

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Graziele de Moraes

**Métodos de Abrandamento de Água para Abastecimento:** estudo de caso Habitasul -  
Jurerê Internacional

Florianópolis

2021

Graziele de Moraes

**Métodos de Abrandamento de Água para Abastecimento: estudo de caso Habitasul -  
Jurerê Internacional**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel/Licenciado em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr Mauricio Luiz Sens.

Coorientadora: Ana Maria Beims Lopes

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Moraes, Grazielle de

Métodos de Abrandamento de Água para Abastecimento :  
estudo de caso Habitasul - Jurerê Internacional / Grazielle  
de Moraes ; orientador, Maurício Luiz Sens,  
coorientadora, Ana Maria Beims Lopes, 2021.

57 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,  
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Métodos de  
Abrandamento. 3. Filtração por Membranas. 4. Troca Iônica.  
5. Precipitação Química. I. Sens, Maurício Luiz . II. Beims  
Lopes, Ana Maria. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.  
IV. Título.

Graziele de Moraes

**Métodos de Abrandamento de Água para Abastecimento:** Estudo de Caso Habitasul -  
Jurerê Internacional

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel/Licenciado em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 12 de fevereiro de 2021.

---

Prof.(a) Maria Elisa Magri, Dr (a).  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Mauricio Luiz Sens, Dr.  
Orientador  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Claudia Lavina Martins, Dr.(a)  
Avaliadora  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

---

Tiago Burgard, M.e.  
Avaliador  
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, irmãs e sobrinhos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha mãe Terezinha e ao meu padrasto Jefferson por terem fornecido o suporte necessário durante minha vida acadêmica.

Ao meu pai Orides e madrasta Ana Paula pelo apoio.

Às minhas irmãs Greice, Gabriela, Jéssica, Cristiane e Kamily pela amizade e parceria.

Aos meus sobrinhos Marcos, Lucas, Livia, Laura, Lucca e aos outros que vierem, por me inspirarem a querer um mundo melhor.

Ao meu fiel companheiro Bryan.

Aos amigos que fiz durante a vida, em especial à Mariana, Maria Rute e Thuanny.

Ao meu orientador Maurício, coorientadora Ana pela paciência e dedicação e aos convidados da banca Claudia e Tiago.

A todos os professores que passaram pela minha formação, da Escola de Educação Básica Padre Anchieta, do Instituto Federal de Santa Catarina e da Universidade Federal de Santa Catarina. Em especial aos professores de teatro Camila Aschermann e Toni Edson e professor de capoeira Christian Muleka Mwewa que foram a minha primeira referência de ensino superior e minha inspiração para entrar no universo acadêmico.

Ao SAE pela oportunidade e experiência e pelos colegas que fiz, em especial aos degustadores da pesquisa Suhellen, Paulo, Vinicius, Suelen e Moacir.

Obrigada à todas as pessoas que passaram, permaneceram ou ainda vão passar pela minha vida. Acredito que todo mundo que encontra nosso caminho nos ensina algo e nos faz ser quem somos.

## RESUMO

A dureza é um parâmetro químico frequente em áreas com a presença de rochas calcárias, responsáveis pela dissolução de cálcio e magnésio na água. De acordo com a Portaria Consolidada nº 5 do Ministério da Saúde (2017), a dureza total máxima permitida para atender aos padrões de potabilidade é de 500 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . No consumo humano, a água dura pode apresentar propriedades organolépticas desagradáveis, ocasionar maior consumo de sabão e promover incrustações em tubulações de água quente, mesmo estando abaixo de 500 mg/L. Embora forneça água tratada de dureza adequada aos padrões de potabilidade, a ETA Habitasul – Jurerê Internacional pretende reduzir a concentração desse parâmetro a fim de mitigar as desvantagens exibidas. Os métodos de abrandamento mais citados por diversos autores são a troca iônica, filtração por membranas e precipitação química. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo propor um método de abrandamento, dentre os três citados, para a ETA Habitasul, que seja capaz de reduzir a dureza a ponto de não ser mais perceptível ao paladar. Buscou-se primeiramente compreender a natureza da dureza através da análise de uma série histórica de dados físico-químicos da água. A fim de identificar a concentração mínima em que a dureza é perceptível ao paladar humano, efetuou-se um teste padronizado de sabor, sendo assim possível delimitar a eficiência de remoção do tratamento. A partir disso, pode-se estimar a viabilidade técnica e econômica de cada método. Na comparação entre as tecnologias, considerou-se a mesma produção de água tratada, a uma vazão de 70 L/s, 24 h/d, constante ao longo do ano. Para a viabilidade técnica, realizou-se ensaios laboratoriais, no caso troca iônica e precipitação química. No método por membranas, a viabilidade técnica ocorreu apenas por revisão bibliográfica. Para viabilidade econômica, consultou-se empresas privadas sobre os custos de investimento e custo fixos para todos métodos. Os resultados demonstraram que a água tratada para o abastecimento da população do empreendimento possui dureza dentro dos parâmetros exigidos, cerca de 200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . A adição de coagulante sulfato de alumínio na ETA contribui para transformar a dureza temporária em permanente, o que dificulta sua remoção. Já o teste de sabor indicou que a concentração mínima percebida pelo paladar foi de 60 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . Por isso, foi preciso encontrar um processo de abrandamento cuja eficiência mínima fosse de 70%. Os processos de troca iônica e nanofiltração apresentaram maior eficiência em relação à precipitação química, contudo, os custos também foram mais elevados. A troca iônica por abrandadores com resina catiônica se mostrou a alternativa mais indicada para o SAE, se consideradas as viabilidades técnica e econômica em paralelo.

