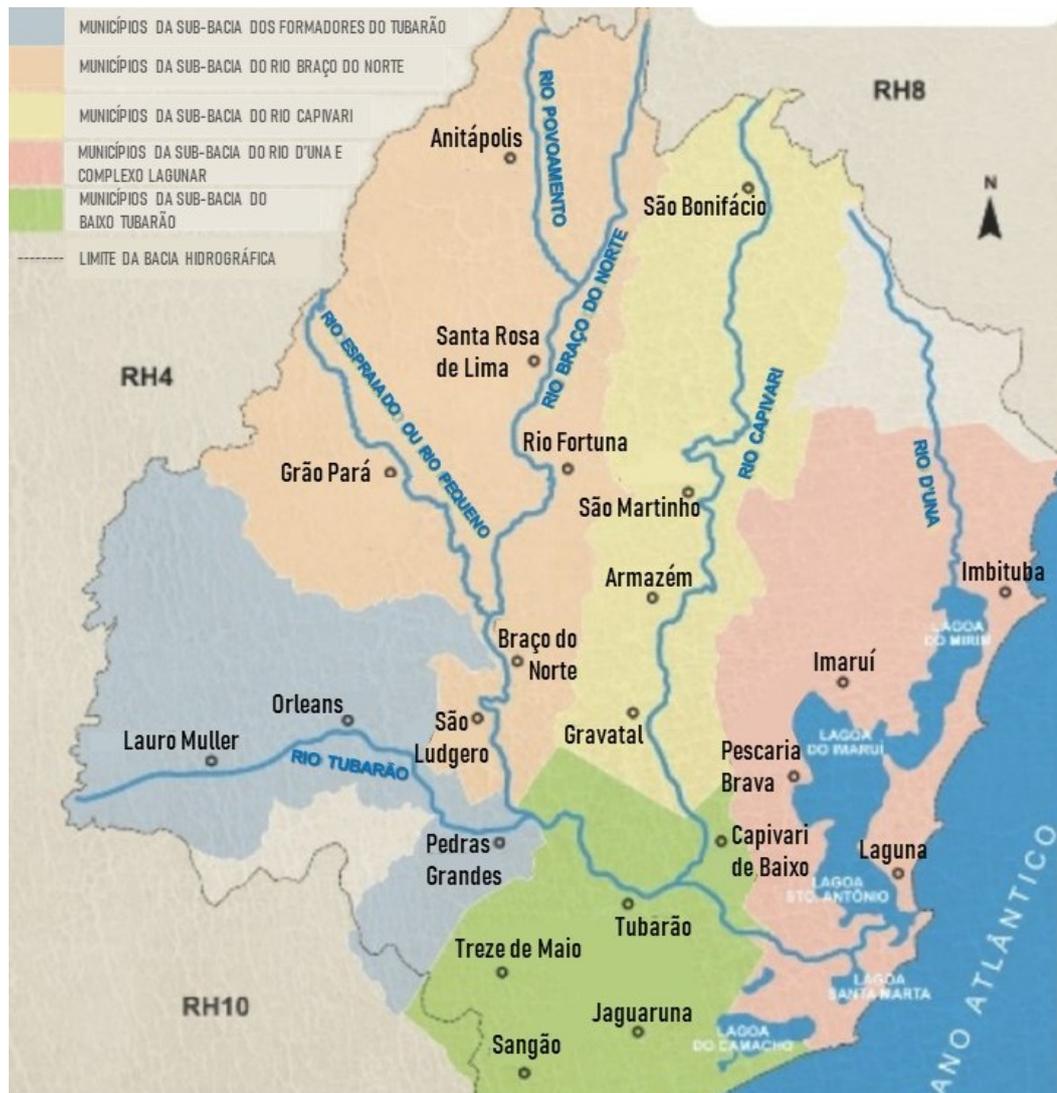
O principal rio da bacia, o rio Tubarão, nasce na encosta da Serra Geral com seus dois principais formadores, os rios Rocinha e Bonito (nascente em cota aproximada de 1400 m) dentro da sub-bacia Formadores do Tubarão, ambos nascem e se unem dentro do limite do município de Lauro Muller, formando o rio Tubarão (cota aproximada de 210 m). Este é o trecho do rio com maior declividade.

Na divisa entre Lauro Muller e Orleans, pela margem esquerda, recebe o rio Oratório (cota aproximada de 135 m). Já no município de Orleans, recebe pela margem esquerda o rio Laranjeiras (cota aproximada de 120 m). Na divisa entre Orleans e Urussanga, recebe o rio Palmeiras pela margem direita (cota aproximada 60 m).

No início da sub-bacia Baixo Tubarão - na divisa entre os municípios de Pedras Grandes, São Ludgero e Tubarão - recebe pela margem esquerda o rio Braço do Norte (cota aproximada 30 m), que vem da sub-bacia Braço do Norte.

Já na planície litorânea, na divisa entre os municípios de Tubarão e Capivari de Baixo (cota aproximada de 1 m, já em cota próxima à do nível do mar), o rio Tubarão recebe o rio Capivari de Baixo, vindo da sub-bacia Capivari. Já no município de Laguna, desemboca na Lagoa de Santo Antônio dos Anjos e segue para a sua foz.

Figura 13 - Sub-bacias da Bacia do rio Tubarão e complexo lagunar.



Fonte: Comitê da Bacia do rio Tubarão e complexo lagunar (2011), adaptado pela autora.

Todos os rios da Bacia são considerados de classe II, segundo classificação da Resolução CONAMA 357/2011.

2.4.1 Solo

A região litorânea da bacia do rio Tubarão faz parte da Unidade Geomorfológica Planícies Litorâneas. Seus componentes geológicos fundamentais são os sedimentos síltico-argilosos e as areias finas quartzosas. A presença de sambaquis ao longo de toda a costa atesta a existência de um nível marinho subatual mais elevado. Estas áreas são praticamente planas e sujeitas a inundações periódicas, resultado de acumulações fluviais, marinhas e lacustres. Nestas regiões os solos dominantes são os Gleis Pouco Húmicos, Areias Quartzosas Vermelho-Amarelas, Areias Quartzosas Marinhas, Solos Orgânicos, Cambissolo gleico, Podzol e Solos Indiscriminados de Mangue (EMBRAPA, 2004). Já a região de Orleans e Lauro Muller fazem

parte da Unidade Geomorfológica Depressão da Zona Carbonífera Catarinense, onde mostra um “relevo colinoso com vales encaixados e vertentes íngremes” (EMBRAPA, 2004).

As seguintes classes de solos são encontradas na região da bacia hidrográfica do rio Tubarão e complexo Lagunar (EMBRAPA, 2011) e respectivas definições (EMBRAPA, 2018) quanto ao primeiro nível:

- Neossolo: Do latim *neo* (novo), conota um solo com pouco desenvolvimento pedogenético, são solos constituídos por material mineral ou orgânico com menos de 20 cm de espessura;
- Argissolo: Do latim *argila* (argila), conota um solo com processo de acumulação de argila e são solos constituídos por material mineral;
- Latossolo: Do latim *lat* (tijolo), conota um solo muito intemperizado. São solos constituídos por material mineral;
- Cambissolo: Do latim *cambiare* (trocar, mudar), conota um solo em transformação. São solos constituídos por material mineral;
- Organossolos: Do latim *organicus* (pertinente ou próprio dos compostos de carbono), conota um solo com maior expressão da constituição orgânica;
- Gleissolo: Do russo *gley* (massa do solo pastosa), conota um solo com excesso de água. São solos constituídos por material mineral.

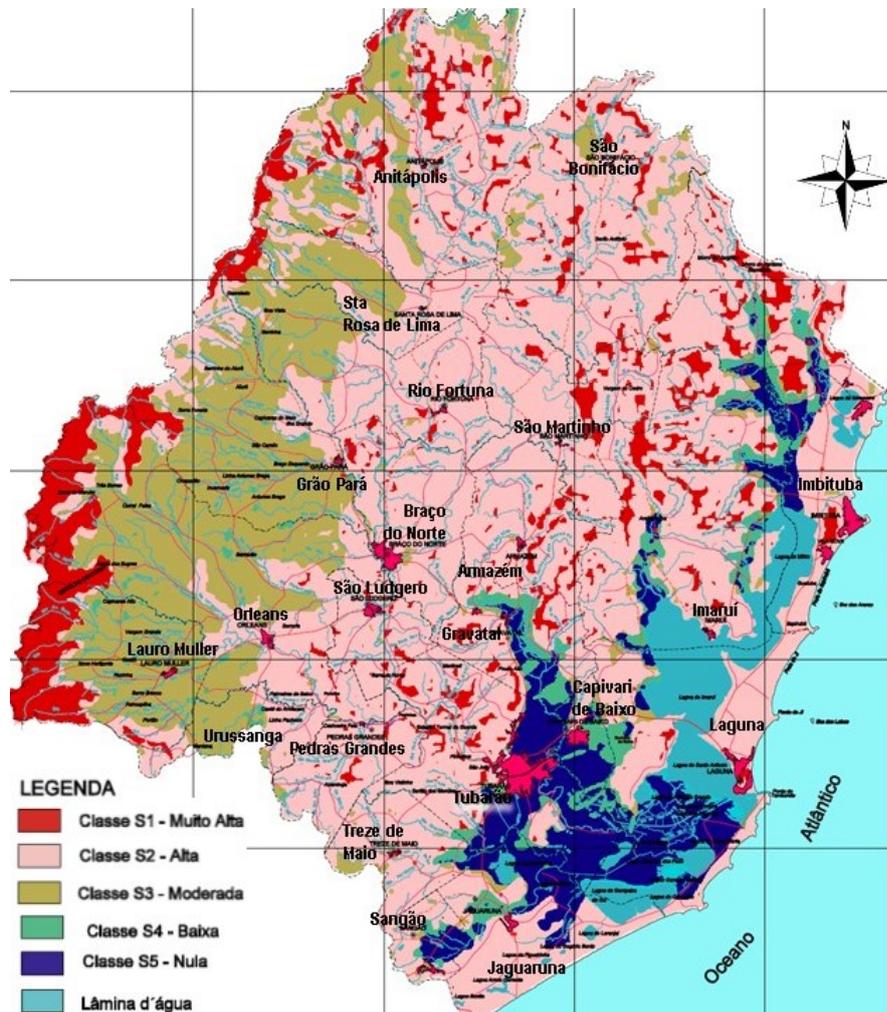
Na encosta da Serra Geral, dentro do território dos municípios de Orleans e Lauro Muller, o solo é o RLe25 – Neossolos Litólicos Eutróficos + Cambissolos Háplicos Tb Eutróficos + Afloramentos de Rochas (ver Figura 15). Esta é uma região com terreno bastante acidentado e íngreme, visto ser a transição entre o planalto catarinense com a planície litorânea, tem alta suscetibilidade de erosão (Figura 14). Esta região faz parte da Sub bacia Formadores do Tubarão e por ela passa uma importante rodovia do sul catarinense, a Serra do Rio do Rastro.

Aos pés da Serra do Rio do Rastro, passando por Lauro Muller, Orleans (na sub bacia dos Formadores do Tubarão), mais ao norte abrangendo parte da Serra Geral pelos municípios de Grão Pará, Rio Fortuna, Santa Rosa de Lima e Anitápolis (Sub Bacia do Rio Braço do Norte), compreendendo outro acesso importante do planalto Catarinense: a Serra do Corvo Branco, o solo é o PVAd4 – Argissolos Vermelho- Amarelo Distróficos + Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos (ver Figura 15). É uma área que no geral tem moderada suscetibilidade de erosão, com exceção de partes no topo da serra que apresentam alta suscetibilidade.

A maior parte da bacia está coberta pelo solo PVA56 Argissolos Vermelho- Amarelo Distróficos + Cambissolos Háplicos Tb Distróficos + Neossolos Litólicos Distróficos. A área com este tipo de solo coincide com a área considerada de alta suscetibilidade de erosão pelo mapa da Figura 14.

O solo OXY1 – Organossolos Háplicos Hêmicos + Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos + /cambissolos Háplicos Ta Eutróficos cobre parte interior da planície litorânea e a suscetibilidade de erosão é nula.

Figura 14 – Mapa de suscetibilidade de erosão da bacia rio Tubarão e complexo Lagunar.



Fonte: Comitê da Bacia do rio Tubarão e complexo lagunar (2011).

Figura 15 – Mapa dos solos na Bacia do Rio Tubarão e Complexo Lagunar



Fonte: EMBRAPA 2011, adaptado pela autora.

2.4.2 Atividades Econômicas com impacto na qualidade das águas

Dentre as principais atividades econômicas da bacia, com possibilidade de impacto na qualidade das águas, estão: a mineração, localizada na sub-bacia dos Formadores do Tubarão, em especial no município de Lauro Muller com o carvão, mas também na sub-bacia rio Braço do Norte com mineração de fluorita, sílex e granito; a agricultura e a suinocultura (Comitê da Bacia do rio Tubarão e complexo lagunar, 2011).

Em Braço do Norte, a suinocultura cresceu na década de 90 e se tornou uma importante atividade econômica, na mesma época ocorreu um aumento da concentração de matéria orgânica e coliformes nos rios Tubarão e Braço do Norte, para Hadlich (2004) há evidências de que estes dois fatos estão relacionados. Cadoná (2017) atribui a presença de fósforo e complexos nitrogenados na água do rio Coruja-Bonito (afluente do rio Braço do Norte) à constante aplicação de dejetos suínos nas áreas agricultáveis desta bacia e aponta o conflito de uso destas águas, visto que a poluição causada pela suinocultura interfere na qualidade da água captada para o abastecimento de populações.

Na sub-bacia dos formadores do Tubarão a extração de carvão é uma atividade antiga. Descoberto em 1830 pelos tropeiros desciam a serra catarinense para chegar ao Porto de Laguna e viram as pedras, usadas para proteger a fogueira, pegando fogo e se transformando em cinza (VETTORETTI, 1992). A primeira concessão para a exploração de carvão no estado aconteceu em 1861 na região de Lauro Muller (BELOLLI et al, 2002), mas sua exploração se torna viável

a partir da inauguração da Estrada de Ferro Donna Thereza Christina, em 1884 (FERROVIA TEREZA CRISTINA, 2020). Em 1960, em Capivari de Baixo, inaugurou-se a Termelétrica Jorge Lacerda, que produz energia elétrica por meio do carvão (ENGIE, 2020). As atividades econômicas que envolvem o carvão mineral têm um forte impacto financeiro na arrecadação e geração de empregos na região sul do estado, além de viabilizar a manutenção e funcionamento do trecho isolado do modal ferroviário.

Apesar deste viés, a partir da década de 70 - com a intensificação da preocupação jurídica quanto à proteção do meio ambiente, a atividade carbonífera passou a ser percebida também por seu impacto ambiental. Ela tem como um dos seus principais passivos ambientais o efluente da drenagem ácida de minas (DAM), que, ao alcançar mananciais superficiais e subterrâneos, acidifica e contamina com metais, limitando e até comprometendo a saúde ambiental e a utilização destas águas para o abastecimento público (CETEM, 2013).

O Decreto nacional Nº 85.206/1980 incluiu a região Sul de Santa Catarina como a 14ª Área Crítica de Poluição. Na sequência são promulgadas leis importantes para a proteção do meio ambiente como a Lei Federal Nº 6.938/81 que cria a Política Nacional do Meio Ambiente (BARROS, 2017), e prevê a recuperação de áreas degradadas e a proteção de áreas ameaçadas de degradação. A Lei Federal Nº 7.347/85 disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio ambiente, entre outros. O Decreto Federal Nº 97.638/86 que prevê o estudo e relatório de impacto ambiental para novos empreendimentos, inclusive os que se destinam à exploração de recursos minerais e a adequação dos existentes. E culmina na Constituição Federal de 1988 que estabeleceu artigos para a questão ambiental e Setor Mineral: artigos 20 a 23, 176, 225 e 231.

Em 1993, o Ministério Público Federal propôs a ação civil pública Nº 93.80.00533-4 (ACP do Carvão), que tratou da recuperação ambiental dos passivos gerados por mais de 100 anos de exploração inadequada do carvão no sul catarinense. A sentença teve abrangência regional de 3 bacias hidrográficas: dos rios Araranguá, Urussanga e Tubarão. Foram levantados 5.655 hectares impactados em superfície e 818 bocas de minas abandonadas (SIECESC, 2020).

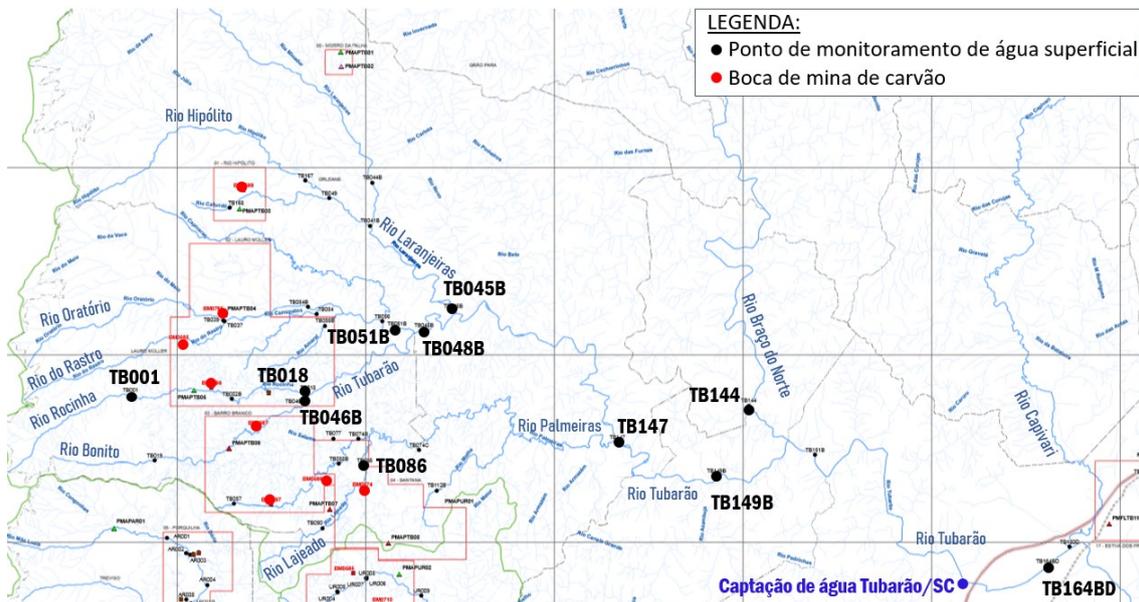
Em 2005, um Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) foi celebrado entre o MPF, Instituto de Meio Ambiente de Santa Catarina e empresas do setor de carvão para a adequação de todas as unidades em operação da cadeia produtiva do carvão mineral, desde a extração, o beneficiamento e o transporte e deposição final de rejeitos. Hoje, todas as empresas carboníferas do sul catarinense possuem Sistema de Gestão Ambiental (SGA), com certificação ISO 14.001 (SIECESC, 2020).

De 2003-2018, foram produzidos relatórios anuais com diagnósticos e monitoramentos ambientais da área impactada pela atividade de mineração que ajudaram a mensurar e monitorar os resultados das ações de recuperação destas áreas (ACP do Carvão, 2020), como principal indicador a qualidade da água dos rios.

2.4.3 Monitoramento da qualidade da água na Bacia do Rio Tubarão

A ACP do carvão monitorou as águas superficiais da bacia do rio Tubarão durante o período de 2002-2017 através de alguns parâmetros, dentre ele: pH, Fe e Mn (ACP do Carvão, 2020). Os pontos de amostragem estão na Figura 16.

Figura 16 – Principais pontos de monitoramento de águas superficiais na bacia do rio Tubarão e localização de bocas de minas de carvão abandonadas.

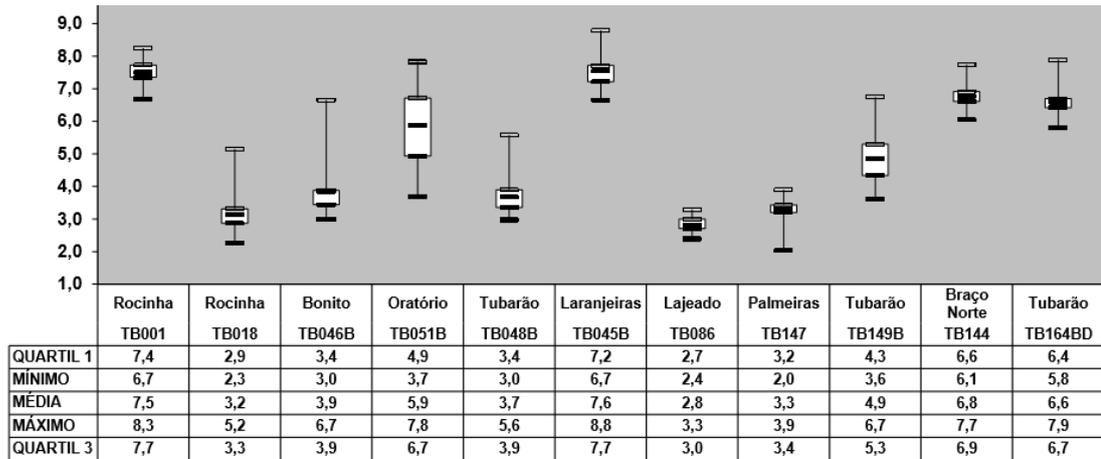


Fonte: ACP do carvão (2018), adaptado pela autora.

Os dados na Figura 17 evidenciam que os rios que contribuem para a elevação do pH no rio Tubarão são o Laranjeiras e o Braço do Norte. O rio Oratório também entrega águas com pH se aproximando da neutralidade, mas com oscilações, o registro mínimo foi de pH 3,7.

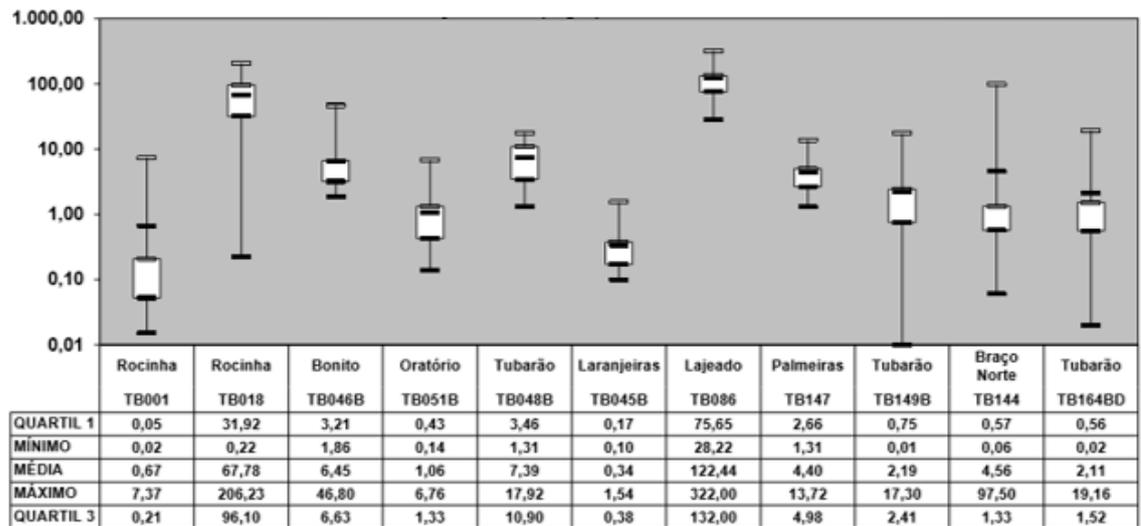
Conforme a Resolução CONAMA 357/2005, águas doces superficiais devem ter pH entre 6 e 9, ferro dissolvido $\leq 0,3$ mg/L e manganês total $\leq 0,1$ mg/L. Quando o pH está abaixo de 7, em condição ácida, há uma tendência em solubilização de metais, substâncias como o cianeto e sulfeto se tornam mais tóxicas para peixes e a amônia se torna menos tóxica (WEINER, 2007). A Figura 18 mostra que, exceto o rio Rocinha (TB001), todos os pontos de coleta estavam em 75% das amostras com concentração de ferro acima de 0,3 mg/L. E todos os pontos coletados estavam com mais de 75% das amostras com manganês acima 0,1 mg/L, sendo os piores resultados nos rios Rocinha (TB018) e Lajeado (Figura 18).

Figura 17 – Boxplot do parâmetro pH nas águas superficiais da Bacia do Rio Tubarão.



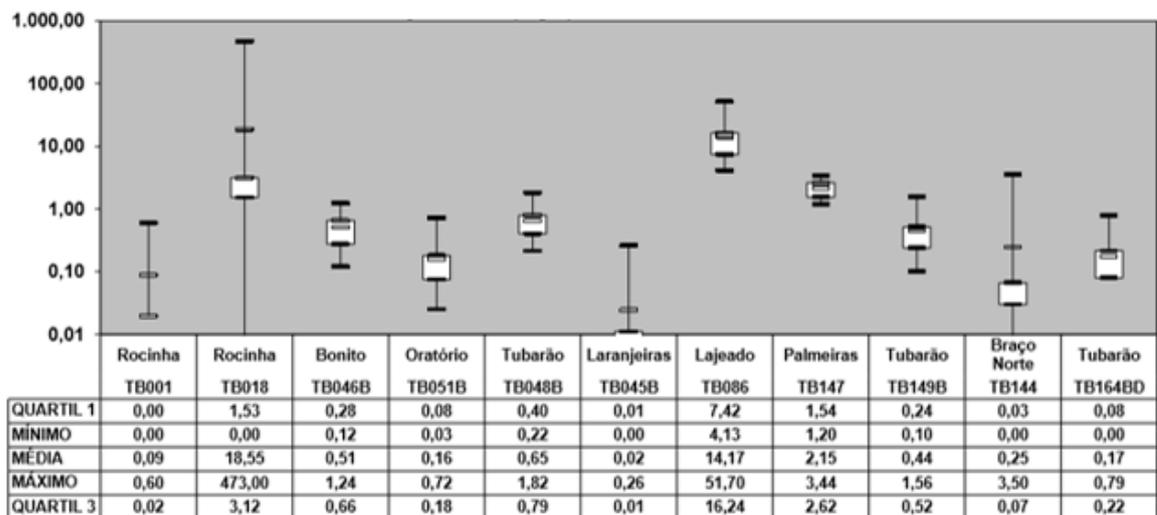
Fonte: ACP do carvão (2018).

Figura 18 - Boxplot do parâmetro Fe (ppm) nas águas superficiais da Bacia do Rio Tubarão.



Fonte: ACP do carvão (2018).

Figura 19 - Boxplot do parâmetro Mn (ppm) nas águas superficiais da Bacia do Rio Tubarão.



Fonte: ACP do carvão (2018).

Medeiros (2017) analisou a água e os sedimentos do rio Tubarão em vários pontos da bacia hidrográfica após evento de precipitação intensa, e concluiu que estes eventos dispersam sedimentos pela bacia, o local com maior concentração de metais na água é na parte alta da bacia, onde se localizam as atividades de mineração, mas a parte baixa dela, no estuário também apresentou níveis altos de metais, o que evidencia o transporte de elementos perigosos pela bacia, causado pela lixiviação de sedimentos contendo alta concentração de As, Fe, Ag, Co, Mo, Ni, Se, Cu e Pb. O autor ainda concluiu que apesar da evolução do setor de mineração no estado, enquanto houver material (exemplo pirita) exposto à oxidação e intemperismo o processo poluidor continuará.

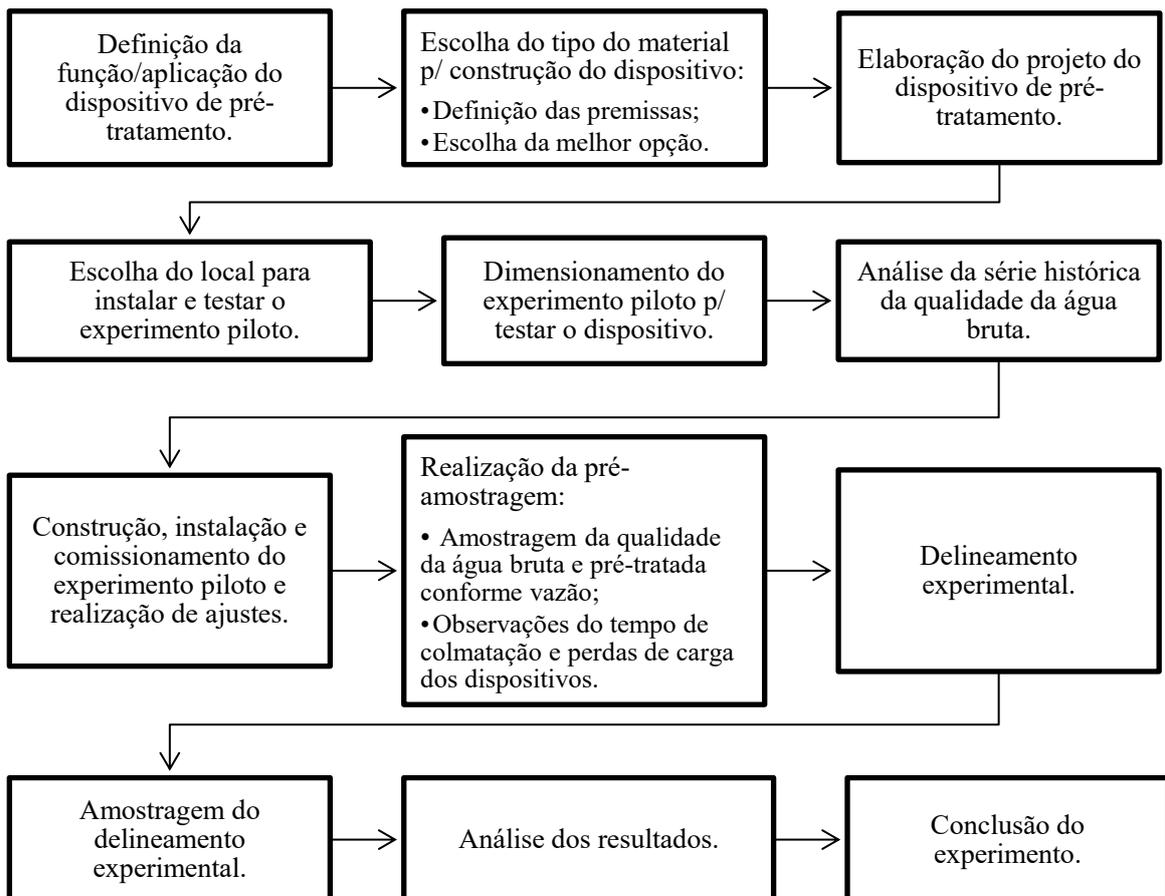
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 FLUXOGRAMA DO PROJETO PESQUISA

O desenvolvimento do projeto de pesquisa seguiu a ordem de execução conforme apresentado na Figura 20.

Inicialmente se definiu qual o problema que o experimento buscaria resolver, neste caso reduzir a turbidez da água bruta superficial já na captação. Na sequência, a concepção de como seria o dispositivo, como e onde ele seria testado. Após, se projetou um sistema piloto para testar o dispositivo e se definiu o local dos testes. Analisou-se o contexto em que o dispositivo seria inserido, neste caso a análise do histórico da água bruta. Após construção se instalou o dispositivo no local escolhido e se realizou o comissionamento e devidos ajustes. Testes iniciais foram realizados para entender o funcionamento do projeto piloto e ajudar a definir o delineamento experimental. Após isto se executou o plano de amostragem, depois realizou-se a análise dos dados e, por fim, a conclusão do experimento.

Figura 20 – Fluxograma do desenvolvimento do projeto pesquisa.



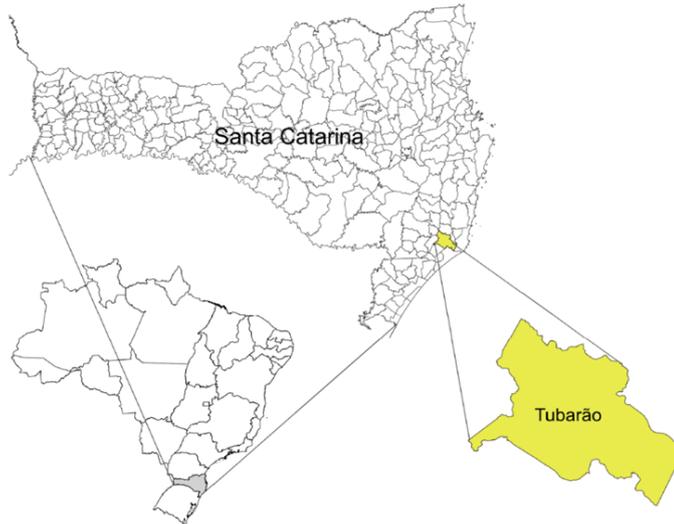
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2 EXPERIMENTO PILOTO

3.2.1 Localização do experimento

O local escolhido para a instalação e testes do experimento foi a Estação de Tratamento de Água (ETA) do município de Tubarão/SC, Brasil, localizada nas coordenadas: $28^{\circ}29'17.8''S$; $49^{\circ}01'45.5''O$, no sul do Brasil e sul de Santa Catarina (ver Figura 21 e Figura 22). Para os testes se utilizou a água bruta do rio Tubarão captada e pré-tratada pela Concessionária de Água e Esgoto Tubarão Saneamento, nas coordenadas: $28^{\circ}28'53.62''S$; $49^{\circ}2'21.63''O$.

Figura 21 – Mapa localização município de Tubarão/SC.



Fonte: IBGE, adaptado pela autora (2021).

Figura 22 – Localização da captação de água e ETA dentro do município de Tubarão/SC.



Fonte: Google Earth, adaptado pela autora (2021).

Na captação (Figura 23) a água bruta passa por processo físico de pré-tratamento, composto por gradeamentos com espaçamento de 20mm; canal de desarenação gravitacional e por processo químico de pré-oxidação para diminuir concentração de ferro e manganês, com o uso de hipoclorito de sódio 13%. O experimento foi instalado dentro da ETA e recebeu a água bruta do rio Tubarão após passar pelo pré-tratamento aqui (ver ilustração na Figura 24).

Figura 23 – Captação de água da Tubarão Saneamento S.A. no rio Tubarão.



Fonte: Tubarão Saneamento S.A. (2020).

A prestação do serviço de água e esgoto do município de Tubarão é realizada pela Tubarão Saneamento S.A. (Contrato de Concessão nº 038/2012) e o processo de tratamento da água é do tipo convencional.

Figura 24 – Vista da ETA e localização do sistema piloto.



Fonte: Tubarão Saneamento S.A. (2020), adaptado pela autora.

3.2.2 Definição das premissas do projeto

Para cumprir com um dos objetivos específicos deste trabalho, de criar e dimensionar um dispositivo de pré-tratamento de água bruta de manancial superficial que remova turbidez da água, se utilizou de algumas premissas para a concepção e elaboração do projeto piloto:

- O dispositivo deve ser concebido de tal forma que permita sua instalação dentro do manancial de captação, para minimizar impacto na área de captação;
- O dispositivo deve ser modular e de fácil transporte e instalação;
- O material de sua composição deve ser atóxico em água, não oxidar e ser de fácil acesso;
- Deve bloquear partículas suspensas na água com diâmetro de partículas do tamanho de grãos de areia;
- O sistema piloto deve possibilitar que os testes do dispositivo sejam realizados fora do manancial superficial;
- O local de instalação e testes do sistema piloto deve ser de fácil acesso, com segurança para a permanência do sistema durante o período que estiver instalado, sem risco de vandalismo ou furto, ter acesso à energia elétrica e à água bruta de manancial superficial.

3.2.3 Definição das características do dispositivo

3.2.3.1 Material

Para atender a premissa de que o dispositivo deve ser modular e de fácil transporte e instalação. O material também deve possibilitar diferentes arranjos e formatos. Os materiais analisados e suas características estão na Tabela 6.

Tabela 6 - Matriz para a escolha do material mais adequado para o dispositivo.

Material	Leve	Fácil acesso	Atóxico	Versátil
Pedregulho		X	X	
Areia		X	X	
Malha de Nylon	X	X	X	X
Malha de aço inox 304	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Dos materiais avaliados, a peneira de nylon e a peneira de aço inox 304 se enquadraram em todos os pré-requisitos listados. A seguir se avaliou a versatilidade dos dois materiais:

- A malha em nylon possibilita a criação de diferentes formatos, sem recortes, mas precisa de uma estrutura que a mantenha na posição requerida, se não,

tende a voltar ao formato original. O manuseio dela para moldar a forma definida também é mais difícil do que o da malha em aço inox;

- A malha em aço inox 304 tem a característica de conformabilidade plástica.

Pelos motivos acima expostos, se optou pela malha em aço inox 304.

3.2.3.2 Abertura de passagem dos sólidos

A abertura da malha é o que vai delimitar quais partículas serão retidas e quais seguirão junto com a água pré-tratada.

Definiu-se o tamanho da abertura máxima da malha para reter partículas com tamanhos aproximados de grãos de areia (63-2.000 μm). As malhas com mash entre 80-200 parte das partículas nesta faixa de tamanho, ficando de fora apenas parte das areias finas (63-200 μm).

Optou-se por testar 3 aberturas de malhas:

- Mash 80: abertura 170x170 μm , espessura do fio 140 μm , porosidade 0,3007;
- Mash 150: abertura 109x109 μm , espessura do fio 60 μm , porosidade 0,4160;
- Mash 200: abertura 77x77 μm , espessura do fio 50 μm , porosidade 0,3676.

O cálculo da porosidade em malha quadrada seguiu a NBR 12.213/1992, item 6.2:

$$\varepsilon = (1 - nd)^2 \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

ε = Porosidade, em %;

n = número de fios por unidade de comprimento;

d = espessura dos fios.

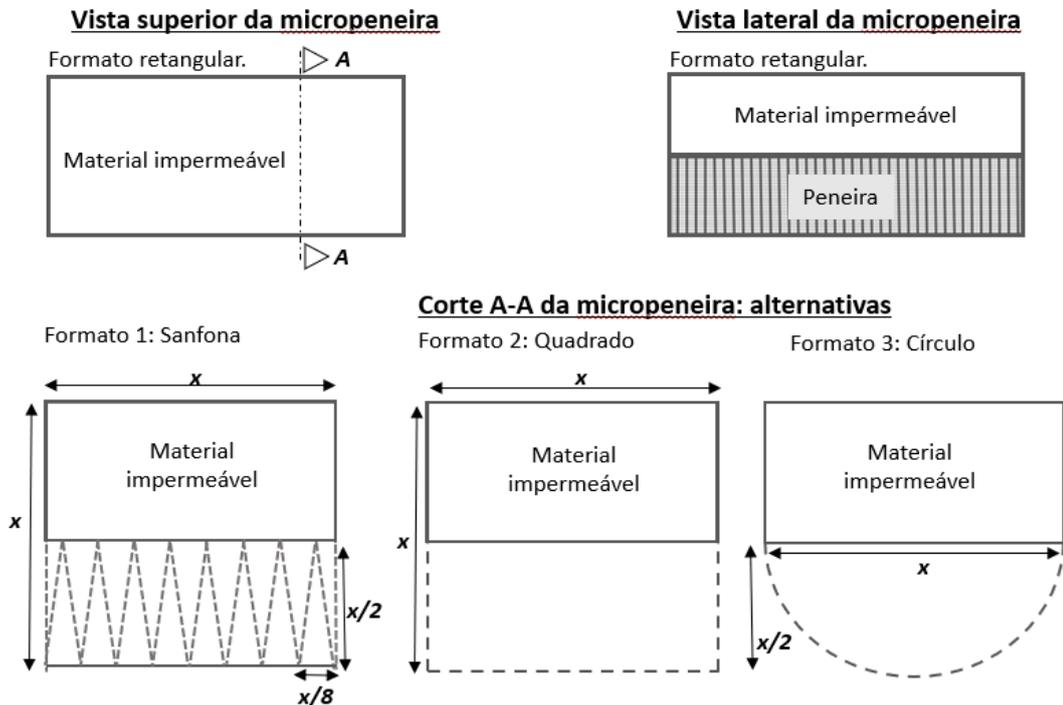
Classificou-se este pré-tratamento de micropeneira por causa das aberturas adotadas.

3.2.4 Elaboração do dispositivo de pré-tratamento e do experimento piloto

3.2.4.1 Formato da face de peneiramento

As micropeneiras foram projetadas para ficarem submersas no local da captação. Optou-se por não colocar área permeável da face superior e na parte da lateral delas para deixar os dispositivos mais estruturados, nestas faces optou-se pelo PVC laminado, visto a sua rigidez e compatibilidade com água, e também para forçar a entrada de água por baixo dos dispositivos, este fluxo contra a força da gravidade pode dificultar que a aproximação de partículas mais pesadas na face de peneiramento. Para a definição do formato das micropeneiras se calculou a área permeável para diferentes leiautes. O objetivo foi ter a maior área de peneiramento por volume ocupado pelo dispositivo. Os formatos analisados estão na Figura 25.

Figura 25 – Alternativas de formato da micropeneira.



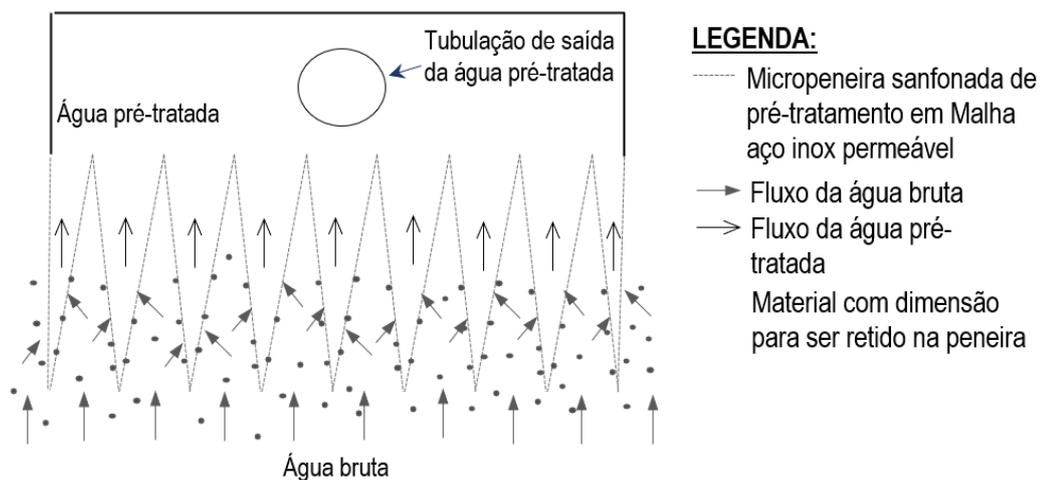
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

As extensões da micropeneira no corte A-A para cada formato foram as seguintes:

- Formato 1 = $3,125x$
- Formato 2 = $2x$
- Formato 3 = $1,57x$

O formato 1 foi o escolhido por apresentar a maior área de peneiramento por volume. Por causa do formato escolhido e da abertura de passagem de sólidos o dispositivo foi denominado micropeneira sanfonaada de pré-tratamento. Na Figura 26 está o croqui de funcionamento do dispositivo visto pelo corte A-A da Figura 25.

Figura 26 – Croqui do formato e funcionamento da micropeneira sanfonaada.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.4.2 Dimensionamento da micropeneira sanfonada de pré-tratamento e do experimento piloto

Para o testar as micropeneiras se projetou e construiu um sistema piloto que atendeu os seguintes critérios:

- Ter medidores de vazão para monitorar a água pré-tratada de cada micropeneira;
- Ter medidores de pressão antes e depois da passagem pelas micropeneiras, para possibilitar a aferição da perda de carga;
- Carga hidráulica disponível para o micropeneiramento constante;
- Ter 01 ponto de coleta da água bruta e 01 ponto da água pré-tratada para cada uma das micropeneiras;
- Ter sistema de retrolavagem dos dispositivos;
- Ter dispositivo para bloquear a vazão afluyente de água bruta no experimento;
- Ter dispositivo para controlar a vazão efluente de cada uma das micropeneiras;
- Ter uma circulação de água bruta que adentrasse no sistema mas não passasse pelas micropeneiras, para simular uma situação de campo de velocidade de água dentro do corpo hídrico.

Para a medição de vazão optou-se pelo macromedidor eletromagnético de vazão em PVC, modelo VMS Pro 019 (3/4") da Incontrol com transmissor de vazão. A faixa de medição do equipamento é de 102 a 10.207 L.h⁻¹, para que trabalhe dentro da faixa de velocidade definida pelo fabricante de 0,1 a 10 m.s⁻¹. Para o registro das vazões se utilizou um logger para cada macromedidor, e se definiu um intervalo de 5 minutos para o envio de vazão média do transmissor de vazão para o logger. A informação foi transmitida para o datalogger da Novus Produtos eletrônicos Ltda modelo LogBox-AA, este armazenou a informação até que os dados fossem descarregados pela pesquisadora através do software LogChart II.

A tubulação de saída do medidor de vazão foi projetada para trabalhar sempre afogada, seguindo orientação do fornecedor para evitar erros de leitura.

A unidade que comportou as peneiras foi dimensionada para que estas ficassem na horizontal, com a face de peneiramento voltada para baixo, funcionando paralelas e sujeitas à mesma carga hidráulica. Adotou-se uma caixa estanque com a parte superior em acrílico, para possibilitar a visualização das 3 micropeneiras. As tubulações de saída foram posicionadas para desaguar em um mesmo reservatório de água pré-tratada.

Para manter a carga hidráulica disponível para as peneiras constante, foi projetado um tanque de nível na entrada do experimento dotado de registro boia na tubulação afluyente para controlar a vazão de entrada e manter uma coluna da água constante, então se conectou este tanque na caixa estanque das micropeneiras.

Para a medição de pressão foram posicionados piezômetros feitos com tubulação transparente, possibilitando visualizar o nível da água, e posicionados antes da passagem pelo pré-tratamento (na caixa das micropeneiras) e após a passagem na tubulação de saída de cada uma das micropeneiras.

Os pontos de coleta foram projetados nas tubulações de passagem de água bruta e de saída de cada uma das micropeneiras, antes da entrada no reservatório de água pré-tratada.

O sistema de retrolavagem foi projetado com uma bomba centrífuga, com tubulação de sucção no reservatório de água pré-tratada, com um crivo feito com a menor malha das três peneiras, a malha 200, para assim evitar que partículas fossem retidas na parte interna das peneiras de mash 150 e 200.

Para o controle da vazão adotou-se um registro gaveta na tubulação de saída de cada micropeneira.

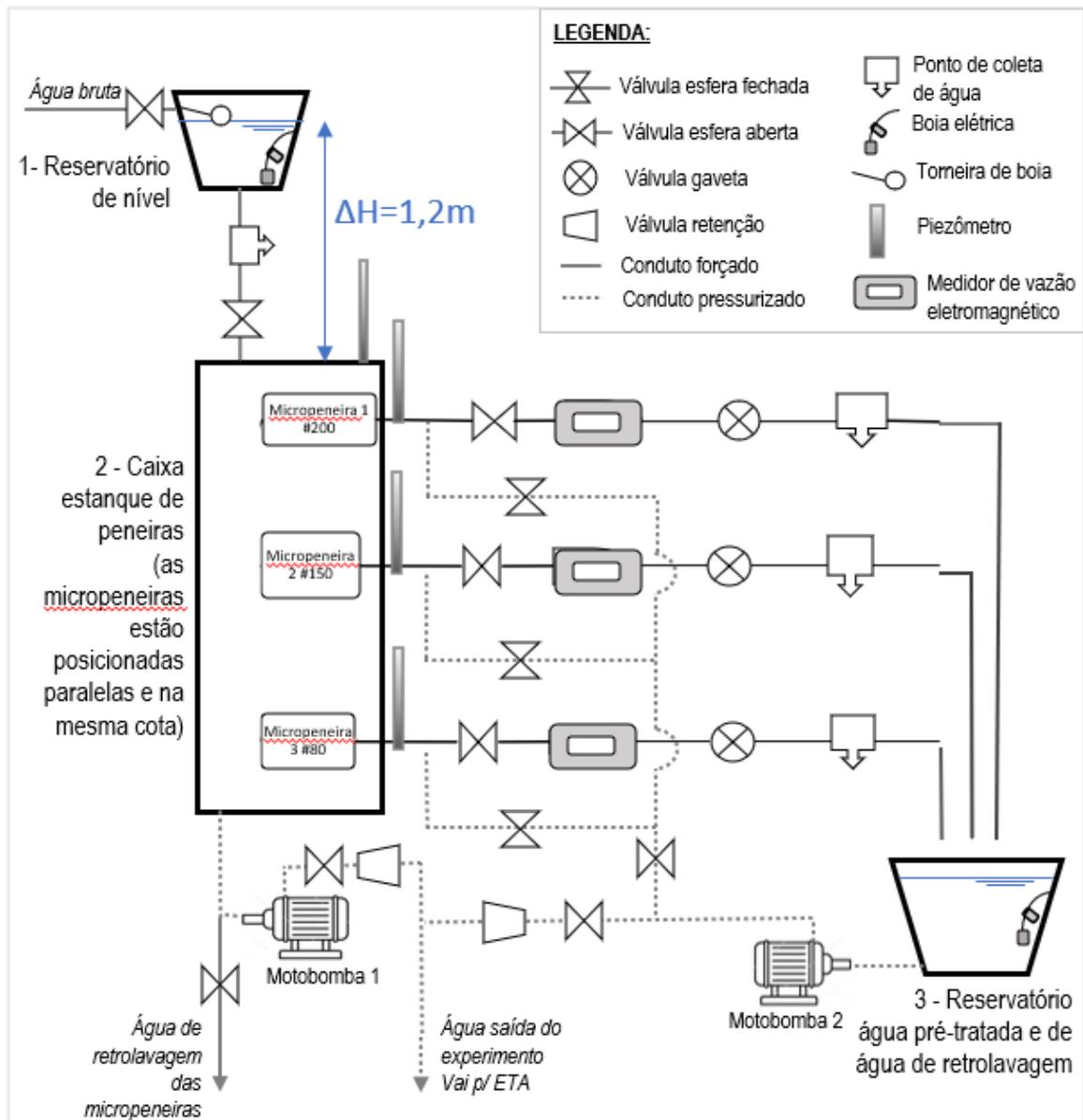
Para permitir uma vazão passante pela unidade das peneiras, e simular um fluxo de água em um manancial, foi projetado um dreno no fundo da unidade conectado à uma bomba centrífuga de $\frac{1}{2}$ cv acionada por uma eletroboia dentro do reservatório de nível que liga o conjunto motobomba quando a cota da água no reservatório chega no máximo e desliga quando está 15 cm abaixo do máximo.

Na Figura 27 o fluxograma mostra a disposição das unidades dentro do processo, sequência e alternativas de manobras do funcionamento.

Nesta estrutura também foi projetada uma parte fechada para abrigar os equipamentos elétricos que não poderiam ser submetidos às intempéries, como os macromedidores eletromagnéticos de vazão, os dataloggers, os conjuntos motobombas e os dispositivos de controle elétrico, o material adotado foi madeira envelopada de chapa de alumínio.

Na Figura 28 o esquema em 3D do experimento piloto.

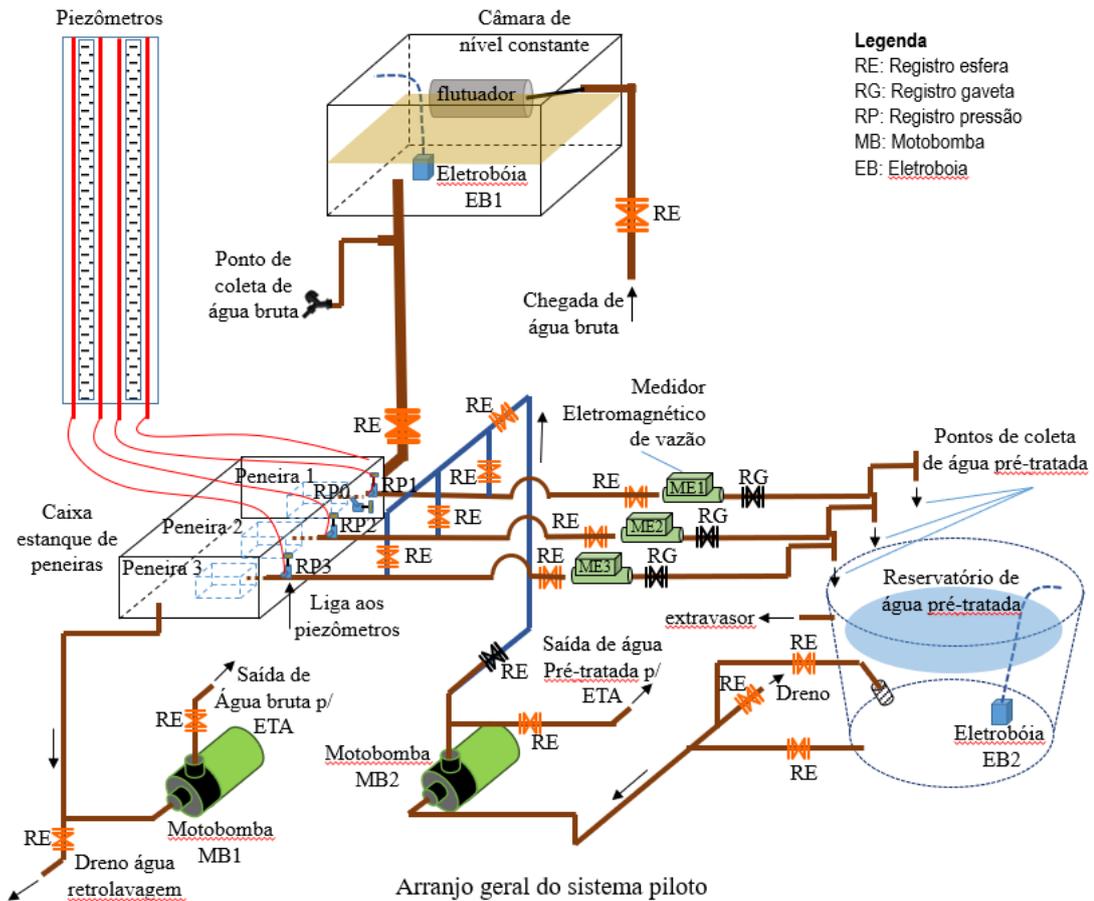
Figura 27 – Fluxograma do experimento em modo de funcionamento.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A capacidade de vazão do conjunto motobomba 1 era de 1 L.s^{-1} e do conjunto motobomba 2 de 2 L.s^{-1} , ambos equipamentos já disponíveis para a instalação no experimento. Um total de 3 L.s^{-1} , a partir destas vazões e considerando os limites de operação dos macromedidores de vazão se definiu as vazões de dimensionamento. Neste caso o sistema foi dimensionado para funcionar com 3 L.s^{-1} de vazão de entrada e saída quando as três micropeneiras estivessem totalmente limpas, sendo 2 L.s^{-1} passando pelas 3 micropeneiras e 1 L.s^{-1} passando pelo conjunto motobomba 1. Para a situação de área útil de peneiramento com 50% de obstrução, considerou-se a metade desta vazão: 1 L.s^{-1} (3.600 L.h^{-1} total das 3 peneiras e 1.200 L.h^{-1} para cada uma delas).

Figura 28 – Sistema piloto, desenho esquemático em 3D.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O dimensionamento usou como base a vazão do cenário com 50% de obstrução (indicada para calcular a perda de carga na tela, conforme NBR12.213/1992, também atendeu a premissa de taxa de abertura das telas maior que $1,7 \text{ cm}^2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}$, de modo que a velocidade seja menor ou igual a 10 cm/s).

Optou-se que todas as três micropeneiras, com mashes diferentes, tivessem a mesma dimensão na largura e a mesma área útil, como a área útil depende da área de peneira e da porosidade de cada tela (esta característica se difere entre as malhas), o ajuste ficou no comprimento das peneiras.

Equação da taxa de abertura da micropeneira:

$$\text{Taxa abertura } [\text{cm}^2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}] = \frac{\text{Área útil } [\text{cm}^2]}{\text{Vazão } [\text{L} \cdot \text{min}]} \quad (\text{Equação 3})$$

A perda de carga nas telas limpas e com 50% de obstrução foi calculada com a seguinte equação, conforme item 6.2 da NBR 12.213/1992.

$$h = k \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

h = perda de carga [m];

k = coeficiente adimensional de perda de carga, função dos parâmetros geométricos das telas;

V = velocidade média de aproximação [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];

G = aceleração da gravidade [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

Equação de k :

$$k = 0,55 \frac{(1-\varepsilon^2)}{\varepsilon^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando a vazão máxima de entrada no dispositivo de $3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ e em cada peneira $0,66 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Tubulação de entrada em PVC DN100 com 1m de extensão, dois cotovelos 90° , um registro gaveta, uma entrada normal e uma saída; tubulação de água peneirada em PVC DN 25, 1 m de extensão, uma entrada normal, uma saída, dois registros gaveta, dois cotovelos 90° , um tê passagem direta, 5 cm de desnível da tubulação de saída para afogamento da seção do macromedidor, totaliza em 85 cm de coluna d'água necessária para estas condições. Além disso se considerou mais 0,35 cm de coluna d'água para a passagem pela peneira. Totalizando em 1,2 m de desnível entre a entrada e a cota das peneiras.

3.2.5 Caracterização da água bruta do rio Tubarão

3.2.5.1 *Análise do histórico*

A Concessionária de água e esgoto Tubarão Saneamento S.A. disponibilizou a série histórica entre 04/2018 a 02/2019 da água bruta afluyente a ETA Tubarão, são dados lidos a cada 2 horas de turbidez, cor aparente e pH. Realizou-se uma análise estatística descritiva da série histórica e sua distribuição amostral através da análise de frequência acumulada. Além da série histórica do período que se antecedeu os testes do experimento, também se analisou a série histórica durante o período de amostragens (04/2019 a 03/2020).

3.2.5.2 *Análise granulométrica*

Também se realizou análise granulométrica da água bruta com turbidez de 36 uT (coletada no experimento no dia 22/05/2019) através do equipamento Horiba LA-950, que é um analisador de distribuição de tamanho de partícula por difração a laser, ele determina as frequências granulométricas (em microns e phi) das partículas presentes na amostra, está análise foi realizada pelo Laboratório de Oceanografia Costeira – LOC/UFSC. Como as partículas estavam dispersas dentro da amostra de água, para que a amostra pudesse compor com uma quantidade mínima de partículas que o equipamento conseguisse realizar a leitura, foi utilizada

a amostra como diluente do analisador, ao invés de usar a água destilada, conforme orientação do fornecedor.

3.2.5.3 *Análise de sólidos sedimentáveis*

Esta análise foi realizada conforme orientações da NBR 10.561. Utilizou-se o cone imhoff graduado e 1 litro de água bruta que ficou em repouso dentro da vidraria por 1 hora, e então realizou-se a leitura do material que sedimentou no fundo do cone.

Para a análise de quais tamanhos aproximados das partículas continuavam suspensas na água após a 1 hora de teste no cone Imhof se utilizou a Lei de Stokes, com ela se calculou o diâmetro da menor partícula que poderia sedimentar com as condições da análise.

$$t = \frac{18 \times \eta \times h}{g \times (\rho_s - \rho_l) \times \varphi^2} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

t = tempo de sedimentação [s];

h = altura de sedimentação desde a superfície [cm];

η = viscosidade da água [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$], utilizou-se $0,008007 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}$ a 20° C ;

g = aceleração da gravidade [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$], $980 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$;

ρ_s = densidade do sólido [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], utilizou-se $2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

ρ_l = densidade do líquido [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], utilizou-se $0,99949 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a 20° C ;

φ = diâmetro da partícula [cm]

3.2.5.4 *Análise da precipitação a montante da captação e impacto na turbidez*

Para esta análise se escolheu 3 estações pluviométricas a montante da captação do rio Tubarão que mostrassem as chuvas em diferentes pontos da bacia:

Estação 1, localizada na sub bacia do rio Braço do Norte, no município homônimo, é de responsabilidade da ANA e operada pela Epagri/SC, código 84559800.

Estação 2, localizada no município de Bom Jardim da Serra, apesar de não estar dentro da Bacia do Rio Tubarão, está próxima do divisor de águas e as chuvas nesta região impactam parte da sub bacia Formadores do rio Tubarão, próximos à Serra do Rio do Rastro. A estação código 2849009 é de responsabilidade da ANA e operada pela CPRM.

Estação 3, localizada no município de Urussanga, também não está dentro da bacia do rio Tubarão, mas próxima do divisor de águas. As chuvas nesta região impactam parte da sub bacia formadores do rio Tubarão na região do rio Lajeado, Armazém e Azambuja. A estação código 2849011 é de responsabilidade e operada pelo INMET.

Os dados de turbidez foram fornecidos pela Tubarão Saneamento S.A., amostras coletadas e lidas pela equipe de operação na entrada da ETA Tubarão, a cada duas horas.

Escolheu-se dois pontos de pico de Turbidez dos anos de 2019 e 2020 que coincidissem com as datas de análise de sólidos sedimentáveis realizadas nesta pesquisa.

3.2.6 Testes iniciais

3.2.6.1 Eficiência de remoção

Nesta etapa operou-se o sistema piloto e peneiras com as condições que a água estava naquela semana, entre 10-30 uT e com vazão de 200 L/h, com algumas variações. A pré-amostragem durou 4 dias, realizaram-se coletas da água bruta e peneirada quanto aos parâmetros: pH, cor aparente e turbidez, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros, métodos e equipamentos.

Parâmetro	Método	Equipamento
Turbidez (uT)	2130b (APHA, 1999)	Turbidímetro modelo 2100P, marca Hach.
Cor aparente (uH)	2120b (APHA, 1995)	Espectrofotômetro modelo DR2700, marca Hach.
pH	4500-H ⁺ (APHA, 1999)	Medidor de pH modelo mPA-210, marca MS Tecnopon Instrumentação.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para que não tivesse interferência no resultado da eficiência das peneiras pela colmatação se optou por realizar a mostra já nos primeiros 5 minutos do início da rodada. E para que as amostras fossem independentes, antes do início de qualquer teste se garantia que a peneira estivesse limpa, neste caso realizando a retrolavagem, mesmo que o teste anterior não tivesse chegado a colmatar a peneira.

Antes da inserção da amostra de água no turbidímetro se realizou a agitação desta, a leitura era repetida três vezes e a cada nova leitura também se repetia o procedimento de agitação da amostra. Dos três valores lidos se descartava os valores menor e maior e ficava com o valor intermediário para compor os resultados.

3.2.6.2 Tempo de colmatação e perda de carga

Analisou-se o tempo de colmatação das peneiras, considerou-se colmatada quando a peneira tendia a vazão zero e/ou perda de carga de 1,2 m (carga hidráulica máxima disponível para o peneiramento). As evoluções das perdas de cargas nas peneiras foram aferidas por meio dos piezômetros instalados antes e após as peneiras. Paralela aos piezômetros foi instalada uma fita métrica para auxiliar a leitura da variação da pressão.

As vazões foram retiradas dos datalogger que receberam as informações dos três macromedidores eletromagnéticos de vazão.

3.2.7 Delineamento experimental

Após o pré-teste se analisou os resultados estatisticamente e se definiu as variáveis independentes, fatores e variável resposta. Optou-se por seguir um delineamento experimental do tipo fatorial. Este método otimiza o número de amostras a serem realizadas no experimento. Entretanto, é importante que se tenha controle sobre as variáveis independentes.

As duas variáveis independentes escolhida foram: Vazão e Turbidez da água bruta. E a variável resposta o percentual de remoção de turbidez nas micropeneiras. Cada peneira foi considerada um experimento independente e para as análises de comparação entre os resultados por peneira, foram consideradas fatores. Além destes parâmetros também se analisou cor aparente e pH para a água bruta, mas estas variáveis não entraram no delineamento fatorial.

O experimento foi planejado como fatorial 2^2 , dois fatores e dois níveis, e com 3 repetições, também um ponto central com 3 repetições, isto dá um total de 15 amostras pra cada peneira e 45 amostras no total. O software utilizado foi o Minitab®.

O valor mínimo de vazão foi 300 L.h^{-1} (posição -1) e o máximo 1000 L.h^{-1} (posição 1), o ponto central ficou em 650 L.h^{-1} (posição 0). Controlou-se esta variável independente com a abertura e fechamento do registro gaveta antes de iniciar o tratamento. Entretanto a vazão tendia a zero assim que se iniciava o tratamento, visto que a perda de carga aumentava conforme evoluía a colmatação das peneiras e a carga hidráulica aplicada era constante pois seu controle estava no reservatório de nível. Por este motivo se realizou as amostras logo nos primeiros 5 minutos de cada teste.

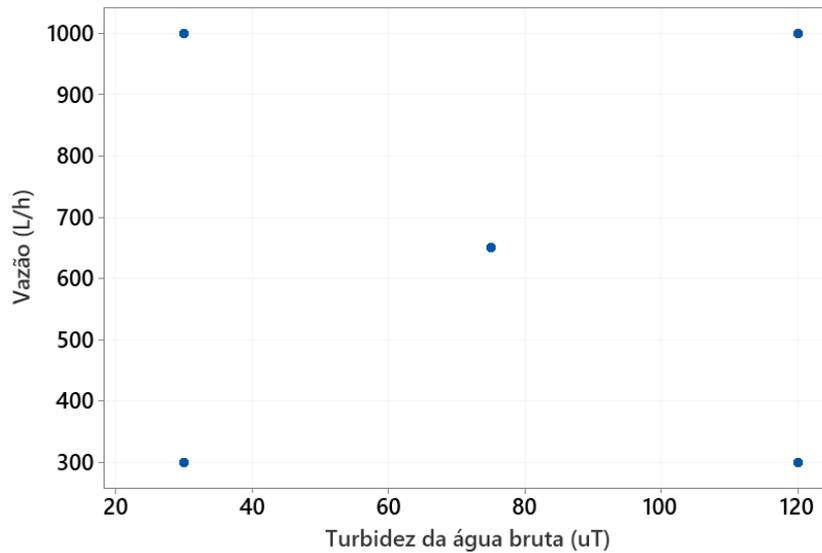
Para turbidez da água bruta o valor mínimo foi de 30 uT (posição -1) e máximo de 125 uT (posição 1), a posição central ficou em 75 uT (posição 0), conforme apresentado na Tabela 8 e graficamente na Figura 29 . Como a água utilizada foi a de um curso hídrico, o controle da variável turbidez foi limitado, resumido em realizar ou não a amostragem.

Tabela 8 - Níveis das variáveis independentes do delineamento fatorial de cada peneira.

Variável independente	Variáveis	Níveis		
		-1	0	1
Vazão (L.h^{-1})	q_1	300	650	1000
Turbidez água bruta (uT)	q_2	30	75	120

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 29 – Delineamento fatorial, distribuição gráfica do plano de amostragem de vazão água bruta vs turbidez.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 9 – Delineamento experimental fatorial.

Nº da amostra	<i>q1</i>	<i>q2</i>	Vazão (L/h)	Turbidez água bruta (uT)
1	-1	-1	300	30
2	-1	-1	300	30
3	-1	-1	300	30
4	-1	1	300	120
5	-1	1	300	120
6	-1	1	300	120
7	0	0	650	75
8	0	0	650	75
9	0	0	650	75
10	1	-1	1000	30
11	1	-1	1000	30
12	1	-1	1000	30
13	1	1	1000	120
14	1	1	1000	120
15	1	1	1000	120

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Neste processo se constatou que quando não se tem o controle total da variável independente, deve-se considerar o risco de não conseguir executar o delineamento experimental conforme definido no início do experimento e assumir que as amostras podem ficar afastadas dos valores definidos.

3.2.8 Análise dos resultados

Os resultados obtidos no planejamento experimental foram analisados estatisticamente, sendo que esta análise compreende a análise descritiva e resumo estatístico dos dados, teste confirmatório (ANOVA) para estimar os parâmetros estatísticos e avaliar a

predição ou não do modelo matemático empírico e análise de regressão linear. Para obtenção dessas respostas utilizou-se o software Minitab[®].

Na análise de variância do delineamento fatorial tanto vazão quanto turbidez da água bruta foram consideradas fatores. Desta forma se considerou apenas a variação dos dois níveis definidos no delineamento para cada fator, independente do desvio da vazão ou turbidez da água bruta de cada amostra em relação ao valor estabelecido no plano amostral.

Para analisar as 3 peneiras em conjunto se considerou o valor de turbidez de água bruta como variável contínua e não mais como fator.

Este critério também foi utilizado para realizar a análise de regressão linear.

4 RESULTADOS

4.1 TECNOLOGIAS DE PRÉ-TRATAMENTOS DE ÁGUA SUPERFICIAL PARA REMOÇÃO DE TURBIDEZ

Conforme revisão bibliográfica sobre as tecnologias existentes, pode-se perceber que os dados sobre grades finas, peneiras e micropeneiras são encontrados em catálogos de empresas fornecedoras destes equipamentos, todas as tecnologias pesquisadas possuíam dispositivos de limpeza automático, algo importante para uma boa operação destes equipamentos. As vantagens das peneiras estudadas é que podem ser usadas para a remoção de turbidez e para gradeamento de sólidos grosseiros em um só equipamento, têm limpeza automatizada e podem tratar grandes vazões, as maiores dentre as tecnologias estudadas. Não se encontrou dados de eficiência de remoção de turbidez, mas é algo plausível, visto que a abertura de passagem de sólidos é capaz de reter uma parte pequena de tipos de partículas que causam turbidez, as estudadas (com exceção da micropeneira), por exemplo, retém apenas partículas do tamanho de areia, partículas menores passam, neste caso a eficiência de turbidez depende muito do tamanho das partículas que compõe esta turbidez, e isto se considerou uma desvantagem. Outra desvantagem é que a vazão de captação depende da adequada limpeza das peneiras, visto que conforme a tela retém partículas, diminui a área útil, aumenta a perda de carga e conseqüentemente diminui a vazão tratada. Além disso a instalação dos equipamentos demanda intervenção na calha do rio, dentre as peneiras, a vantagem da micropeneira é demandar intervenção de pequeno impacto na calha do rio.

A filtração na calha do rio tem como vantagem promover uma autolimpeza da superfície do filtro. Este é construído na calha do rio, esta intervenção, além dos aspectos ambientais, traz complicações durante a execução da obra, como a previsão de ensecadeiras e desvio total ou parcial do fluxo do rio. Não se encontrou muitas informações sobre a técnica e seu uso, pois durante esta pesquisa a tecnologia estava em processo de patente.

O filtro em manta apresentou uma eficiência significativa nos testes realizados por Tavares (2008), a técnica foi desenvolvida pelo autor e como vantagens os materiais e tecnologia envolvida são relativamente simples, é passível de ser reproduzida por uma pessoa com habilidade técnica de serviços de encanador, tendo um manual de construção. Outra vantagem é que seu tamanho e leiaute permitem que seja instalado dentro do rio, evitando alterações no ambiente natural. Como desvantagem está a limpeza das mantas, pois o filtro precisa ser desinstalado para a realização e essa limpeza é manual.

A técnica de sedimentação, assim como a filtração na calha, também demanda intervenção no leito do rio, neste caso um barramento, entretanto, a depender da metodologia

construtiva não é necessário o desvio do rio ou execução de ensecadeiras. Como desvantagem, o aumento da vazão na calha do rio muda os parâmetros hidráulicos de seu funcionamento e reduz sua eficiência, por estar relacionada com a ocorrência de chuvas é justamente nestes momentos que a redução da turbidez se faz mais necessária. Como desvantagem a dificuldade da remoção do material sedimentado no fundo a montante do barramento e a limitação da navegação no curso hídrico. A vantagem é que seu funcionamento é simples, sem muita tecnologia envolvida e não há necessidade de limpeza em períodos curtos de tempo, pode demorar anos para se mostrar necessária.

Os hidrociclones, conforme estudo de Tavares (2004), podem aumentar a turbidez da água, a depender das partículas que estão presentes nela, por conta do vórtex que forma que promove o atrito de pedaços de solo e torrões maiores de argila ou silte se transformam em partículas menores que aumentam a turbidez, para a água de abastecimento isto é uma desvantagem. A vantagem é a facilidade da limpeza, que é feita através de purga intermitente ou contínua. Se não houver a limpeza, o máximo que ocorre é deixar de ter eficiência de remoção de sólidos, mas não impossibilita o funcionamento, como ocorre com as peneiras, microfiltração, filtro manta e filtração na calha do rio.

Na Tabela 10 um resumo das tecnologias pesquisadas.

Tabela 10 – Resumo de características das técnicas e tecnologias de pré-tratamento.

Descrição	Referência	Abertura passagem de sólidos (mm)	Área máxima (m²)	Taxa (m³/h.m²)	Remoção de turbidez
Grade fina de banda (band screens)	Ovivo (2010)	0,5 a 10	80	248	n.e.
Grade fina de tambor (drum screen)	Ovivo (2016)	0,11 a 6	188,5	668	n.e.
Grade fina multidisc	Bilfinger Water Technologies (2014)	0,2 a 10	87,5	571	n.e.
Grade estática submersa	Prominas (2018)	1 a 4,5	4,4	3,6	n.e.
Micropeneira	AMIAD (2020)	0,025 a 0,050	0,3	500	13,33%
Filtro em manta	Tavares (2008)	0,027 a 0,1	0,28	0,125	77-82%
Filtração na calha do rio	Andreoli et al. (2013)	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
Sedimentação	Sammarraee et al. (2009)	n.a.	60	1,176	n.e.

Descrição	Referência	Abertura passagem de sólidos (mm)	Área máxima (m ²)	Taxa (m ³ /h.m ²)	Remoção de turbidez
Hidro ciclone	Tavares (2004)	n.a.	n.e.	n.e.	-44,9 a -6%

n.e.: não especificado.

n.a.: não aplicável.

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

4.2 MICROPENEIRA SANFONADA E EXPERIMENTO PILOTO

Considerou-se que seriam 9 pregas na malha de aço inox, com faces de 3,3 cm, totalizando uma largura de 59,4 cm para cada micropeneira. A dimensão do dispositivo de micropeneiramento junto com sua estrutura ficou a seguinte: 11,5 cm de altura, 7,5 cm de largura e o comprimento conforme a Tabela 11 para cada micropeneira. Na tabela as taxas de abertura adotadas para o dimensionamento.

Tabela 11 – Dimensionamento comprimento das micropeneiras, para vazão de 20 L.min⁻¹ e taxa de abertura maior que 3 cm².L⁻¹.min quando a peneira estiver 50% obstruída.

Malha	Mash	L (cm)	Área da peneira (cm ²)	Área útil peneira limpa (cm ²)	Taxa de abertura - peneira limpa (cm ² .L ⁻¹ .min)	Taxa de abertura -peneira 50% (cm ² .L ⁻¹ .min)
1	200	12,26	728,24	269,45	13,47	6,74
2	150	10,80	641,52	269,44	13,47	6,74
3	80	15,07	895,16	269,44	13,47	6,74

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A velocidade de passagem de água nas micropeneiras, mesmo quando 50% obstruídas, ficaram abaixo do máximo sugerido pela NBR 12.213/1992 (Tabela 12).

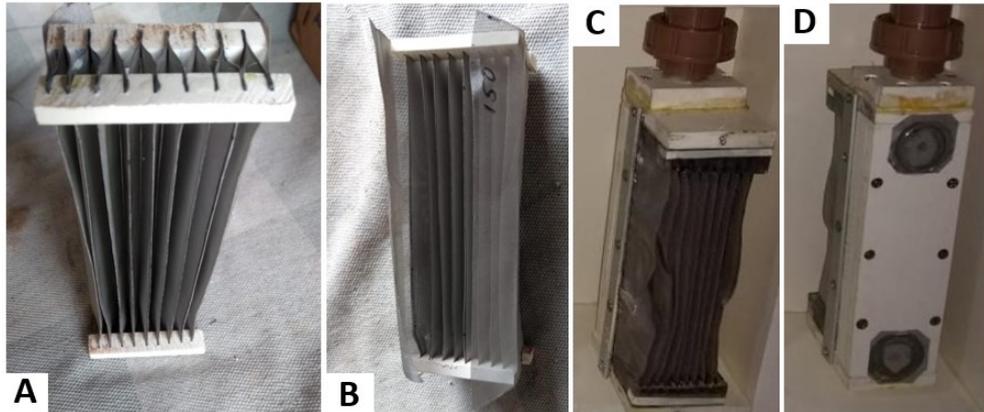
Tabela 12 – Perda de carga calculadas nas micropeneiras para vazão de 20 L.min⁻¹.

Malha	ε	k	V peneira limpa (m/s)	V peneira 50% obstruída (m/s)	h peneira limpa (m)	h peneira 50% obstruída (m)
80	0,3007	5,532	0,01238	0,02476	0,00004323	0,00017291
150	0,4160	2,628	0,01100	0,02201	0,00001622	0,00006488
200	0,3676	3,520	0,00251	0,00502	0,00000113	0,00000452

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As fotos de uma das micropeneiras já confeccionada estão na Figura 30, nelas pode-se observar o zigue-zague das faces de peneiramento em malha aço inox 304 mash 150 e a estrutura do módulo feita em PVC expandido.

Figura 30 – Estrutura da micropeneira sanfonada de pré-tratamento. A: Vista inferior e externa da micropeneira, sem fechamento da estrutura. B: Vista superior e interna da micropeneira, sem fechamento da estrutura. C: Vista inferior e externa da micropeneira, com fechamento da estrutura. D: Vista superior e externa da peneira, com fechamento da estrutura.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O experimento piloto foi instalado na Estação de Tratamento de Água da Tubarão Saneamento S.A. em 27/03/2019. Realizou-se o nivelamento do experimento no terreno apoiado em base de madeira maciça (ver Figura 31). Conectou-se a derivação da adutora no experimento e este na linha de recalque que conecta o piloto até a entrada da ETA. Como medida de proteção também se instalou uma barra de cobre conectada ao fio terra do experimento para evitar descargas elétricas no sistema piloto. Testou-se toda a parte elétrica e acionamentos e foram realizados os devidos ajustes para a realização dos testes iniciais.

Figura 31 – Sistema piloto instalado.

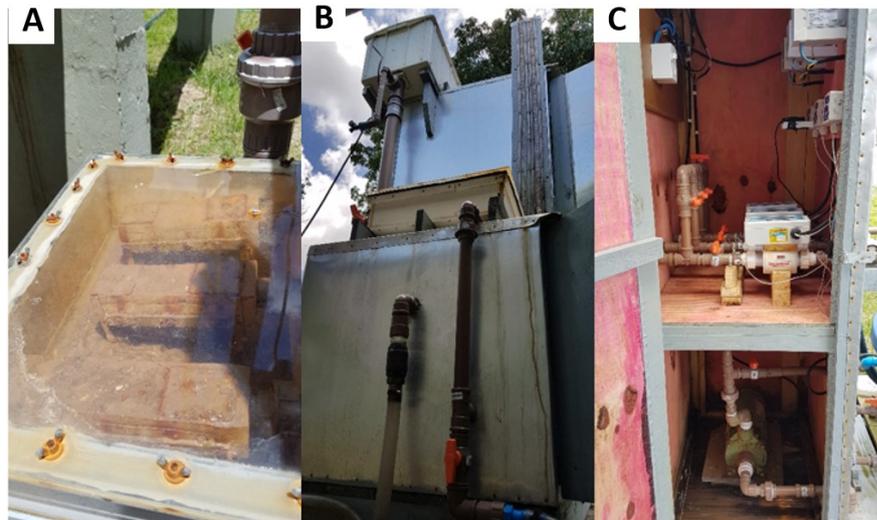


Fonte: Registro realizado pela autora, 2021.

Na Figura 32 B aparece no canto superior esquerdo o reservatório de nível e a tubulação interligando-o na caixa estanque, logo abaixo da saída do reservatório uma derivação na tubulação para o ponto de coleta de água bruta. No canto superior direito é possível ver os quatro piezômetros feitos em tubulação cristal de acrílico junto das fitas métricas para auxiliar na leitura do nível da água. Logo abaixo da caixa estanque está a tubulação dreno, que tanto pode seguir para a sucção do conjunto motobomba 1 e ser recalcado para a ETA quanto pode seguir para a drenagem, a segunda opção acontece quando se realiza a retrolagem das peneiras.

Na Figura 32 C, parte superior, o compartimento com os medidores de vazão nas três tubulações horizontais de água pré-tratada, a derivação que entra na vertical das 3 linhas é a água de retrolavagem, as manobras são realizadas com os registros esfera em alaranjado.

Figura 32 – A: Caixa estanque de peneiras. B: Vista lateral do Sistema Piloto. C: Vista interna do compartimento fechado.



Fonte: Registro realizado pela autora, 2021.

4.3 ANÁLISE DA ÁGUA BRUTA DO RIO TUBARÃO

4.3.1 Análise do histórico

Antes do início dos testes do experimento se analisou a série histórica da água bruta do rio Tubarão captada pela Tubarão Saneamento S.A na entrada da ETA, durante o período de 04/2018 a 02/2019 com intervalo de leitura de turbidez de 2 horas durante as 24 horas de cada dia. Os dados foram compilados e estão na Tabela 13.

Conforme levantamentos topográficos da concessionária o nível de água no rio na altura da captação em época de estiagem fica próximo da cota 0,5 m. Conforme dados da estação fluviométrica nº 84580500, operada pela EPAGRI/SC, a variação do nível do rio dentro da série histórica entre 01/03/1986 e 01/03/2020 foi de 14,75 m e é influenciada pelo regime

pluviométrico da bacia. Conforme observações da equipe de operação da Estação de Tratamento de Água de Tubarão, este regime também influencia o nível de turbidez da água bruta captada.

Conforme dados da Tabela 13 metade das observações tiveram turbidez abaixo de 23,8 uT, a média se deslocou da mediana, foi de 54,3 uT, isto pode ter ocorrido pela grande diferença de amplitude entre o valor mínimo e o terceiro quartil ($\Delta = 50,4$ uT) e o terceiro quartil até o valor máximo ($\Delta = 2548,5$ uT). Isto evidencia uma assimetria na distribuição de frequências com valor positivo, cauda direita maior que a esquerda.

Tabela 13 – Análise de água bruta do rio Tubarão (04/2018 a 02/2019).

Parâmetro estatístico	Turbidez (uT)
Máximo	2600,0
Mínimo	1,1
Média	54,3
1º quartil (25%)	11,3
2º quartil (mediana 50%)	23,8
3º quartil (75%)	51,5
80% de permanência	$\leq 65,8$
90% de permanência	$\leq 109,0$
95% de permanência	$\leq 186,0$
98% de permanência	$\leq 323,0$
99% de permanência	$\leq 503,0$

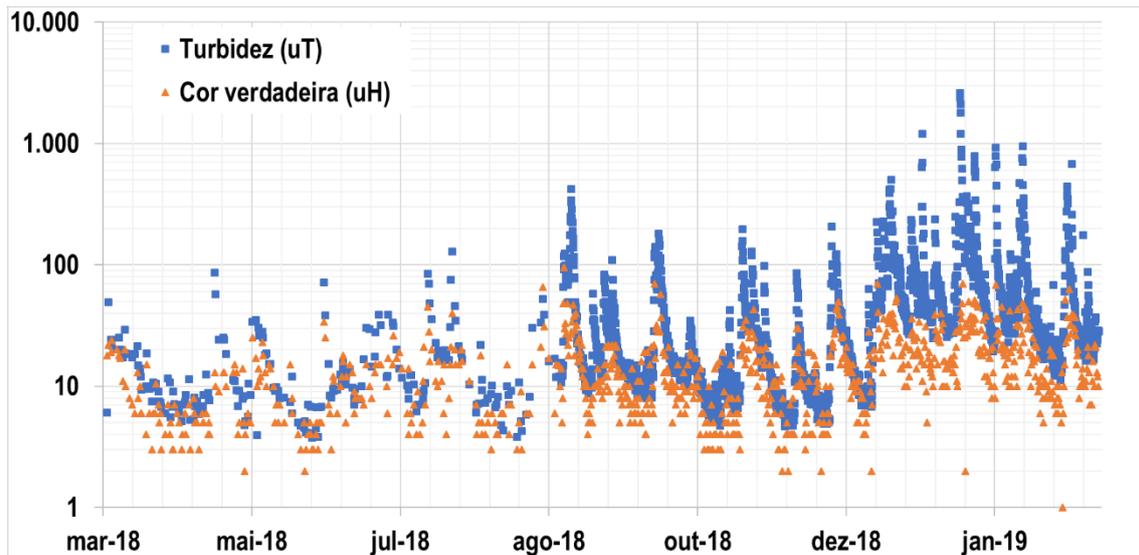
Fonte: Tubarão Saneamento (2019), elaborado pela autora.

A turbidez no verão tende a ser mais elevada que em outras épocas do ano, e a observação da equipe de operação é que ela aumenta com as chuvas intensas no alto da serra, já as precipitações dentro da região central do município não afetam significativamente estes valores na captação, visto que esta parte da cidade está a jusante da captação. Neste sentido, todas as análises durante este período com valores acima de 500 uT ocorreram entre os meses de dezembro/18 e fevereiro/19, neste período o parâmetro cor verdadeira teve a maior ocorrência de observações acima de 10 uH, como pode ser visto no gráfico da Figura 33.

Realizou-se um teste de correlação entre a cor verdadeira e turbidez, que mostrou não haver correlação entre estas variáveis (coeficiente $R = 0,42$).

Conforme dados da Tabela 13 e Tabela 14 a filtração lenta não é uma opção de tratamento adequada para tratar os níveis de turbidez da água bruta do rio Tubarão, no ponto da captação do município de Tubarão. Pois esteve com turbidez abaixo de 10 uT em menos de 25% do tempo em 2018 e em menos de 50 % do tempo em 2019. Também não se adequa à filtração direta descendente/ascendente e à dupla filtração. O tratamento mais adequado é o convencional.

Figura 33 – Turbidez e cor verdadeira da água do rio Tubarão captada pela Tubarão Saneamento S.A. (período entre 04/2018 a 02/2019).



Fonte: Tubarão Saneamento (2020), elaborado pela autora.

Após o período de amostragem do experimento também se analisou o histórico acumulado da qualidade da água, entre 04/2019 e 03/2020. O período de testes coincidiu com um período de estiagem na região sul do Brasil e que também impactou a bacia do rio Tubarão (2019-2020). Como a elevação de turbidez da água superficial da bacia tem forte relação com as chuvas na serra, e estes eventos tiveram uma frequência menor devido à estiagem, as oportunidades de testar o experimento nas faixas de turbidez mais altas foram mais escassas se comparadas à um ano com volume de precipitações próximos e/ou acima da média

Tabela 14 – Análise de água bruta do rio Tubarão (04/2019 a 03/2020).

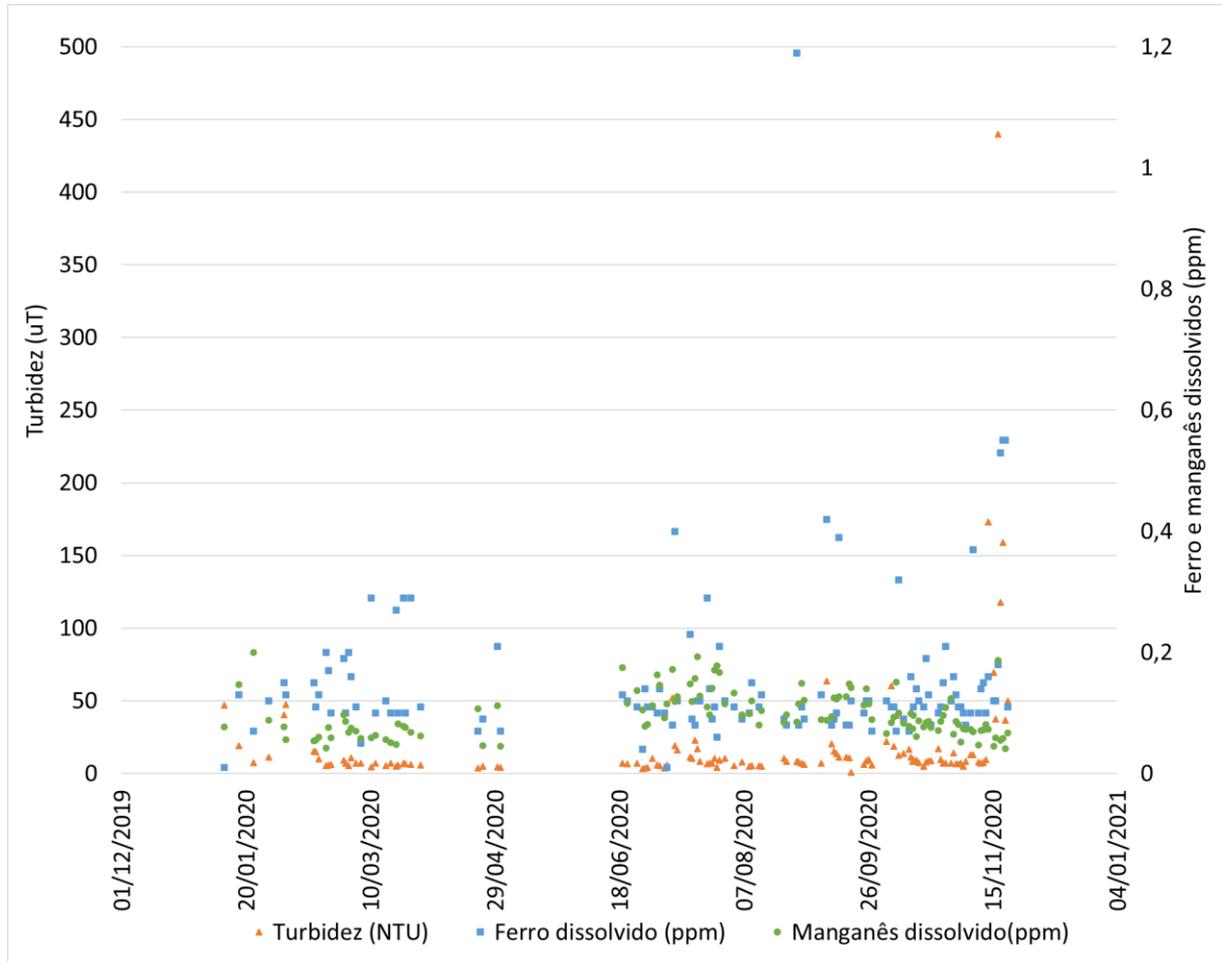
Parâmetro estatístico	Turbidez (uT)
Máximo	683,0
Mínimo	0,6
Média	24,4
1º quartil (25%)	6,7
2º quartil (mediana 50%)	10,2
3º quartil (75%)	21,4
80% de permanência	≤ 27,9
90% de permanência	≤ 53,1
95% de permanência	≤ 85,6
98% de permanência	≤ 159,4
99% de permanência	≤ 233,4

Fonte: Tubarão Saneamento (2020), elaborado pela autora.

Analisou-se também amostragens realizadas pela concessionária entre janeiro e novembro de 2020 na captação do rio Tubarão, antes água bruta passar pela pré-oxidação. Os parâmetros analisados foram turbidez, manganês e ferro, para verificar se há correlação entre

estas variáveis. O gráfico da Figura 34 mostra o comportamento das amostras quanto às três variáveis ao longo do período, no total foram 124 amostras.

Figura 34 – Gráfico da turbidez, ferro e manganês dissolvidos no rio Tubarão.



Fonte: Tubarão Saneamento (2020), elaborado pela autora.

O teste de correlação de Pearson entre turbidez e ferro dissolvido resultou no coeficiente de 0,17 e entre turbidez e manganês dissolvido de 0,10. Concluiu-se que a turbidez da água do rio Tubarão também não tem correlação com ferro e manganês dissolvidos.

Estes resultados também mostram que há evidências de que os impactos na qualidade da água do rio Tubarão pela atividade de mineração na bacia hidrográfica já não são significativos na região do baixo Tubarão, apesar de algumas amostras apresentarem valores acima do máximo estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para rios Classe 2, elas ficaram bastante abaixo das concentrações encontradas nas amostras realizadas pela ACP do Carvão. Mostra que as medidas tomadas a partir da década de 70, como a criação e aperfeiçoamento de legislações ambientais e os instrumentos legais para a recuperação das áreas

impactadas, mitigação e compensação de novos impactos e uma nova conduta tomada pelo setor mostram efeitos positivos na água da região baixa do rio Tubarão.

4.3.2 Análise granulométrica

O resultado da análise granulométrica da água bruta com turbidez de 36 uT e cor aparente de 18 uH mostrou que 22,22 % do volume de partículas presentes na água têm tamanho de partículas de areia (62,5 – 353,6 μm), 0,19% têm tamanho de partículas de argila e 77,59 % têm tamanho de partículas de silte (3,9 – 62,5 μm), sendo que mais de 50% são partículas com tamanho condizente à silte médio e fino (7,8 – 31,3 μm).

Conforme esta análise (Figura 35), apenas 3,48% do volume de partículas presentes nesta amostra seria retido na micropeneira 3 (mash 80), entre 12 e 15% na micropeneira 2 (mash 150) e 18,72% na micropeneira 1 (mash 200). Lembrando que esta análise conta o volume de partículas e estes percentuais não necessariamente são proporcionais ao percentual de turbidez retida.

Os resultados mostram que para esta turbidez é baixo o volume de partículas do tamanho de grãos de argila em comparação com os demais tipos de partículas.

Figura 35 – Análise granulométrica da água bruta do rio Tubarão com turbidez de 34 uT.

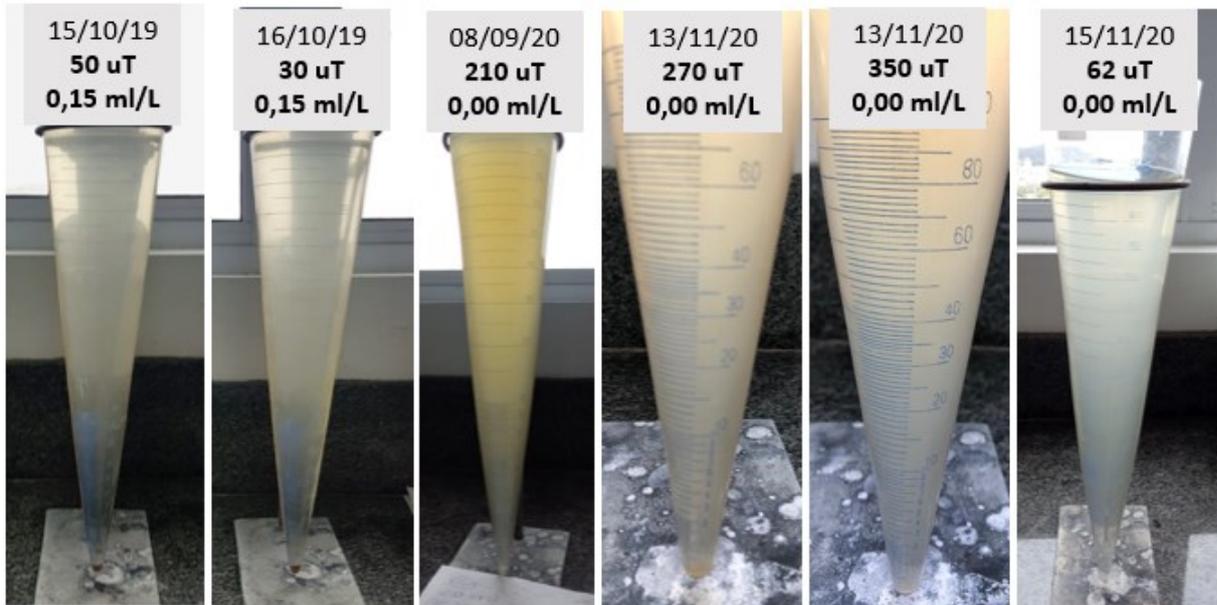
Tipo de partícula	Diâmetro (μm)	Percentual de volume (%)	Percentual de volume acumulado (%)
Areia média	250,00< \varnothing <420,45	0,60	100,00
Areia fina	125,00< \varnothing <250,00	8,26	99,39
Areia muito fina	62,50< \varnothing <125,00	13,35	91,13
Silte grosseiro	31,25< \varnothing <62,50	13,82	77,78
Silte médio	15,63< \varnothing <31,25	23,92	63,96
Silte fino	7,81< \varnothing <15,63	32,27	40,04
Silte muito fino	3,91< \varnothing <7,81	7,58	7,77
Argila	0,98< \varnothing <3,91	0,19	0,19

Fonte: Horiba LA-950 (2019), adaptado pela autora (2021).

4.3.3 Análise de sólidos sedimentáveis

Realizaram-se seis análises de sólidos sedimentáveis com a água bruta do experimento, conforme apresentado na Figura 36, os resultados de sólidos sedimentáveis das duas primeiras, turbidez de 50 e 30 uT foram de 0,15 mL/L e das demais foi zero mL/L. Conforme análise destas seis amostras o aumento da turbidez não aumenta a quantidade de sólidos sedimentáveis na água bruta de entrada da ETA e do experimento.

Figura 36 – Análises de sólidos sedimentáveis da água bruta do rio Tubarão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O aumento da turbidez na água bruta do rio Tubarão está associado aos eventos de chuva a montante do ponto de captação, como mostra a Figura 38 e a Figura 39, após eventos de chuva na bacia com precipitação acumulada diária de 20 mm, a turbidez na água captada do rio Tubarão chegou próximo a 60 uT (15 a 16/10/19) e quando a precipitação acumulou, no dia 07/09/20, em torno de 50-60 mm a turbidez chegou a quase 250 uT no dia seguinte. Não é possível precisar com os dados de chuva coletados (por serem valores acumulados diários), mas existe uma diferença de tempo entre a ocorrência da chuva a montante e o aumento da turbidez na captação, que deve ser compatível com o tempo de concentração da bacia conforme o ponto de ocorrência da precipitação, podendo ocorrer no rio Braço do Norte, rio Pequeno/Espraiado, rio Laranjeiras, rio Oratório, rio do Rastro, rio Rocinha, rio Bonito, entre outros menores. A região mais alta da bacia apresenta suscetibilidade de erosão do terreno, de moderada a muito alta, sendo que na maior parte desta região a suscetibilidade é alta. Há presença de argissolo, solo com acumulação de argila, e outros tipos que conotam solos em processo de intemperização, com exceção dos latossolos que cobrem a região com moderada suscetibilidade de erosão. Neste caso, esta combinação de fatores e evidências levam a concluir que as chuvas na parte média e alta da bacia têm uma probabilidade alta de carregar consigo partículas destes solos para dentro dos rios. As partículas mais finas são as que têm maior dificuldade de

sedimentação e conseqüentemente se mantêm suspensas no meio aquoso e chegam até a planície litorânea do rio Tubarão, onde fica a captação de água da concessionária.

Conforme abertura dos dispositivos de pré-tratamento desenvolvidos neste trabalho: micropeneira 1 77 μm (mash 200); micropeneira 2 109 μm (mash 150) e micropeneira 3 177 μm (mash 80), calculou-se conforme equação da Lei de Stokes o tempo de sedimentação para tais tamanhos de partículas em um cone Imhoff, altura útil de 38,5 cm. Resultou em 58 s para o menor diâmetro de partícula retido na micropeneira 1, 29 s para a micropeneira 2 e 11 s para a 3.

Neste caso as micropeneiras conseguem reter partículas com estes tempos de sedimentação ou menores. Este é um teste simples de se fazer com a água bruta de qualquer outro lugar para identificar se este é um tipo de pré-tratamento adequado às características de sólidos presentes em um manancial de captação e assim dar base técnica para a tomada de decisão da escolha da técnica.

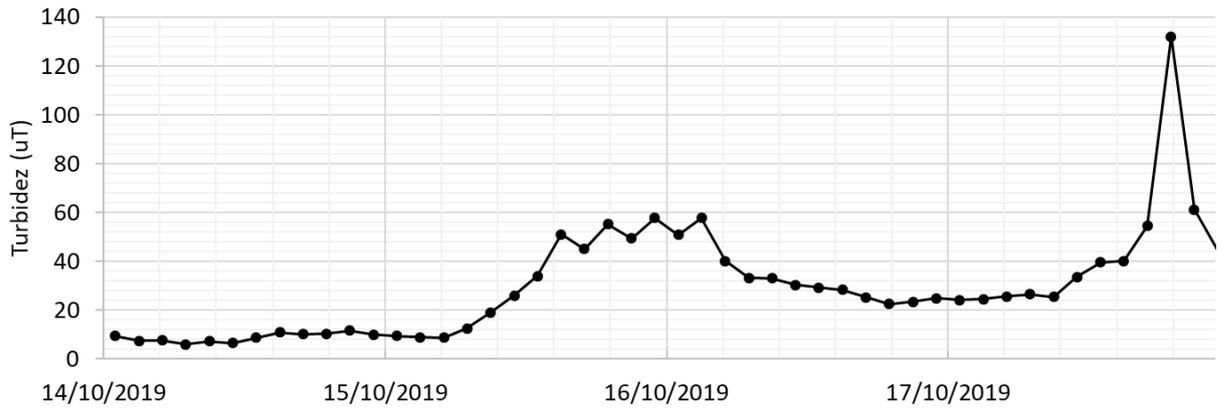
Na análise de sólidos sedimentáveis em cone Imhoff, que dura um período de 1 hora, as partículas que sedimentam são maiores ou iguais a 10 μm (0,01 mm), significa que são silte médio e areia e o que fica suspenso no meio são silte fino, argilas e colóides, partículas que não seriam retidas nas micropeneiras.

4.3.4 Análise da precipitação na bacia vs turbidez na água do rio Tubarão

Analisou-se os dados de estações pluviométricas na região da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão, mais especificamente aquelas que estão a montante do ponto de captação da água bruta utilizada neste estudo.

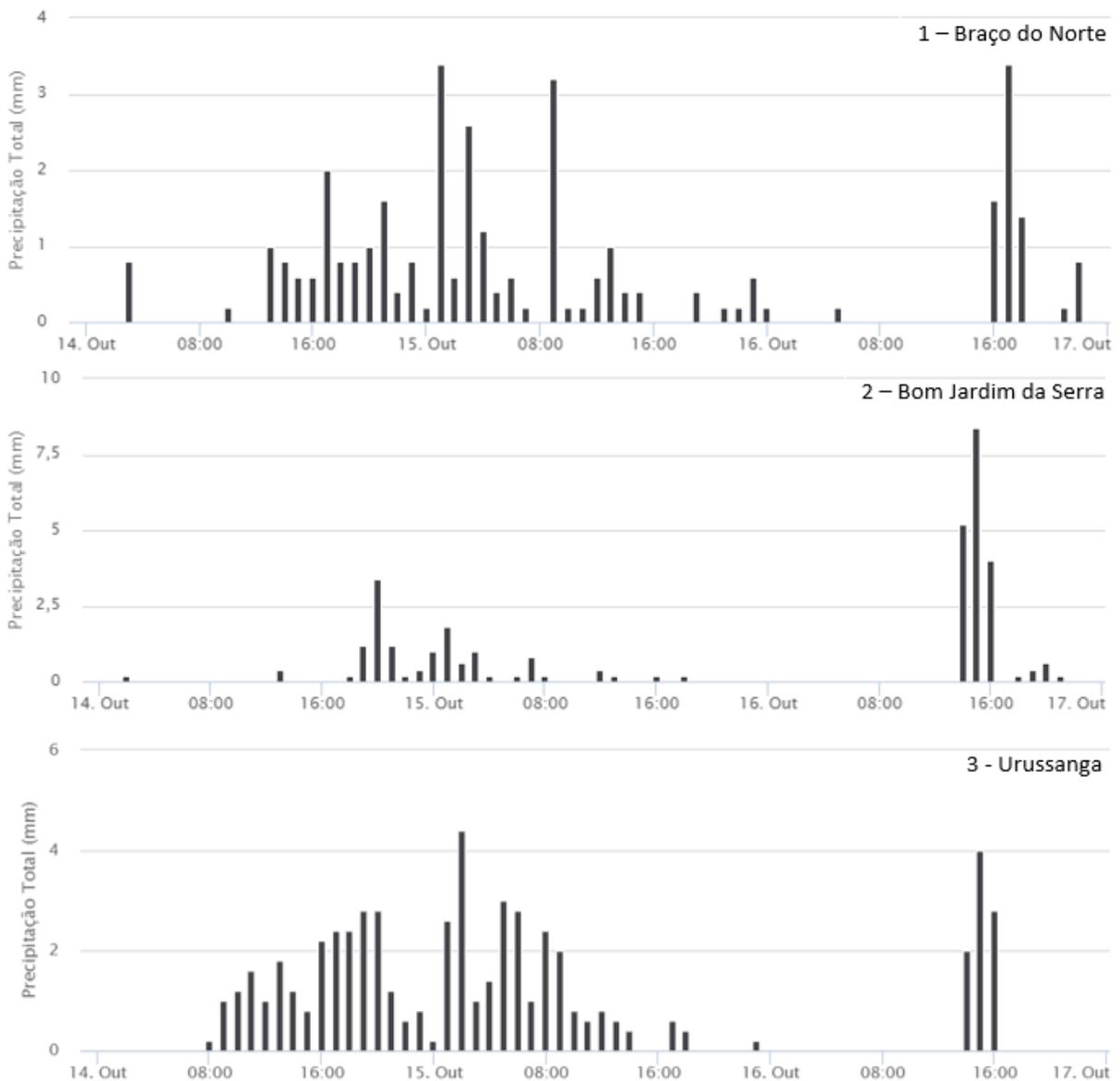
Os dados analisados foram dos períodos entre os dias 14 e 17 de outubro de 2019 e entre os dias 06 e 10 de setembro de 2020.

Figura 38 – Turbidez da água captada no rio Tubarão (14 a 17/10/2019).



Fonte: Tubarão Saneamento S.A., elaborado pela autora (2021).

Figura 39 – Precipitação total nas estações pluviométricas na região da Bacia do Rio Tubarão (14 a 16/10/2019).



Fonte: Agroconnect Epagri/CIRAM, elaborado pela autora (2021).

Ao se comparar o tempo entre a precipitação e o aumento da turbidez com o tempo de sedimentação dos tipos de partículas do cone Imhoff, guardadas as devidas proporções entre a lâmina da vidraria e a da calha dos rios da bacia do rio Tubarão, leva a concluir que partículas de areia e grandes partículas de silte sedimentam na calha do rio antes de chegar na captação do município de Tubarão. Neste caso é coerente as análises de sólidos sedimentáveis e, se considerar apenas tamanho de partícula e não a característica coesiva destas, as partículas presentes na água não têm tamanho suficiente para serem retidas nas micropeneiras.

Analisou-se as chuvas e turbidez do rio no período de 12 a 16 de novembro de 2020, a grande diferença para o período analisado anteriormente, de 2019, foi a intensidade das chuvas, na estação Braço do Norte 3,4 mm/h contra 27 mm/h, na estação Bom Jardim da Serra 8,4 mm/h contra 16,2 mm/h e em Urussanga a maior diferença de 4,4 mm/h para 51,2 mm/h, e a turbidez apresentou um aumento de quase 4 vezes, de 132 uT de pico para 405 uT (ver Figura 40 e Figura 41).

Outra diferença foi o tempo entre a ocorrência da chuva e do aumento da turbidez, que foi menor, em torno de 12 horas. É possível que a chuva tenha acontecido em outros pontos da bacia com tempo de concentração menor que do exemplo anterior. Conforme análises de sólidos sedimentáveis, não há areia da água bruta. Quanto ao silte pode haver uma quantidade suspensa no meio, as partículas que compõe a turbidez devem ser menores, partículas mais finas de silte, argila entre outros tipos de partículas com diâmetro aproximado menor que 10 μm .

4.4 RESULTADOS DOS TESTES INICIAIS

4.4.1 Eficiência de remoção de turbidez

Durante o período dos testes iniciais a turbidez da água bruta variou de 10 a 38 uT, o primeiro teste das três peneiras foi com turbidez de 10 uT e vazão de 200 L.h⁻¹ e iniciaram juntas. A micropeneira 3 (mash 80) não chegou a colmatar durante os 4 dias de testes. As peneiras 1 (mash 200) e 2 (mesh 150) colmataram 5 vezes para o mesmo período. Neste trabalho se considerou que as micropeneiras estavam completamente colmatadas quando a perda de carga passou de 114 cm e/ou quando a vazão peneirada se aproximou de 40 L.h⁻¹, assim quando se classificar a peneira como colmatada entende-se que ela estava nestas condições. A análise do tempo de colmatação está apresentada no item 4.5.

O experimento foi testado, como pode ser observado na Tabela 15. Estes resultados auxiliaram na tomada de decisão para definir as faixas de vazão e turbidez do delineamento experimental das peneiras.

Com a micropeneira 1 (mash 200) se realizou análise da água também quando a peneira já estava colmatada, neste momento foram observadas as maiores eficiências de remoção de turbidez e cor aparente chegaram a 60% e 50%, respectivamente. Entretanto a vazão produzida foi de apenas 5 L.h⁻¹ com perda de carga de 1,14 m, apesar de apresentar uma eficiência significativa estas amostras não foram consideradas na análise pois esta não foi a condição de operação que se objetivou testar o experimento.

A média de eficiência das peneiras para a remoção de turbidez foi de 13,2 %, sem considerar a eficiência quando o dispositivo estava colmatado. As médias separadas ficaram bastante próximas: micropeneira 1 (mash 200) 13,3%; micropeneira 2 (mesh 150) 13,1 % e micropeneira 3 (mash 80) 13,5%.

Realizou-se teste ANOVA no RStudio, e a única variável que mostrou associação na variação da média de remoção de turbidez estatisticamente significativa foi o tempo de funcionamento da peneira, com valor de $p=0,04$, entretanto o tempo de funcionamento também apresentou certa associação na redução de vazão produzida, por isto para que o tempo de colmatação não influencie nos resultados, optou-se por realizar as análises da água do delineamento experimental sempre nos primeiros 5 minutos de funcionamento da peneira, neste caso quando tempo igual a zero a peneira estava limpa.

Tabela 15 – Testes iniciais.

Micropeneira	Vazão (L/h)	Tempo de teste	Perda carga (cm)	pH	Turbidez Água bruta (uT)	Turbidez água pré-tratada (uT)	Eficiência turbidez	Cor aparente água bruta (uH)	Cor aparente água pré-tratada (uH)	Eficiência Cor aparente	Obs
1 (#200)	188	3:10	9,1	6,77	14,1	12,1	14,2%	117	115	1,7%	
	11	10:05	114,0	6,91	14,6	12,2	16,4%	107	96	10,3%	colmatada
	6	12:35	112,4	6,83	16,4	7,0	57,3%	117	58	50,4%	colmatada
	190	10:05	21,6	6,83	10,1	9,1	9,4%				
	5	23:35	114,0	6,76	24,5	9,7	60,4%	194	103	46,9%	colmatada
2 (#150)	1155	1:10	7,0	6,87	12,2	9,2	24,8%	119	93	21,8%	
	80	3:05	46,3	7,01	11,5	10,6	7,8%	100	106	-6,0%	
	119	5:50	114,2	7,2	10,7	10,1	5,6%	90	89	1,1%	colmatada
	238	3:30	11,2	6,77	14,1	12,8	9,2%	117	114	2,6%	
	250	10:25	17,0	6,91	14,6	13,2	9,6%	107	109	-1,9%	
	252	24:20	114,8	6,95	13,3	12,2	8,3%	115	104	9,6%	colmatada
	234	35:00	118,1	6,96	14,6	9,8	32,9%	126	94	25,4%	colmatada
	230	48:15	30,6	6,83	16,4	12,9	21,3%	117	97	17,1%	
	56	10:00	109,6	6,83	10,1	8,3	17,8%				
	27	23:30	116,0	6,76	24,5	16,0	34,7%	194	163	16,0%	colmatada
201	4:40	74,0	6,80	38,3	35,9	6,3%	324	317	2,2%		
3 (#80)	224	3:30	0,5	6,77	14,1	12,7	9,9%	117	109	6,8%	
	223	10:20	4,0	6,91	14,6	13,5	7,5%	107	109	-1,9%	
	212	24:15	0,7	6,95	13,3	12,2	8,3%	115	112	2,6%	
	223	35:00	10,5	6,90	14,6	12,1	17,1%	126	115	8,7%	
	214	47:45	9,7	6,83	16,4	12,4	24,4%	117	93	20,5%	
	214	58:10	6,8	6,83	10,1	8,7	14,1%				
	195	71:35	27,5	6,76	24,5	20,0	18,4%	194	182	6,2%	
	182	76:25	38,6	6,80	38,3	36,5	4,7%	324	307	5,2%	
193	77:15	36,0	6,82	36,7	30,4	17,2%	243	229	5,8%		

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Também se realizou o teste ANOVA para verificar se houve médias de eficiência de remoção de turbidez significativamente diferentes entre os tipos de tratamento (ver Tabela 16), para isto se excluiu as análises de água de quando a peneira estava colmatada, visto que a micropeneira 3 não chegou à este estágio e isto poderia induzir uma eficiência maior para as demais peneiras. O resultado foi que não houve diferença estatística na média de eficiência por tipo de tratamento.

Tabela 16 – ANOVA pré-teste da eficiência de remoção de turbidez por micropeneiras.

Variável	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Média quadrada	Valor F	Pr (> t)
Peneira	2	0,00004	0,000019	0,004	0,996
Resíduos	15	0,06556	0,004371		

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Estes resultados fizeram reavaliar as faixas de turbidez da água bruta e vazão. Se optou por utilizar amplitudes maiores nos testes do que as analisadas no comissionamento, para investigar como seria o comportamento em condições consideradas mais críticas para os tratamentos.

4.5 RESULTADOS DO TEMPO DE COLMATAÇÃO

Para a análise de tempo de colmatação se consideraram também os registros feitos durante o pré-teste. A micropeneira 1 (como mostra a Tabela 17) teve um tempo de colmatação menor que as demais (máximo de 15,25 horas ou 915 minutos para turbidez da bruta de 9 uT e vazão de 215 L.h⁻¹). Já para a micropeneira 3, a maior carreira de peneiramento foi com turbidez de 15 uT e vazão de 215 L.h⁻¹, chegou a 4,92 dias, entretanto, finalizou-se o teste antes da colmatação. Não foi possível deixar todos os testes rodarem até a colmatação, visto que poderia durar muito tempo um único teste e então se perderia a oportunidade de testar um maior número de amostras quando havia turbidez adequada às faixas do delineamento experimental.

O diagrama de caixa (Figura 42) mostra que a micropeneira 3 teve o seu menor tempo de colmatação acima do maior tempo de colmatação das outras duas peneiras. A micropeneira 1 apresentou mediana maior que a micropeneira 2, entretanto isto se deve ao fato de que há mais observações de tempo de colmatação da micropeneira 1 com vazão e turbidez baixa do que com a micropeneira 2, por este motivo o resultado tendenciou à um melhor resultado da micropeneira 1, o que não foi observado em campo quando colocadas em mesmas condições, já que a micropeneira 1 tendia a colmatação antes do que as demais.

Tabela 17 – Tempo de colmatação das micropeneiras.

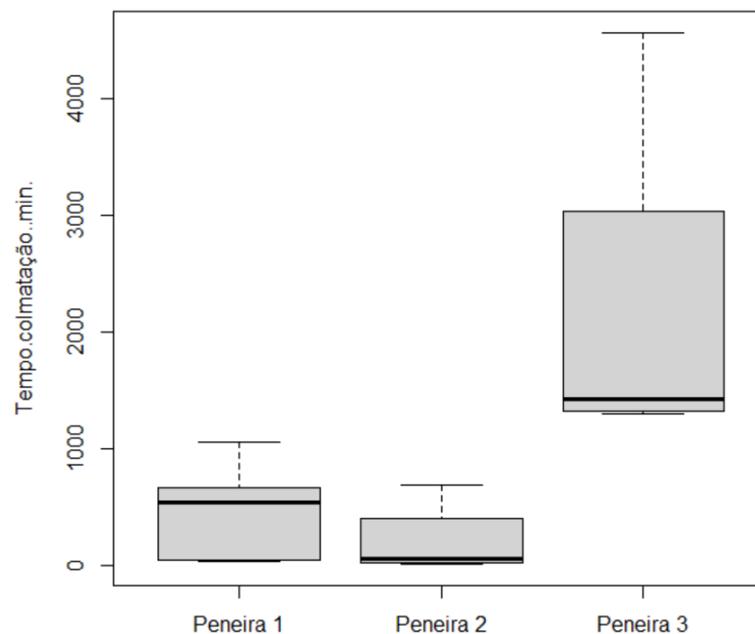
Micropeneira	Data da amostra	Vazão (L.h ⁻¹)	Turbidez água bruta (uT)	Tempo de Colmatação (min)	Compõe o teste ANOVA
1 (mash 200)	22/05/2019	215	9	1050	
	21/05/2019	215	10	665	
	20/05/2019	215	14	550	sim
	21/05/2019	205	14	525	sim
	16/10/2019	1000	23	30	sim
	01/11/2019	650	55	35	sim
2 (mash 150)	10/05/2019	1170	9	180	sim
	22/05/2019	265	10	680	
	20/05/2020	270	15	605	sim
	05/11/2019	1000	55	14	
	01/11/2019	650	60	65	sim
	05/11/2019	1000	60	22	
	06/11/2019	650	82	29	sim
	06/11/2019	1000	177	9	
3 (mash 80)	20/05/2020	225	15	4.565*	sim
	02/11/2019	650	60	1510	sim
	07/11/2019	650	100	1330	sim
	05/11/2019	300	150	1300	sim

*Não chegou a colmatar.

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observou-se que a micropeneira 3, apesar de ter a mesma área útil que as demais peneiras, a diferença da abertura para passagem de sólidos está associada a uma diferença bastante significativa quanto ao tempo de colmatação, visto que em 4 dias não chegou a colmatar.

Figura 42 – Diagrama de caixa por micropeneira e tempo de colmatação.



Fonte: Software RStudio, adaptado pela autora (2021).

Escolheu-se apenas 4 observações de cada micropeneira, tomou-se o cuidado de escolher amostras que tivessem a maior semelhança de condições de teste: vazão e turbidez, para evitar que estas análises tivessem resultados tendenciosos, as escolhidas estão na Tabela 17 e o resumo estatístico delas está na Tabela 18. Segundo o resumo estatístico a peneira que apresentou a maior média de tempo de colmatção foi a 3.

Tabela 18 – Resumo estatístico do tempo de colmatção de cada micropeneira em minutos.

Peneira	Tempo Médio (min)	Desvio padrão	Nº de amostras
1	279	284	4
2	220	265	4
3	2176	1595	4

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na Tabela 19 está o resultado da análise de variância do tempo de colmatção das peneiras, que mostrou que há diferença estatística significativa (para intervalo de confiança de 95%) entre as médias dos tempos de colmatção delas, pois o valor do coeficiente de correlação linear de Pearson, valor P, foi menor que 0,05, resultou em 0,027.

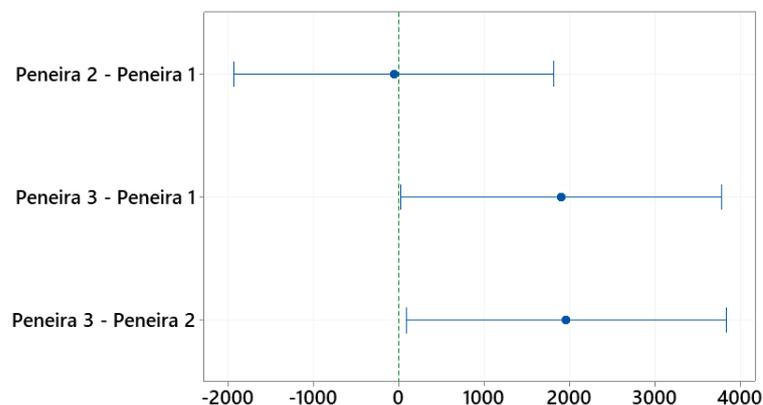
Para validar qual ou quais das peneiras apresentaram diferença significativa entre as médias do tempo de colmatção realizou-se o teste de comparação de Tukey, conforme Figura 43. O teste mostrou que há diferença significativa para um intervalo de confiança maior ou igual a 95% para o tempo de colmatção da micropeneira 3 para as demais.

Tabela 19 – Análise de variância do tempo de colmatção das peneiras.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Peneira	2	9909173	55,06%	9909173	4954586	5,51	0,027
Erro	9	8086868	44,94%	8086868	898541		
Total	11	17996041	100,00%				

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

Figura 43 – Teste de Tukey – diferença de médias para tempo de colmatção das peneiras (min).



Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

Esta diferença foi percebida em campo durante os experimentos. A micropeneira 3 apresentou em todos os testes uma tendência menor à colmatção que as demais.

Para entender o comportamento da curva de colmatção de cada peneira considerando a mudança de turbidez e de vazão se realizou a análise de regressão linear, para tal se incluiu todas as amostras que estão na Tabela 17. Para todas as três o tempo de colmatção diminuiu com o aumento da vazão e da turbidez.

4.5.1 Micropeneira 1 – mash 200

Equação de regressão linear da micropeneira 1 para o tempo de colmatção (min) versus vazão ($L.h^{-1}$) e turbidez da água bruta (uT). O coeficiente de correlação linear de Pearson mostrou que a constante é estatisticamente significativa para o resultado do tempo de colmatção da micropeneira 1, vazão teve uma significância maior que turbidez da água bruta mas não se mostrou significativa para um intervalo de confiança de 95%. O coeficiente de determinação R^2 da regressão linear foi de 80,12 %.

Tempo colmatção = 958 – 0,688 × vazão – 9,37 × turbidez água bruta (Equação 7)

Esta equação está limitada à combinação de vazão máxima de $1000 L.h^{-1}$ e turbidez da água bruta ≤ 28 uT ou da turbidez máxima da água bruta de 55 uT e vazão $\leq 600 L.h^{-1}$.

Tabela 20 – Regressão linear da micropeneira 1 quanto ao tempo de colmatção em minutos considerando as variáveis turbidez da água bruta em uT e vazão em $L.h^{-1}$.

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P
Constante	958	167	(428; 1488)	5,75	0,010
Vazão	-0,688	0,366	(-1,852; 0,476)	-1,88	0,156
Turbidez água bruta	-9,37	7,02	(-31,72; 12,98)	-1,33	0,274

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

Tabela 21 – Dados da regressão linear da micropeneira 1 quanto ao tempo de colmatção.

Erro residual	225,394
Coeficiente de determinação R^2	80,12%
Coeficiente de determinação R ajustado	66,86%

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

Tabela 22 – Análise de variância do tempo de colmatção versus vazão e turbidez da água bruta - micropeneira 1 (mash 200).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	614064	80,12%	614064	307032	6,04	0,089
Vazão	1	523597	68,31%	179861	179861	3,54	0,156
Turbidez água bruta	1	90467	11,80%	90467	90467	1,78	0,274
Erro	3	152407	19,88%	152407	50802		
Total	5	766471	100,00%				

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

4.5.2 Micropeneira 2 – mash 150

Equação de regressão linear da micropeneira 2 para o tempo de colmatção (min) versus vazão ($L.h^{-1}$) e turbidez da água bruta (uT). O coeficiente de correlação linear de Pearson mostrou que a constante e a vazão são estatisticamente significativas para o resultado do tempo de colmatção da micropeneira 2 para um intervalo de confiança de 95%. Vazão e turbidez da água bruta tiveram maior associação com o tempo de colmatção na micropeneira 2 se comparada com a micropeneira 1. Entretanto o coeficiente de determinação R^2 da regressão linear foi um pouco mais baixo do que o da peneira anterior, 75,57%.

$$\text{Tempo colmatção} = 707 - 0,53 \times \text{vazão} - 1,87 \times \text{turbidez água bruta} \quad (\text{Equação 8})$$

Esta equação está limitada à combinação de vazão máxima de $1170 L.h^{-1}$ e turbidez da água bruta ≤ 45 uT ou da turbidez máxima da água bruta de 177 uT e vazão $\leq 700 L.h^{-1}$.

Tabela 23 – Regressão linear da micropeneira 2 quanto ao tempo de colmatção em minutos considerando as variáveis turbidez da água bruta em uT e vazão em $L.h^{-1}$.

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P
Constante	707	146	(332; 1082)	4,85	0,005
Vazão	-0,530	0,191	(-1,020; -0,039)	-2,78	0,039
Turbidez água bruta	-1,87	1,21	(-4,96; 1,23)	-1,55	0,182

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 24 – Dados da regressão linear da micropeneira 2 quanto ao tempo de colmatção.

Erro residual	163,178
Coeficiente de determinação R^2	75,57%
Coeficiente de determinação R ajustado	65,80%

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2020).

Tabela 25 – Dados da regressão linear da micropeneira 2 quanto ao tempo de colmatção.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor-F	Valor-P
Regressão	2	411915	75,57%	411915	205958	7,73	0,029
Vazão	1	348039	63,85%	205117	205117	7,70	0,039
Turbidez água bruta	1	63876	11,72%	63876	63876	2,40	0,182
Erro	5	133135	24,43%	133135	26627		
Total	7	545050	100,00%				

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.5.3 Micropeneira 3 – mash 80

Equação de regressão linear da micropeneira 3 para o tempo de colmatção (min) versus vazão ($L.h^{-1}$) e turbidez da água bruta (uT). Para o tempo de colmatção da micropeneira 3 nenhuma das variáveis se mostrou estatisticamente significativa se considerado um intervalo de confiança de 95%. Mas das 3 peneiras, foi a que mais apresentou associação entre o tempo

de colmatação e a turbidez da água bruta. Também foi ela que apresentou o melhor coeficiente de determinação R^2 da regressão linear 97,07%.

$$\text{Tempo colmatação} = 5706 - 4,08 \times \text{vazão} - 20,52 \times \text{turbidez água bruta}$$

(Equação 9)

Esta equação está limitada à combinação de vazão máxima de 895 L.h⁻¹ e turbidez da água bruta ≤ 100 uT ou da turbidez máxima da água bruta de 218 uT e vazão ≤ 300 L.h⁻¹.

Tabela 26 – Regressão linear da micropeneira 3 quanto ao tempo de colmatação em minutos considerando as variáveis turbidez da água bruta em uT e vazão em L.h⁻¹.

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P
Constante	5706	684	(-2991; 14403)	8,34	0,076
Vazão	-4,08	1,22	(-19,52; 11,36)	-3,36	0,184
Turbidez água bruta	-20,52	4,77	(-81,16; 40,13)	-4,30	0,146

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

Tabela 27 – Dados da regressão linear da micropeneira 3 quanto ao tempo de colmatação.

Erro residual	472,683
Coeficiente de determinação R^2	97,07%
Coeficiente de determinação R ajustado	91,22%

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

Tabela 28 – Análise de variância do tempo de colmatação versus vazão e turbidez da água bruta - micropeneira 3 (mash 80).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	2	7410539	97,07%	7410539	3705270	16,58	0,171
Vazão	1	3281824	42,99%	2521738	2521738	11,29	0,184
Turbidez água bruta	1	4128715	54,08%	4128715	4128715	18,48	0,146
Erro	1	223430	2,93%	223430	223430		
Total	3	7633969	100,00%				

Fonte: Software Minitab, adaptado pela autora (2021).

4.6 RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE TURBIDEZ

Após amostragens foi necessário ajustar o delineamento fatorial das três peneiras conforme está apresentado na Tabela 29, Tabela 30 e Tabela 31. No total foram realizadas 62 amostras, destas, 45 se enquadraram no delineamento fatorial. Por causa do período de estiagem não foi possível repetir amostras para reduzir o desvio padrão de alguns pontos para a variável turbidez da água bruta, conforme desvios apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 29 – Delineamento amostral fatorial ajustado, micropeneira 1 (mash 200).

Variável independente	Variáveis	Níveis		
		-1	0	1
Vazão (L.h ⁻¹)	q_1	300	650	1000
Turbidez água bruta (uT)	q_2	43,75	88,38	133,00
Desvio padrão Turbidez (uT)		1,58	18,99	32,08

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 30 – Delineamento amostral fatorial ajustado, micropeneira 2 (mash 150).

Variável independente	Variáveis	Níveis		
		-1	0	1
Vazão (L.h ⁻¹)	q_1	300	650	1000
Turbidez água bruta (uT)	q_2	44,37	86,52	128,67
Desvio padrão Turbidez (uT)		3,94	19,20	6,60

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 31 – Delineamento amostral fatorial ajustado, micropeneira 3 (mash 80).

Variável independente	Variáveis	Níveis		
		-1	0	1
Vazão (L.h ⁻¹)	q_1	300	650	1000
Turbidez água bruta (uT)	q_2	28,9	71,25	113,6
Desvio padrão Turbidez (uT)		1,00	10,08	13,80

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.6.1 Micropeneira 1 – mash 200

A micropeneira 1 mostrou eficiência mínima de 1,77%, para vazão de 300 L.h⁻¹ e turbidez de 96 uT, e a eficiência máxima foi de 22,6%, para vazão de 1.000 L.h⁻¹ e turbidez da água bruta de 177 uT, como mostra a Tabela 32.

Tabela 32 – Resultados do plano amostral da micropeneira 1(mash 200).

Vazão (L.h ⁻¹)	Turbidez água bruta (uT)	q1	q2	Turbidez água pré-tratada (uT)	Eficiência de remoção de turbidez
300	42	-1	-1	35,3	15,95%
300	42,5	-1	-1	35,8	15,76%
300	42,6	-1	-1	37,9	11,03%
300	96	-1	1	94,3	1,77%
300	104	-1	1	97,5	6,25%
300	107	-1	1	97,1	9,25%
650	59	0	0	55,5	5,93%
650	75,2	0	0	67,1	10,77%
650	81,7	0	0	73,3	10,28%
1000	43,8	1	-1	42,1	3,88%
1000	45,2	1	-1	38	15,93%
1000	46,4	1	-1	40	13,79%
1000	147	1	1	135	8,16%
1000	167	1	1	164	1,80%
1000	177	1	1	137	22,60%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A média da eficiência de remoção de turbidez não mostrou diferença significativa para a variação dos fatores turbidez da água bruta, vazão e para os dois fatores juntos quando considerado um intervalo de confiança de 95%, como pode ser visto na Tabela 33.

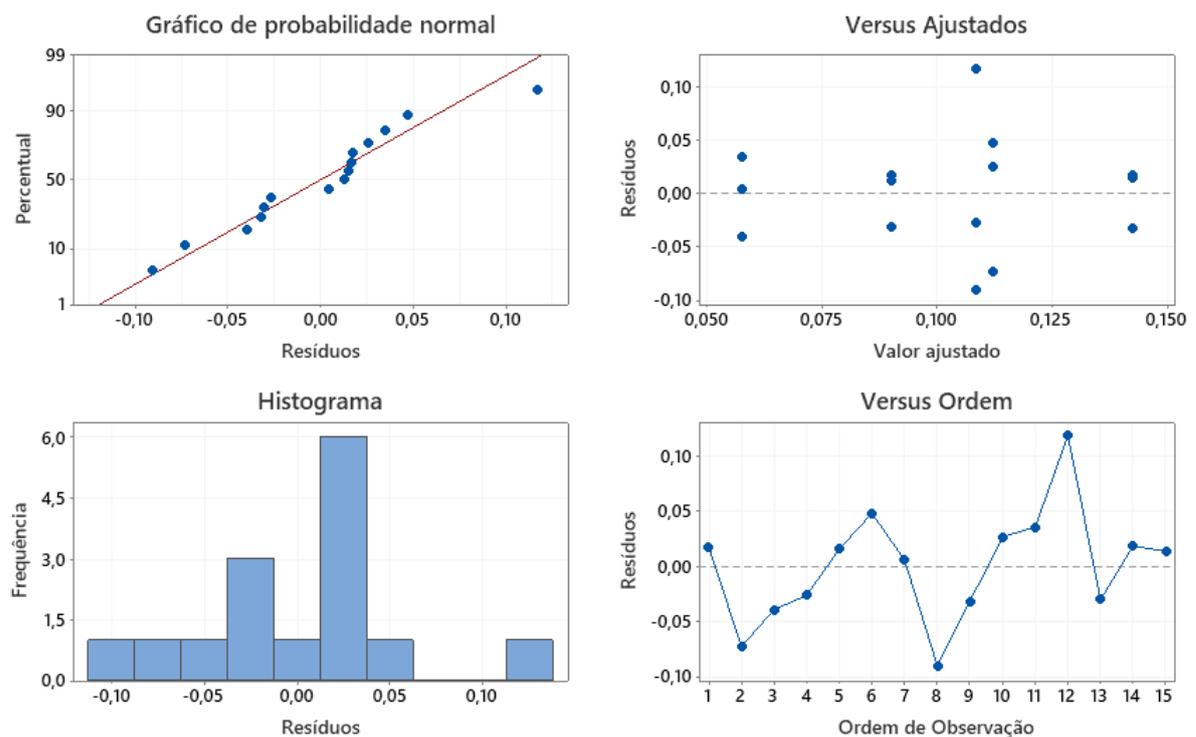
Na Figura 44 estão apresentados os gráficos de resíduo da eficiência, mostram que há certa normalidade no comportamento dos dados.

Tabela 33 – Análise de variância com dois fatores da eficiência da micropeneira 1 (mash 200).

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	0,011705	24,13%	0,011705	0,002926	0,80	0,555
Linear	2	0,006176	12,73%	0,006176	0,003088	0,84	0,460
Vazão	1	0,000314	0,65%	0,000314	0,000314	0,09	0,776
Turbidez	1	0,005862	12,09%	0,005862	0,005862	1,59	0,236
Vazão*Turbidez	1	0,004974	10,26%	0,004974	0,004974	1,35	0,272
Curvatura	1	0,000555	1,14%	0,000555	0,000555	0,15	0,706
Erro	10	0,036796	75,87%	0,036796	0,003680		
Total	14	0,048501	100,00%				

Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

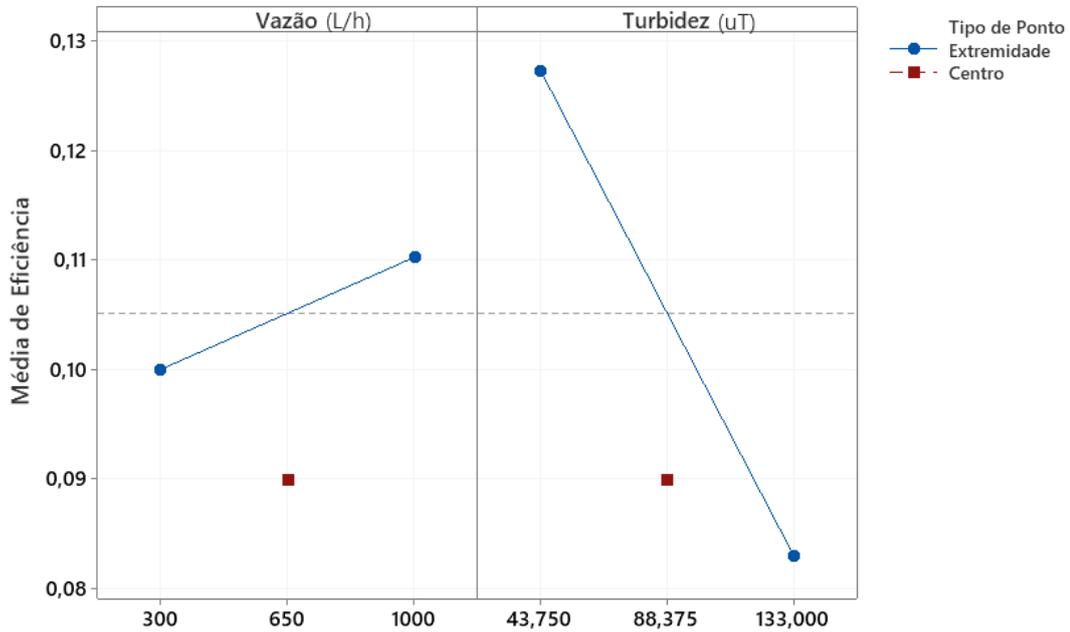
Figura 44 – Gráfico de resíduo de eficiência – micropeneira 1.



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

Os gráficos da Figura 45 corroboram com os valores de p apresentados na Tabela 33, em quem a variável que mostrou maior associação com a variação da média de eficiência foi a turbidez da água bruta, no caso diminuiu com o aumento da turbidez.

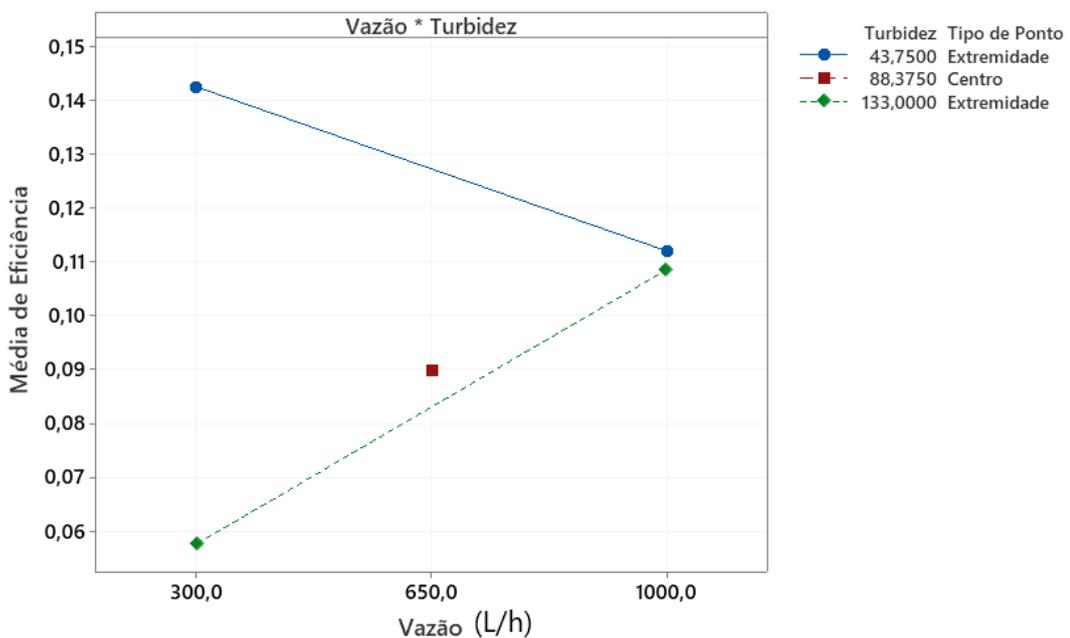
Figura 45 – Gráfico de efeitos principais para eficiência – Médias ajustadas, da micropeneira 1 (mash 200).



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

O gráfico da Figura 46 mostra o efeito na eficiência de remoção de turbidez considerando a interação de vazão e turbidez da água bruta. Para o nível de turbidez da água bruta mais baixo (43,75 uT) aumentar a vazão significou reduzir a eficiência. Já para o nível de turbidez mais alto o aumento da vazão significou o aumento da eficiência. O ponto central se aproximou do comportamento do nível de turbidez maior (133,00 uT).

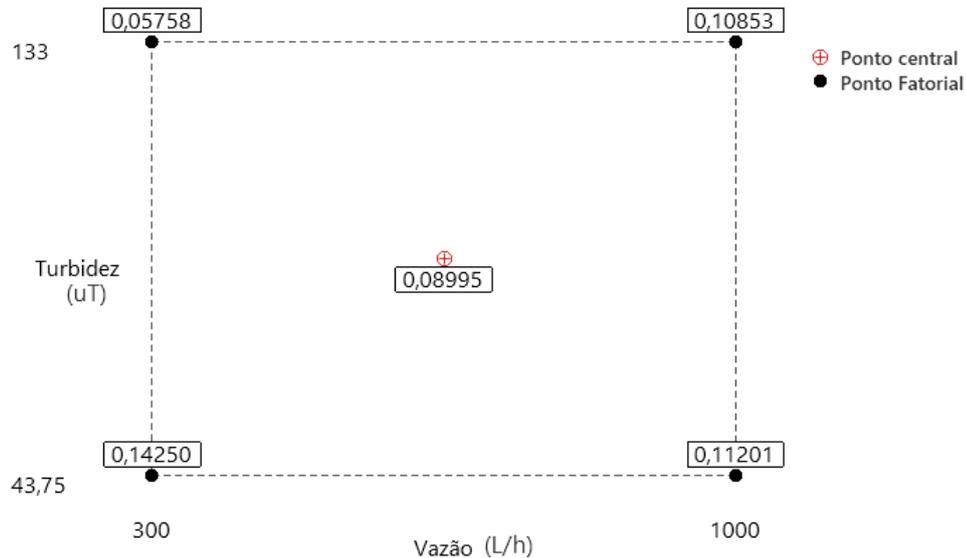
Figura 46 – Gráfico de interação para eficiência – médias ajustadas, da micropeneira 1 (mash 200).



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

No gráfico de cubo (Figura 47) fica claro que é no menor nível de turbidez que se tem a maior eficiência para os dois níveis de vazão, 300 e 1000 L.h⁻¹.

Figura 47 – Gráfico de Cubo (médias ajustadas) de eficiência - micropeneira 1 (mash 200).



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

4.6.2 Micropeneira 2 – mash 150

A micropeneira 2 mostrou eficiência mínima de 2,42%, para vazão de 300 L.h⁻¹ e turbidez de 121 uT, e a máxima foi de 18,6%, para vazão de 650 L.h⁻¹ e turbidez da água bruta de 81,7 uT, conforme mostra a Tabela 34.

Tabela 34 – Resultados do plano amostral da micropeneira 2 (mash 150).

Vazão (L.h ⁻¹)	Turbidez água bruta (uT)	q1	q2	Turbidez água pré-tratada (uT)	Eficiência de remoção de turbidez
300	42,5	-1	-1	35,7	16,00%
300	42,6	-1	-1	35,3	17,14%
300	43,7	-1	-1	39,8	8,92%
300	124	-1	1	121	2,42%
300	130	-1	1	117	10,00%
300	136	-1	1	119	12,50%
650	54,9	0	0	47	14,39%
650	77,4	0	0	66,1	14,60%
650	81,7	0	0	66,5	18,60%
1000	42	1	-1	38,2	9,05%
1000	42,3	1	-1	39,6	6,38%
1000	53,1	1	-1	48,5	8,66%
1000	120	1	1	111	7,50%
1000	124	1	1	112	9,68%
1000	138	1	1	132	4,35%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A média da eficiência de remoção de turbidez não mostrou diferença significativa para a variação dos fatores turbidez da água bruta, vazão e para os dois fatores juntos quando considerado um intervalo de confiança de 95%, como pode ser visto na Tabela 39. Mas os valores de P já se apresentaram mais baixos do que os resultados da micropeneira 1.

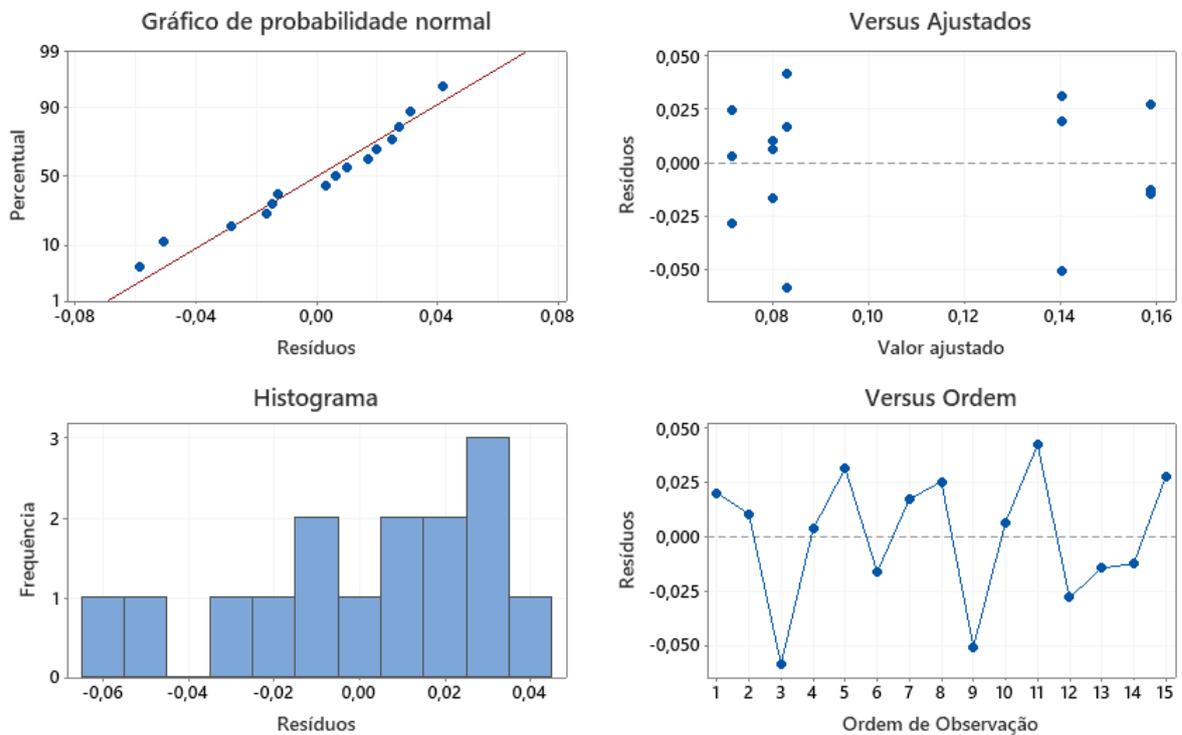
Tabela 35 – Análise de variância com dois fatores da eficiência da micropeneira 2 (mash 150)

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	0,018892	60,28%	0,018892	0,004723	3,79	0,040
Linear	2	0,007040	22,46%	0,007040	0,003520	2,83	0,106
Vazão	1	0,003803	12,13%	0,003803	0,003803	3,05	0,111
Turbidez	1	0,003237	10,33%	0,003237	0,003237	2,60	0,138
Vazão*Turbidez	1	0,001770	5,65%	0,001770	0,001770	1,42	0,261
Curvatura	1	0,010082	32,17%	0,010082	0,010082	8,10	0,017
Erro	10	0,012450	39,72%	0,012450	0,001245		
Total	14	0,031342	100,00%				

Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

Na Figura 48 estão apresentados os gráficos de resíduo da eficiência, que mostram que há certa normalidade no comportamento dos dados.

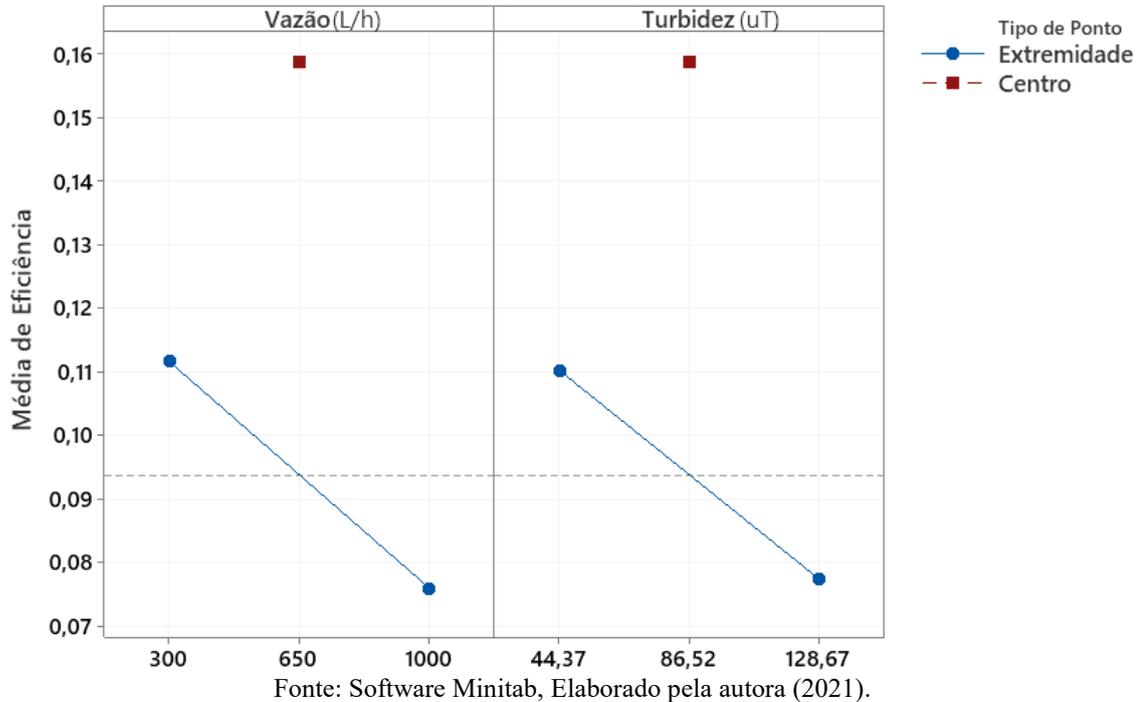
Figura 48 – Gráfico de resíduo de eficiência – micropeneira 2.



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

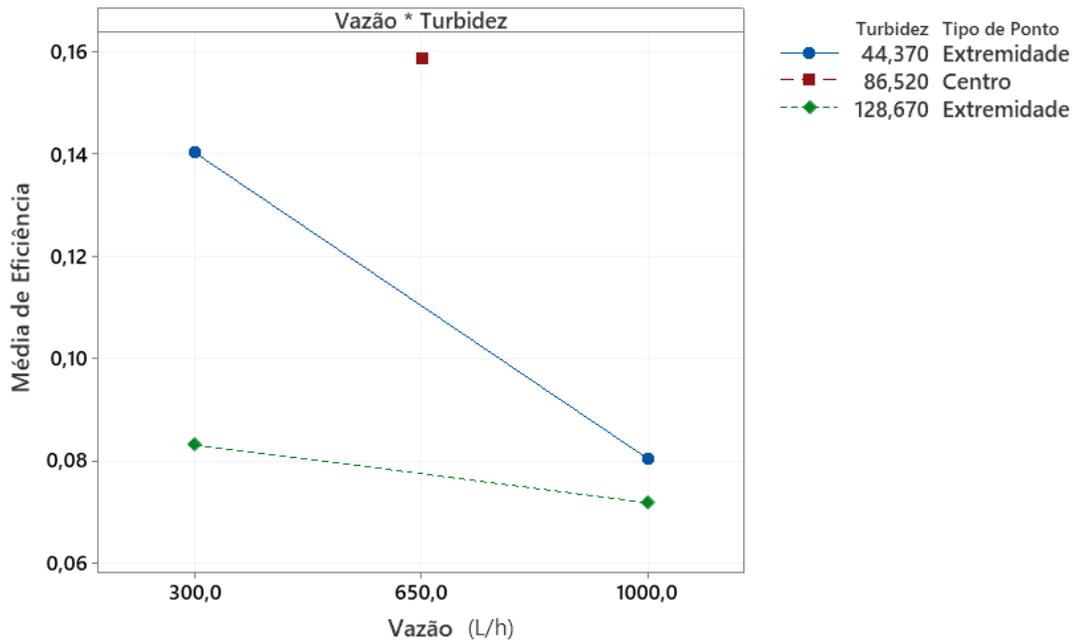
Os gráficos de efeitos principais, apresentados na Figura 49, mostram comportamento semelhante para o aumento da turbidez da água bruta e para o aumento da vazão, ambos estão associados com uma redução de eficiência de remoção de turbidez.

Figura 49 – Gráfico de efeitos principais para eficiência – Médias ajustadas, micropeneira 2 (mash 150)



O gráfico da Figura 50 apresenta o mesmo comportamento quando interage as variáveis vazão e turbidez, mas apresenta uma variação maior para a faixa de turbidez menor e menor para a faixa de turbidez maior. Nos três gráficos o ponto central se destaca do comportamento dos demais apresentando a melhor média de eficiência. Também corroboram com o resultados dos valores de p, apresentados na Tabela 35.

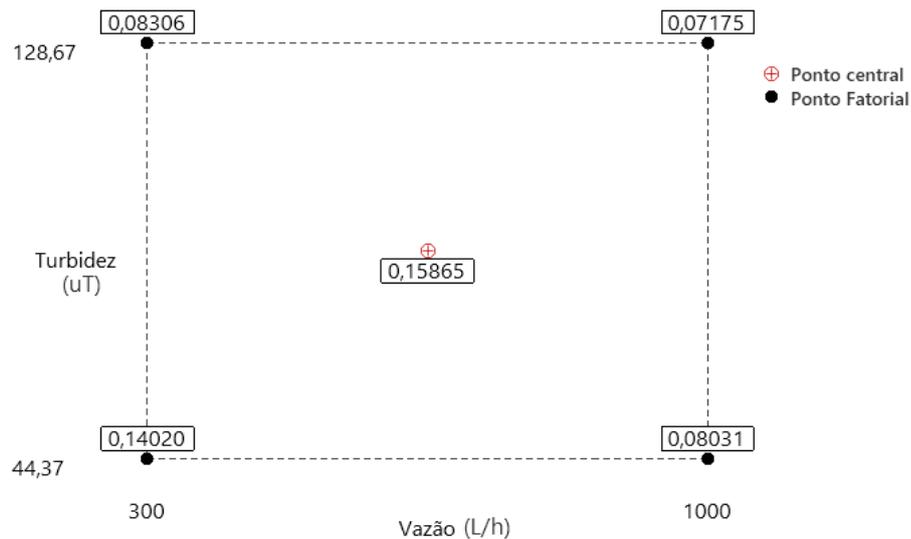
Figura 50 – Gráfico de interação para eficiência – médias ajustadas, da micropeneira 2 (mesh 150)



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

No gráfico de cubo, apresentado na Figura 51, fica claro o ponto central como um ponto ótimo de operação para atingir a melhor eficiência de remoção de turbidez. A segunda média de eficiência ficou na posição (-1; -1) conforme ocorreu para a micropeneira 1. E comparando a eficiência nos dois níveis de vazão, a tendência de redução de eficiência quando há o aumento de turbidez também acompanha o comportamento da micropeneira 1.

Figura 51 – Gráfico de Cubo (médias ajustadas) para eficiência da micropeneira 2 (mesh 150)



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

4.6.3 Micropeneira 3 – mash 80

A micropeneira 3 mostrou eficiência mínima de 0,81%, para vazão de 300 L.h⁻¹ e turbidez de 123,0 uT, e a máxima foi de 14,13%, para vazão de 650 L.h⁻¹ e turbidez da água bruta de 73,6 uT, conforme dados da Tabela 36.

Tabela 36 – Resultados do plano amostral da micropeneira 3 (mash 80).

Vazão (L.h ⁻¹)	Turbidez água bruta (uT)	q1	q2	Turbidez água pré-tratada (uT)	Eficiência de remoção de turbidez
300	28,4	-1	-1	25,8	9,15%
300	29,5	-1	-1	27,0	8,47%
300	29,6	-1	-1	27,4	7,43%
300	124,0	1	-1	123,0	0,81%
300	108,0	1	-1	100,0	7,41%
300	136,0	1	-1	124,0	8,82%
650	60,0	0	0	58,4	2,67%
650	58,1	0	0	57,1	1,72%
650	73,6	0	0	63,2	14,13%
1000	26,9	-1	1	26,2	2,60%
1000	29,1	-1	1	27,2	6,53%
1000	29,8	-1	1	26,0	12,75%
1000	91,7	1	1	89,1	2,84%
1000	109,0	1	1	103,0	5,50%
1000	113,0	1	1	106,0	6,19%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A média da eficiência de remoção de turbidez não mostrou diferença significativa para a variação dos fatores turbidez da água bruta, vazão e para os dois fatores juntos quando considerado um intervalo de confiança de 95%, como pode ser visto na Tabela 37.

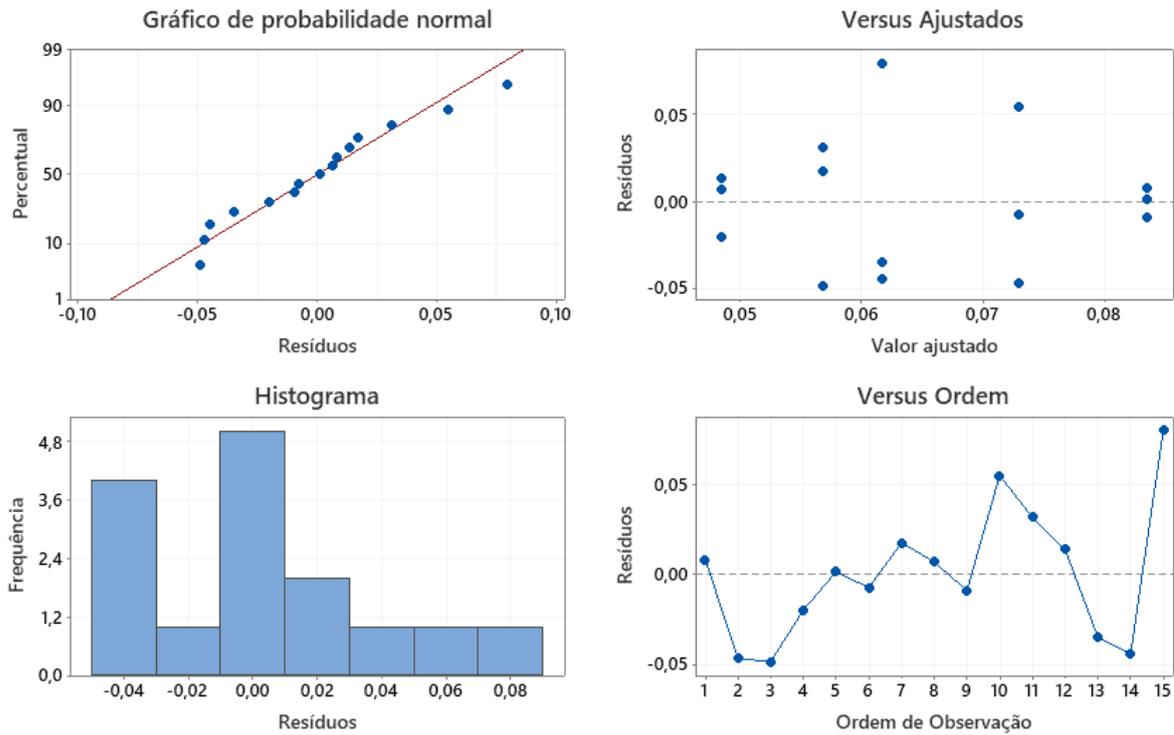
Na Figura 52 estão apresentados os gráficos de resíduo da eficiência, que mostram que há certa normalidade no comportamento dos dados.

Tabela 37 – Análise de variância com dois fatores da eficiência da micropeneira 3 (mash 80)

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	0,002275	10,58%	0,002275	0,000569	0,30	0,874
Linear	2	0,002238	10,41%	0,002238	0,001119	0,58	0,577
Vazão	1	0,000269	1,25%	0,000269	0,000269	0,14	0,716
Turbidez	1	0,001969	9,16%	0,001969	0,001969	1,02	0,335
Vazão*Turbidez	1	0,000004	0,02%	0,000004	0,000004	0,00	0,965
Curvatura	1	0,000033	0,15%	0,000033	0,000033	0,02	0,898
Erro	10	0,019224	89,42%	0,019224	0,001922		
Total	14	0,021499	100,00%				

Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

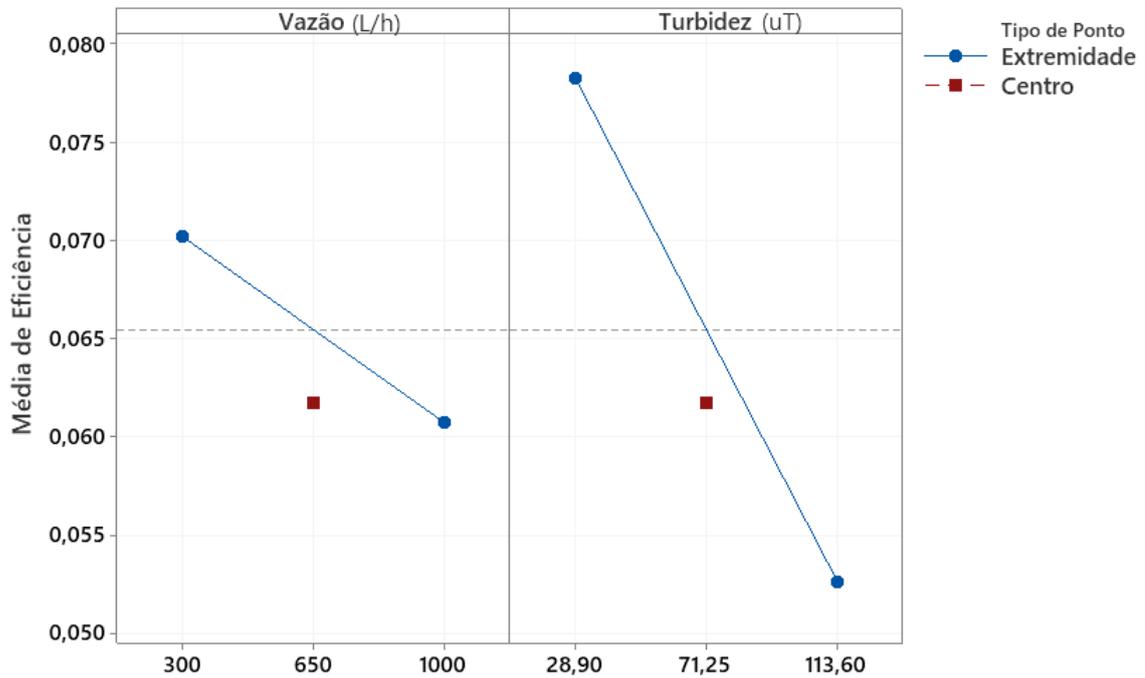
Figura 52 – Gráfico de resíduo de eficiência – micropeneira 3.



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

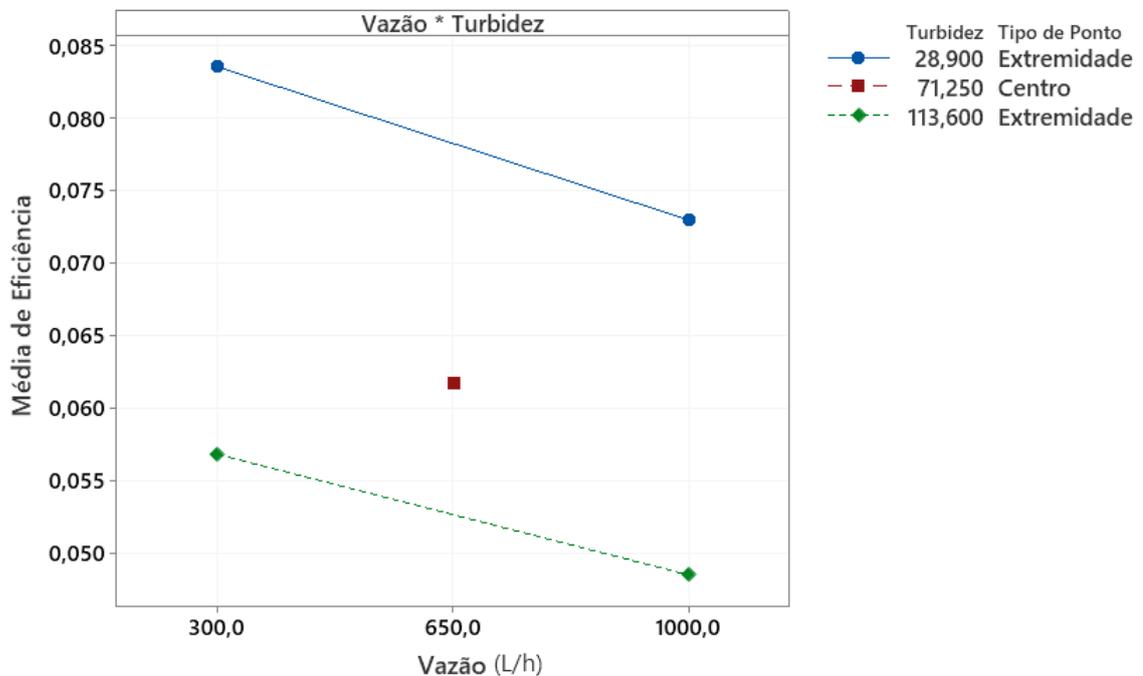
Os gráficos de efeitos principais, apresentados na Figura 53, mostram comportamento semelhante para o aumento da turbidez da água bruta e para o aumento da vazão, ambos estão associados com uma redução de eficiência de remoção de turbidez. Comportamento bastante semelhante ao da micropeneira 2, com exceção do ponto central, que para a micropeneira 3 segue o mesmo comportamento dos demais. No caso da turbidez a variação da eficiência é maior que para a vazão. O gráfico da Figura 54 apresenta o mesmo comportamento quando interage as variáveis vazão e turbidez.

Figura 53 – Gráfico de efeitos principais da eficiência – Médias ajustadas, micropeneira 3 (mash 80).



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

Figura 54 – Gráfico de interação para eficiência – médias ajustadas, da micropeneira 3 (mash 80).

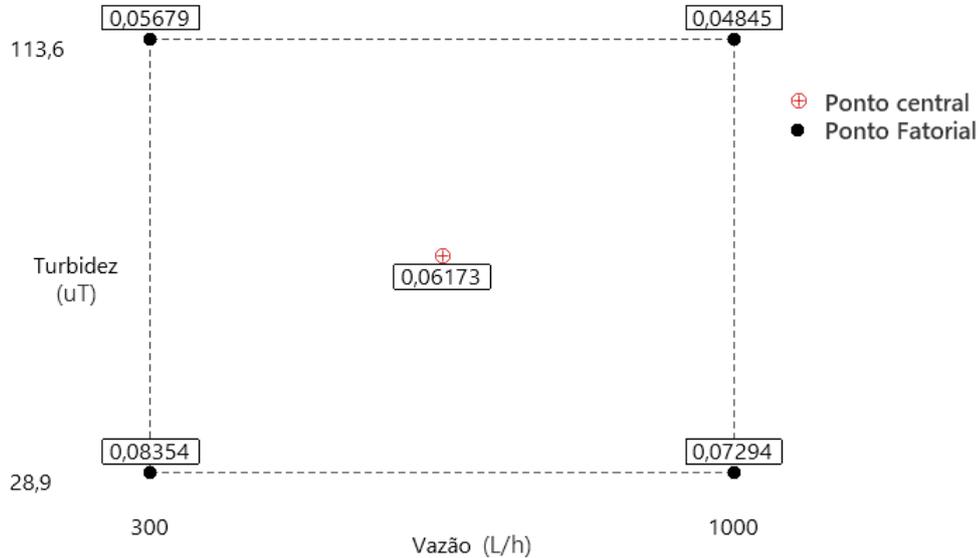


Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

No gráfico de cubo apresentado na Figura 55 o comportamento segue o mesmo da micropeneira 1 e parte do que aconteceu para a micropeneira 2, em que a eficiência reduziu com o aumento da turbidez, para a micropeneira 3 a eficiência também reduz com o aumento

da vazão para os dois níveis de turbidez da água bruta. Apesar de ocorrer isto as variações de eficiência foram pequenas e não se mostram significativas estatisticamente, como mostrou o teste ANOVA da Tabela 37.

Figura 55 – Gráfico de Cubo (médias ajustadas) para eficiência da micropeneira 3 (mash 80).



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

4.6.4 Análise das três peneiras

Após análise das peneiras separadas se reuniu todas as 45 amostras, com a turbidez da água bruta medida (variável contínua) e a vazão como fator, o resumo estatístico dos resultados está na Tabela 38. Na média, a melhor eficiência foi da micropeneira 2, mas com uma diferença menor que 5% da média da micropeneira 1 e a menor das médias foi da micropeneira 3. Quanto à mediana da eficiência a maior foi da micropeneira 1 (mash 200), seguida da micropeneira 2 (mash 150) e 3 (mash 80), neste caso, a mediana da eficiência de remoção foi menor quanto menor foi a abertura de passagem de sólidos das peneiras. O máximo de remoção e o terceiro quartil de cada peneira também acompanharam esta tendência.

Realizou-se a análise de variância das amostras das 3 peneiras para inferir a variação das médias de eficiência com a variação dos parâmetros turbidez da água bruta e vazão, apresentada na Tabela 39. A análise mostrou que tanto turbidez quanto o tratamento estão associados à variação da média da eficiência para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 38 – Resumo estatístico das 3 peneiras quanto à eficiência de remoção.

Peneira	Média	EP Média	DesvPad	Variância	Coef.Var	Assimetria	Curtose
1	0,1021	0,0152	0,0589	0,0035	57,64	0,36	-0,19
2	0,1068	0,0122	0,0473	0,0022	44,30	0,07	-0,77
3	0,0647	0,0101	0,0392	0,0015	60,58	0,40	-0,39

Peneira	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Amplitude	DIQ
1	0,0177	0,0593	0,1028	0,1576	0,2260	0,2083	0,0983
2	0,0242	0,0750	0,0968	0,1460	0,1860	0,1619	0,0710
3	0,0081	0,0267	0,0653	0,0882	0,1413	0,1332	0,0616

Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

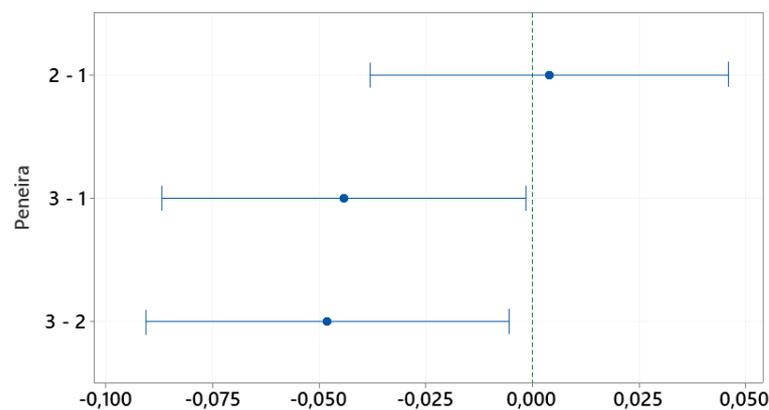
Tabela 39 – Análise de variância quanto à eficiência de remoção de turbidez para as 45 amostras das 3 peneiras.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Turbidez	1	0,005926	5,05%	0,010645	0,010645	4,76	0,035
Vazão	1	0,001214	1,03%	0,001214	0,001214	0,54	0,466
Peneira	2	0,020695	17,64%	0,020695	0,010347	4,63	0,016
Erro	40	0,089483	76,27%	0,089483	0,002237		
Falta de ajuste	10	0,021013	17,91%	0,021013	0,002101	0,92	0,528
Erro puro	30	0,068469	58,36%	0,068469	0,002282	*	*
Total	44	0,117317	100,00%				

Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

Como já comentado a micropeneira 3 tem a menor média de remoção de turbidez e através do teste Tukey (Figura 56) se identificou que as médias das peneiras 1 e 2 são significativamente diferentes da média da micropeneira 3.

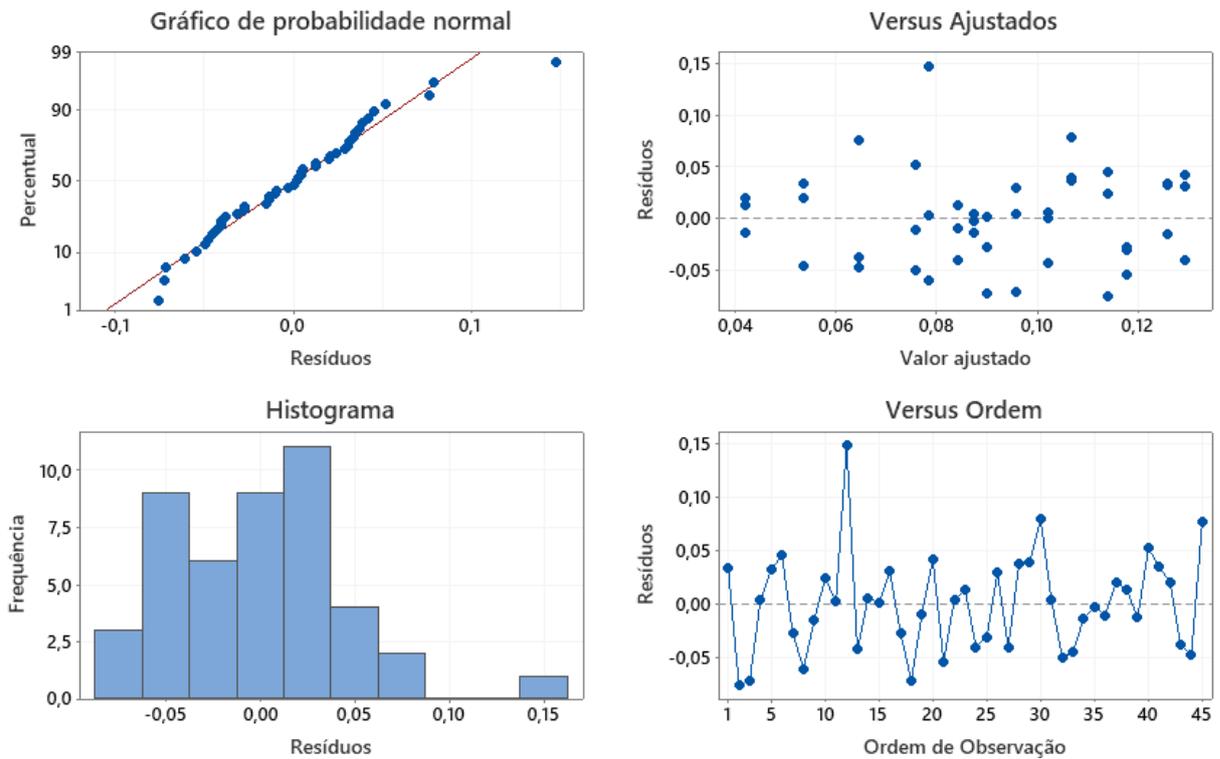
Figura 56 – Teste de comparação Tukey entre médias de remoção de turbidez das peneiras.



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

Na Figura 57 estão apresentados os gráficos de resíduo da eficiência, que mostram que há certa normalidade no comportamento dos dados.

Figura 57 – Gráficos de resíduos da eficiência de remoção de turbidez considerando amostras das 3 peneiras.



Fonte: Software Minitab, Elaborado pela autora (2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica dos tipos de tecnologias de pré-tratamento para remoção de turbidez disponíveis no mercado e/ou estudadas pela academia mostrou que há uma carência por pesquisas nesta área. Entende-se que há uma certa complexidade em estudar estas tecnologias, visto que o foco de tais tratamentos são os processos físicos (sem excluir as interferências de processos químicos) e que as eficiências não estão associadas somente ao tipo da tecnologia e suas características, mas também às características da água bruta. Dentre os tipos de pré-tratamento de água para remoção de turbidez estudados, o que apresentou maior variação de formas, tipo de instalação e operação foram as peneiras, o que mostra versatilidade maior que as demais técnicas e potencial de desenvolvimento da técnica em infinitas variações de formas e tipos de instalação. Entretanto deve-se atentar para a forma de limpeza destas peneiras, para facilitar e não onerar sua operação.

Este trabalho desenvolveu um dispositivo de pré-tratamento, denominado micropeneira sanfonada. Seu diferencial foi o formato da face de peneiramento, desenvolvido com malha de aço inox 304 que possibilitou otimizar a área de peneiramento por volume ocupado do dispositivo. Sugere-se o estudo do aprimoramento da retrolavagem do dispositivo e seu teste em bancada, possibilitando um controle maior das características da água bruta e posteriormente o seu teste dentro de um manancial superficial.

O desempenho da micropeneira sanfonada na remoção de turbidez foi testado com a água bruta do rio Tubarão. Três aberturas de micropeneira foram avaliadas (mash 200, mash 150 e mash 80). Os resultados dos testes mostraram que as diferenças entre as eficiências de remoção de turbidez e o tempo de colmatação total estão associados às aberturas de peneiras. O espaçamento de abertura da peneira mash 80 é cerca de 2,2 vezes maior que a peneira mash 200 e 1,56 vezes maior que a mash 150. Esta característica levou a micropeneira 3 (mash 80) a apresentar diferença estatística significativa em relação às demais para os dois parâmetros, o tempo de colmatação foi o maior (média de 2.176 min e até 9,9 vezes maior que a média da micropeneira 1 – mash 200) e a eficiência de remoção de turbidez foi a menor (média de 6,47%, aproximadamente 60% da eficiência média das demais).

Considerando o resultado das 3 peneiras, a turbidez da água bruta está associada à eficiência de remoção de turbidez. Ao se analisar os gráficos de efeito para cada tratamento, no geral, o aumento da turbidez da água bruta reduz a eficiência de remoção. Vale ponderar que esta observação aconteceu para a água do rio Tubarão e se entende que este fenômeno está associado às características da água bruta coletada, o contexto em que está inserida e às variáveis que causam o aumento e redução de partículas que impactam na turbidez da água

superficial. Nesta lógica, se este teste fosse realizado em outro manancial ou em outro ponto da bacia hidrográfica do rio Tubarão, poderia ter outro resultado. Também considerando que a água bruta do teste não é exatamente a água bruta no rio, visto que já passou por pré-tratamento, é possível que a eficiência seja maior quando instalada a micropeneira dentro do manancial.

Os testes utilizaram água bruta com turbidez de até 164 uT, sugere-se testar esta tecnologia para turbidez maior para identificar se neste caso haverá um aumento da eficiência.

Os testes iniciais mostraram que conforme aumenta o tempo de funcionamento da peneira de limpa até totalmente colmatada, há também um aumento da eficiência de remoção. Isto pode ocorrer pois conforme há uma retenção de partículas na face de peneiramento, também há uma redução das aberturas de passagem de sólidos e, neste caso, partículas menores também passam a serem retidas nas peneiras.

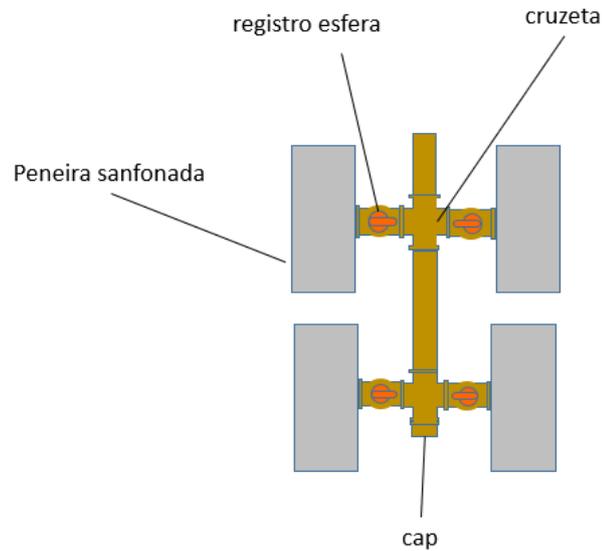
Nos testes iniciais se verificou uma remoção significativa quando a micropeneira 1 operou “totalmente colmatada”, chegou a 60,4 % de eficiência na remoção de turbidez e 50,4% de remoção de cor aparente, entretanto a vazão pré-tratada foi de 6 L/h, seriam necessários pelo menos 4 dispositivos operando em paralelo para atender à uma família de 3 pessoas (considerando consumo per capita de 192 L.hab⁻¹.dia). Como sugestão testar este dispositivo com vazões menores, seria uma peneira que operaria como um filtro lento portátil, visto que ele precisaria de um tempo de maturação para criar uma camada de material retido na superfície de peneiramento para então começar a ter eficiências maiores, e com a vantagem de poder ser instalado dentro da captação.

Como sugestão antes de instalar a tecnologia é realizar uma análise do tipo de sólidos que compõe a turbidez da água, como o teste em cone imhoff com os tempos definidos para a sedimentação de areia, visto que as micropeneiras testadas têm capacidade de reter inicialmente grãos do tamanho de partículas de areia, e quanto maior a presença destas partículas na água maior o potencial de remoção de turbidez

5.1.1.1 Sugestão de instalação da micropeneira sanfonada em manancial superficial

A micropeneira sanfonada foi dimensionada de forma que pudesse ser utilizada e ampliada sua capacidade de vazão incluindo módulos na tubulação de captação alterando o arranjo e conexões, como mostra o exemplo com 4 micropeneiras operando em paralelo na Figura 58.

Figura 58 – Exemplo de arranjo com mais de uma micropeneira na mesma tubulação de captação de água.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

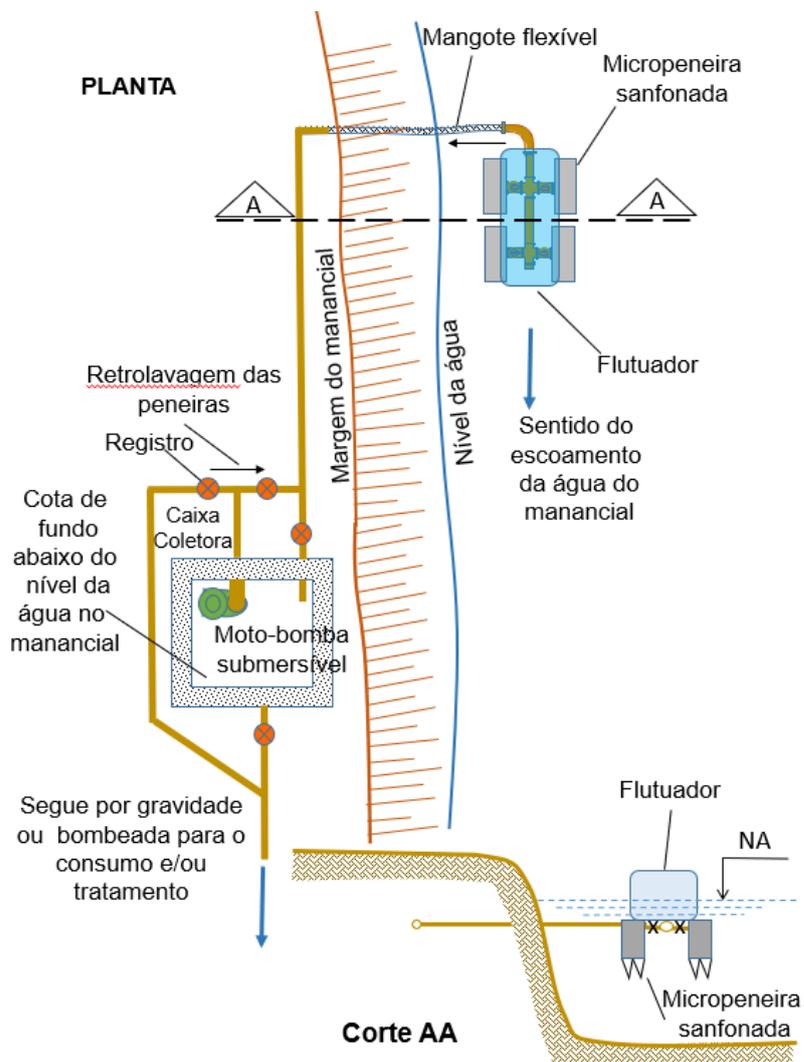
Para possibilitar os testes do experimento (aferição de parâmetros e variáveis) o dispositivo não foi instalado no manancial de captação. Entretanto, o projeto pensou na sua instalação direta no manancial. Em locais em que não há desnível entre o local de captação da água e a fonte consumidora será necessário o uso de bomba para a captação. Se tiver o desnível, é possível instalar o dispositivo no corpo hídrico e a água conseguirá seguir por gravidade até a unidade de tratamento ou a consumidora, arranjo comum em muitas propriedades rurais no interior do país, a maior perda de carga seria em função do diâmetro e extensão da tubulação de adução e da vazão captada.

O desenho esquemático de uma alternativa de instalação do dispositivo de pré-tratamento direto no manancial de captação está apresentado na Figura 59. Como premissa, que a instalação mantenha o dispositivo seguro dentro do curso d'água e que ela não demande materiais de difícil acesso fora dos centros urbanos. As micropeneiras demandam a operação de retrolavagem para limpeza da face de micropeneiramento, para tal é necessário o uso de motobomba e ter um pequeno reservatório de água pré-tratada (até 100 L), como mostra sugestão de instalação da Figura 59.

Sugere-se a instalação da tubulação de adução de água com fluxo contrário ao fluxo do rio, para propiciar um maior arraste de partículas pelo curso hídrico e evitar que sejam retidas na micropeneira.

Para permitir que o dispositivo acompanhe a variação do nível do rio sugere-se instalar um flutuador acima das micropeneiras e usar tubulação flexível na adução.

Figura 59 – Ilustração de instalação do dispositivo no manancial de captação para atendimento de uma residência rural.



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

6 CONCLUSÕES

As peneiras são o tipo de pré-tratamento com maior variedade no mercado, como diferencial sua versatilidade quanto aos formatos e tipos de instalação e como desafio operacional a colmatação e necessidade de limpeza.

A construção do dispositivo de pré-tratamento, denominado de micropeneira sanfonada, trouxe mais uma forma de remoção de turbidez da água bruta superficial.

Para a água bruta do rio Tubarão a redução da eficiência de remoção da turbidez da micropeneira está associada ao aumento da turbidez da água bruta.

A micropeneira 3 (mash 80) foi a abertura que apresentou o maior tempo médio de colmatação (2.176 mim) e a menor eficiência de remoção média de turbidez (6,47%).

REFERÊNCIAS

- ABNT. Norma Brasileira 12.209 – Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 53 p., 1995.
- ABNT. Norma Brasileira 12.213 – Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público. Rio de Janeiro, 5 p., 1992.
- ABNT. Norma Brasileira 6502 – Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 18 p., 1995.
- ANDREOLI, C. V.; SCHUCHARDT, W.; ROCHA, W. N.. Sanepar. 2013. Pedido de patente nº BR 10 2013 011528 2 A2. Acesso dia 06/03/2019 em: <https://www.escavador.com/patentes/55161/sistema-de-captacao-sub-superficial-com-pre-filtracao-de-agua-de-rio?page=3>
- BARROS, J. N.. Legislação Ambiental Aplicada à Mineração. Especialização em Mineração e Meio Ambiente. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas/BA, p. 23, 2017.
- BELLOLI, M., QUADROS, J., GUIDI, A.. História do carvão de Santa Catarina. Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, Vol. 1, 300 p., 2002.
- BRASIL. Congresso Nacional. Lei Federal no 11.445, de 5 de Janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. Diário Oficial da União. Brasília-DF, 2007.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de Setembro de 2017. Diário Oficial da União. Brasília-DF, 2017.
- CABELLO, F.P. Riegos localizados de alta frecuencia: goteo, microaspersión, exudación. 3ª ed. Madri: Mundi-Prensa, 513p.,1996.
- CADONÁ, E. A.. Contaminação da água pelo uso agrícola de dejetos de suínos na bacia hidrográfica rio Coruja/Bonito, Braço do Norte/SC. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.
- CASTILHO, L.R., MEDRONHO, R.A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. Minerals Engineering, Amsterdam, v. 13, n. 2, p. 183-91, 2000.
- CETEM. Drenagem ácida de minas: um dos passivos ambientais das áreas de mineração de carvão no Sul do país. Verbetes, 2013.
- CLEASBY, J.L.. Source water quality and pretreatment options for slow filters. In: Logsdon, G.S. (ed.) Slow Sand Filtration. ASCE, Nova Iorque, E.U.A., 1991.
- DAVIES-COLLEY, R.J., SMITH, D.G.. Turbidity, suspended sediment, and water clarity – a review. J Am Water Resour Assoc 37(5): 2085-1101, 2001.

DI BERNARDO, L.. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água, vols. 1 e 2. ABES, Rio de Janeiro, 1993.

DI BERNARDO, L., BRANDÃO, C.C.S., HELLER, L. Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. Rio de Janeiro: ABES, 1144 p., 1999.

DI BERNARDO, L.(coord.); MENDES, C.G.N.; BRANDÃO, C.C.S., SENS, M.L., PÁDUA, V.L. Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. ABES, Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, 480p, 2003.

DI BERNARDO, L. & DANTAS, A.D.B. Métodos e técnicas de Tratamento de Água. São Carlos, RiMa, 2ed.2.v,1565 p., 2005.

DI BERNARDO, L.; DE LUCA, S. J.; KURODA, E. K.; PEGORER, M. G. L. Oxidação. In: PÁDUA, V. L. (coord.) Contribuição ao Estudo da Remoção de Cianobactérias e Microcontaminantes Orgânicos por meio de Técnicas de Tratamento de Água para Consumo Humano. Rio de Janeiro. ABES, p.23-81, 2006.

EMBRAPA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 46 – Solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. p.3-22 p., 2004.

EMBRAPA. Mapa de Solos do Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

EMBRAPA. Padronização de Métodos para Análise Granulométrica no Brasil. Comunicado Técnico 66, ISSN 1517-5685, Rio de Janeiro-RJ, 2012.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília DF: Embrapa, 5ª ed., 2018.

FLINTOFF, B.C; PLITT, L.R.; TURAK, A.A. Cyclone modeling: a review of present technology. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum Bulletin, v.80, n. 905, p.39-50,1987.

GUEDES, T. L.. Avaliação do desempenho de um sistema de filtração em margem de rio com bombeamento fotovoltaico. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

GRAHAM, M. J. D.; MBWETTE, T. S. A. Improving the efficiency of slow sand filtration with nonwoven synthetic fabrics. Filtration & separation, n. February, p. 46–50, 1987.

GRISCHEK, T.; RAY, C. Bank filtration as managed surface groundwater interaction. International Journal of Water, v. 5, n. 2, p.125–139, 2009.

HADLICH, G. M.. Poluição hídrica na Bacia do rio Coruja-Bonito (Braço do Norte, SC) e suinocultura: uma perspectiva sistêmica. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

HEALTH CANADA. Guidelines for Canadian drinking water quality: guideline technical document – turbidity. Ottawa, Ontario: Water, Air and Climate Change Bureau, Healthy

Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2012. (www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/turbidity/index-eng.php, acessado em 02/08/2020).

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. Abastecimento de água para consumo humano. UFMG, ed. 2, 872p., 2010.

HENDRICKS, David. **Fundamentals of water treatment unit processes: physical, chemical, and biological**. Boca Raton: Crc Press, 928 p., 2010.

HESPANHOL, I. Filtração Lenta. In: Azevedo Neto, J.M. de & Vilela, S.M. – Técnicas de Tratamento e Abastecimento de Água. CETESB/ASC ed. São Paulo: [s.n.]. p. 225–256, 1987.

HORIBA. Method Expert: Guided, Automated Method Development for the LA-950/960. Horiba Instruments, Inc, 2014.

HUISMAN, L.; WOOD, W. Slow sand filtration. Geneva: World Health Organization, 1974.

JAHANSHAH, M., TAGHIZADEH, M. M.. Pre-sedimentation tank effects on water treatment unit operation. Environmental quality, vol. 28, p. 35-42, 2018.

LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água – 3ª ed. Campinas, São Paulo: Editora Átomo, 2010.

KWAK D. H., YOO S. J., SOHN B.Y. Performance of Presedimentation and Dissolved Air Flotation to Overcome Highly Turbid Raw Water, Environmental Engineering Science, 27(2):127, 2010.

LÓPEZ, J.R.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNANDEZ, J.F.G. Riego localizado. Madri: Mundi-Prensa, 405p., 1992.

LIMA, J. A. P.; CAPELO-NETO, J.. Dupla filtração modificada utilizando filtro de pressão a montante de filtro ascendente no tratamento de águas eutrofizadas. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n.1, p. 89-102, 2015.

MAILAPALLI, D. R.; MARQUES, P. A. A.; THOMAS, K. J. **Performance evaluation of hydrocyclone filter for microirrigation**. Engineering Agricultural, Jaboticabal, v. 27, n. (2), p. 373-382, 2007.

MARQUES, R. Variabilidade da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão/SC de 1946 a 2006. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, p. 39, 2009

MEDEIROS, D. S.. A mobilização de elementos perigosos, depois de uma precipitação intensa, na bacia hidrográfica do rio Tubarão, estado de Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais) Universidade La Salle, Canoas/RS, p. 55, 2017.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P.. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2016. 2008 p. Tradução de: Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa.

MIKELS, M. S.. Characterizing the influence of surface water on water produced by collector wells. *Journal American Water Works Association*, 84:9, p. 77-84, 1992.

NEW ZEALAND. Ministry of Health. Treatment options for small drinking -water supplies: Resources for drinking water assistance programme. 42 p., 2007.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Guidelines for drinking-water quality. 2^a ed, vol. 1. Recommendations, 2005.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Water quality and health – Review of turbidity: Information for regulators and water suppliers. Technical brief. 2017.

PETER-VARBANETS, M.; ZURBRÜGG, C.; SWARTZ, C.; PRONK, W.. Decentralized systems for potable water and the potencial of membrane technology. *Water Research*, v. 43, n 2, p. 245-265, 2009.

PIZZOLATTI, B. Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

PRADO, J. P. B., NÓBREGA, M. T. Determinação de perdas de solo na bacia hidrográfica do córrego Ipiranga em Cidade Gaúcha, Estado do Paraná, com aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS). *Acta Sci. Technol.*, Maringá, v. 27, n. 1, p. 33-42, Jan./June, 2005.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 30, n. 10, p. 1283, 2005.

REID, I.; BARTHURST, J. C.; CARLING, P. A.; WALLING, D. E.; WEBB, B. Sediment Erosion, Transport and Deposition. In: THORNE, C. R.; HEY, R. D. & NEWSON, M. D. *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. New York: John Wiley & Sons, 1997. p. 95-135.

RICHTER, C.A.; AZEVEDO NETTO, J.M. Tratamento de Água. Tecnologia Atualizada. São Paulo, Edgard Blücher, 332 p, 1991.

RIETEMA, K. Performance and design of hydrocyclone I: general considerations. *Chemical Engineering Science*, v.15, n.3/4, p.298-302, 1961.

ROMERO-ESQUIVEL L. G., SENS M. L., PIZZOLATTI B. S. Potencial de aplicação da filtração em margem em Santa Catarina, Brasil (Potential application of bank filtration in Santa Catarina, Brazil). *Interciencia* 41:p.740–747, 2016.

SAMMARRAEE M.A., CHAN A., SALIM S.M., MAHABALESWAR U.S. Large-Eddy simulation basin of a water treatment plant.Part 1:particle settling performance. *Chemical Engineering Journal*, 152:307-314, 2009.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Planejamento. Diretoria de Estatística e Cartografia. Atlas geográfico de Santa Catarina: diversidade da natureza – fascículo 2 – 2^a ed. Florianópolis: Editora UDESC, 2016.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Agricultura e Desenvolvimento Rural. Estudos dos instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos para o Estado de Santa Catarina e Apoio para sua implementação: Panorama dos Recursos Hídricos em Santa Catarina. Consórcio Engecorps-Tetraplan-Lacaz Martins, 2005.

SDM. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão e Complexo Lagunar, Santa Catarina, 2002.

SILVA, M.A.P. da. Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho. 1989. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1989.

SILVEIRA, A.A., Remoção de algas da água da lagoa do Peri através de filtração direta descendente com pré - filtração mecânica em micropeneiras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p.117, 2003.

SOUZA, F. J.; VIEIRA, L.G.M.; DAMASCENO, J.J.R.; BARROZO, M.A.S. Analysis of the influence of the filtering medium on the behavior of the filtering hydrocyclones. Power Technology, Lausanne, v. 107, n. 3, p. 259-67, 2000.

STOLF, M. A., HUNG, M. N. W. B., SCHULTZ, G. B., SANOS, I. Estimativa da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas e transferência de sedimentos aos canais da bacia do rio Piraquara-PR. XII Simpósio Nacional de Geomorfologia, União da Geomorfologia Brasileira. 2018.

TAVARES, V. Pré-tratamento de água através de separador centrífugo para aplicação em filtração direta. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

TISUTIYA, M. T. Abastecimento de água. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 3ª ed., p.88-91, 2006.

UNICEF, WORLD HEALTH ORGANIZATION. Progress on sanitation and drinking water—2015 update and MDG assessment. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2015

UNITED NATIONS. 2015. General Assembly Resolution A/RES/70/1. Transforming Our World, the 2030 Agenda for Sustainable Development. 35 p..

VERAS, L.; DI BERNARDO, L. Water treatment by multistage filtration systems-MSF. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 13, n. 1, p. 109–116, 2008.

VETORETTI, A.. História de Tubarão: das origens ao século XX. Prefeitura de Tubarão, Tubarão/SC, 430 p., 1992.

VISSCHER, J. T. et al. Slow Sand Filtration for Community Water Supply. 149 p., 1987.

VON SPERLING, M. Estudos de modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte: UFMG, 2007. Vol. 7. 452 p.

WEINER, E. R.. Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide. CRC Press, 2ª edição, 442 p., 2007.

Zumach, R. Enquadramento de curso de água: rio Itajaí-açú e seus principais afluentes em Blumenau. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

<http://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/> (Data do acesso: 02/02/2019)

https://www.amiad.com/files/saf_a4_indus_en_for_cd.pdf (Data do acesso: 30/03/2019)

https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_21_2212200611544.html (Data de acesso: 01/03/2020)

<https://www.aqseptence.com/app/en/products/max-flow-passive-intake-screen/> (Data do acesso: 24/09/2019)

<https://www.aqseptence.com/app/en/products/johnson-passive-intake-screens/> (Data do acesso: 24/09/2019)

<https://www.aqseptence.com/app/en/products/jois-johnson-offshore-intake-systems/> (Data do acesso: 24/09/2019)

http://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/bacias_hidrograficas/bacias_hidrograficas_sc.pdf (Data do acesso: 08/12/2019)

https://d15197oqcgwsnl.cloudfront.net/wp-content/uploads/sites/7/2015/06/21_P_BR_1.pdf?x28941 (Data do acesso: 23/09/2019)

https://d15197oqcgwsnl.cloudfront.net/wp-content/uploads/sites/7/2016/07/Drum-Screen-Brochure-0616_WEB.pdf?x28941 (Data do acesso: 23/09/2019)

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1940-1949/decreto-lei-4613-25-agosto-1942-414455-publicacaooriginal-1-pe.html> (Data do acesso: 12/04/2020).

<https://www.engie.com.br/complexo-gerador/usinas/complexo-termeletrico-jorge-lacerda/>(Data do acesso: 12/04/2020).

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76389-3-outubro-1975-424990-publicacaooriginal-1-pe.html>(Data do acesso: 12/04/2020).

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-7347-24-julho-1985-356939-publicacaooriginal-1-pl.html>(Data do acesso: 26/04/2020).

<https://www.directindustry.com/pt/prod/amiad-water-systems/product-82967-940657.html>
(Data do acesso: 05/07/2020).

<https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-08/documents/federal-water-pollution-control-act-508full.pdf> (Data do acesso: 24/09/2019)

<https://www.evoqua.com/en/brands/intake-screens> (Data do acesso: 23/09/2019)

<http://www.funasa.gov.br/panorama-do-saneamento-rural-no-brasil> (Data do acesso: 28/02/2019)

<http://ftc.com.br/a-empresa/historia> (Data do acesso: 12/04/2020)

<https://hubert.nl/wp-content/uploads/2016/02/Hubert-bandscreen-skid.pdf> (Data do acesso: 23/09/2019)

<http://www.jashindia.com/products/screening-equipments/> (Data do acesso: 23/09/2019)

<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf> (Data do acesso: 02/12/2018)

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm

http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf

<http://indoutama.com/image/files/multidisc.pdf> (Data do acesso: 24/09/2019)

<https://geoportal.cprm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=a50bb1b7187149f19baca36458d9c9f7#> (Data do acesso: 07/12/2019)

http://www.siecesc.com.br/meio_ambiente (Data do acesso: 26/04/2020)

http://www.sirhesc.sds.sc.gov.br/sirhsc/conteudo_visualizar_dinamico.jsp?idEmpresa=29&idMenu=288&idMenuPai=274 (Data do acesso: 07/12/2019)

APÊNDICE A – Planilha com todos os resultados das amostras realizadas com as três peneiras.

Peneira	Turbidez água bruta (uT)	Vazão (L/h)	Posição T	Posição Q	pH	Turbidez água peneirada (uT)	% remoção de turbidez	Taxa de abertura (cm ² /L.min)
1	124	300	1	-1		118	4,84%	53,89
1	136	300	1	-1		120	11,76%	53,89
1	96	300	1	-1		94,3	1,77%	53,89
1	59	650	0	0	7,1	55,5	5,93%	24,87
1	81,7	650	0	0		73,3	10,28%	24,87
1	50,7	650	0	0		47,8	5,72%	24,87
1	177	1000	1,25	1	6,78	137	22,60%	16,17
1	167	1000	1,25	1	6,78	164	1,80%	16,17
1	147	1000	1,25	1	6,78	135	8,16%	16,17
1	43,8	1000	-1	1		42,1	3,88%	16,17
1	104	300	1	-1		97,5	6,25%	53,89
1	107	300	1	-1		97,1	9,25%	53,89
1	75,2	650	0	0		67,1	10,77%	24,87
1	45,2	1000	-1	1		38	15,93%	16,17
1	42,5	300	-1	-1		35,8	15,76%	53,89
1	42,6	300	-1	-1		37,9	11,03%	53,89
1	74,9	650	0	0		65,9	12,02%	24,87
1	46,4	1000	-1	1		40	13,79%	16,17
1	42	300	-1	-1		35,3	15,95%	53,89
2	59	650	0	0	7,1	55,1	6,61%	24,87
2	53,1	1000	-1	1	6,93	48,5	8,66%	16,17
2	60	1000	-1	1	6,98	56,4	6,00%	16,17
2	124	300	1	-1		121	2,42%	53,89
2	136	300	1	-1		119	12,50%	53,89
2	177	1000	1,25	1	6,78	166	6,21%	16,17
2	167	1000	1,25	1	6,78	159	4,79%	16,17
2	138	1000	1	1		132	4,35%	16,17
2	81,7	650	0	0		66,5	18,60%	24,87
2	54,9	650	0	0		47	14,39%	24,87
2	42,3	1000	-1	1		39,6	6,38%	16,17
2	124	1000	1	1		112	9,68%	16,17
2	120	1000	1	1		111	7,50%	16,17
2	76,6	650	0	0		69	9,92%	24,87
2	77,4	650	0	0		66,1	14,60%	24,87
2	40,4	300	-1	-1		37,4	7,43%	53,89
2	42,5	300	-1	-1		35,7	16,00%	53,89
2	42,6	300	-1	-1		35,3	17,14%	53,89
2	43,7	300	-1	-1		39,8	8,92%	53,89
2	42	1000	-1	1		38,2	9,05%	16,17
3	60	650	0	0	6,98	58,4	2,67%	24,87
3	57,2	650	0	0	6,98	56,4	1,40%	24,87

Peneira	Turbidez água bruta (uT)	Vazão (L/h)	PosiçãoT	Posição Q	pH	Turbidez água peneirada (uT)	% remoção de turbidez	Taxa de abertura (cm²/L.min)
3	58,1	650	0	0	6,98	57,1	1,72%	24,87
3	124	300	1	-1		123	0,81%	53,89
3	136	300	1	-1		124	8,82%	53,89
3	177	300	1,25	-1	6,78	173	2,26%	53,89
3	154	300	1,25	-1	6,78	153	0,65%	53,89
3	147	300	1	-1	6,78	140	4,76%	53,89
3	148	300	1	-1		138	6,76%	53,89
3	73,6	650	0	0		63,2	14,13%	24,87
3	91,7	1000	1	1		89,1	2,84%	16,17
3	50,7	650	0	0		48,1	5,13%	24,87
3	26,9	1000	-1	1		26,2	2,60%	16,17
3	29,1	1000	-1	1		27,2	6,53%	16,17
3	28,4	300	-1	-1		25,8	9,15%	53,89
3	29,5	300	-1	-1		27	8,47%	53,89
3	29,6	300	-1	-1		27,4	7,43%	53,89
3	29,8	1000	-1	1		26	12,75%	16,17
3	125	1000	1	1		111	11,20%	16,17
3	109	1000	1	1		103	5,50%	16,17
3	113	1000	1	1		106	6,19%	16,17
3	108	300	1	-1		100	7,41%	53,89
3	83,2	650	0	0		65	21,88%	24,87

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

ANEXO A – Licença do software de estatística Minitab.