**Palavras-chave:** Água Dura. Métodos de Abrandamento de Água. Troca Iônica. Filtração por Membranas. Precipitação Química.

## RESUMÉ

La dureté est un paramètre chimique fréquent dans les zones avec la présence de roches calcaires, responsables pour la dissolution du calcium et du magnésium dans l'eau. Selon l'arrêté n ° 5 du ministère de la Santé (2017), la dureté totale maximale autorisée pour répondre aux normes de potabilité est de 500 mg/L de CaCO<sub>3</sub>. Dans la consommation humaine, l'eau dure peut avoir des propriétés organoleptiques désagréables, entraîner une plus grande consommation de savon et favoriser les incrustations dans les conduits d'eau chaude, même en dessous de 500 mg/L. Bien que l'ETA Habitasul - Jurerê Internacional fournisse de l'eau traitée d'une dureté adéquate aux normes de consommation, elle espère réduire la concentration de ce paramètre afin d'atténuer les inconvénients indiqués. Les méthodes d'adoucissement les plus citées par plusieurs auteurs sont l'échange d'ions, la filtration membranaire et la précipitation chimique. Dans ce contexte, la présente étude visait à proposer une méthode d'adoucissement, parmi les trois mentionnées, pour l'ETA Habitasul, capable de réduire la dureté au point qu'elle ne soit plus perceptible au goût. Il a été d'abord cherché à comprendre la nature de la dureté à travers l'analyse d'une série historique de données physico-chimiques de l'eau. Afin d'identifier la concentration minimale à laquelle la dureté est perceptible par le goût humain, un test de goût standardisé a été réalisé, permettant de délimiter l'efficacité d'élimination du traitement. A partir de là, il a été possible d'estimer la faisabilité technique et économique de chaque méthode. Lors de la comparaison des technologies, la même production d'eau traitée a été considérée, à un débit de 70 L/s, 24 h/j, constant toute l'année. Pour la faisabilité technique, des tests de laboratoire ont été effectués, dans le cas d'échange d'ions et de précipitation chimique. Pour la méthode de filtration membranaire, la faisabilité technique ne s'est faite que par une revue bibliographique. Pour assurer la viabilité économique, des entreprises privées ont été consultées sur les coûts d'investissement et les coûts fixes pour les trois méthodes. Les résultats ont montré que l'eau traitée pour l'approvisionnement de la population a une dureté dans les paramètres requis, environ 200 mg/L de CaCO<sub>3</sub>. L'ajout de coagulant sulfate d'aluminium dans l'ETA contribue à transformer la dureté temporaire en permanente, ce qui rend son élimination difficile. Le test de goût a indiqué que la concentration minimale perçue par le goût était de 60 mg/L de CaCO<sub>3</sub>. Par conséquent, il était nécessaire de trouver un processus d'adoucissement avec une efficacité minimale de 70%. Les processus d'échange d'ions et de nanofiltration ont montré une plus grande efficacité par rapport à la précipitation chimique, mais les coûts étaient également plus élevés. L'échange d'ions pour les adoucissants avec résine cationique s'est avéré être l'alternative la plus appropriée pour SAE, compte tenu de la faisabilité technique et économique en parallèle.

**Mots-clés:** Eau Dure. Méthodes d'Adoucissement d'Eau. Échange Ionique. Filtration Membranaire. Précipitation Chimique.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de um abrandador de troca iônica.....	20
Figura 2 - Resina catiônica fortemente ácida Purolite® C100.....	21
Figura 3 - Esquema do processo de separação por membranas conforme a pressão e tamanho do poro.....	23
Figura 4 - Representação do processo de osmose reversa.....	24
Figura 5 - Variação de dureza, alcalinidade e pH para várias dosagens de cal.....	26
Figura 6 - Taxas de remoção de dureza (%) para as concentrações de Ca(OH) <sub>2</sub> nos diferentes métodos.....	27
Figura 7 - Fluxograma da metodologia do estudo.....	29
Figura 8 - Localização da ETA no bairro de Jurerê. ....	30
Figura 9 - Fluxograma de tratamento da ETA. ....	31
Figura 10 - Gráfico de dureza total e alcalinidade da água bruta durante o período de 12 anos.....	38
Figura 11 - Eficiência na remoção da dureza por dosagem de resina catiônica - tempo de contato 30 minutos.....	40
Figura 12 - Fluxo de vazões e concentração de dureza em um abrandador de resina catiônica.....	40
Figura 13 - Orçamento de abrandador por troca iônica.....	42
Figura 14 - Fluxo de vazões para sistema de membranas OR e NF.....	44
Figura 15 – Orçamento de osmose reversa. ....	45
Figura 16 - Custo anual (Nanofiltração).....	46
Figura 17 - Custo anual (Osmose Reversa).....	46
Figura 18 - Comportamento de diferentes parâmetros por dosagens de cal hidratada.....	48
Figura 19 - Concentração de parâmetros e eficiência na remoção da dureza com diferentes dosagens de Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	48
Figura 20 - Concentração de parâmetros e eficiência na remoção da dureza por diferentes dosagens de cal, sem adição de coagulante. ....	49
Figura 21 - Eficiência na remoção da dureza por diferentes dosagens de cal, utilizando PAC como coagulante. ....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Programação do Jartest .....	35
Quadro 2 – Relevância de diferentes parâmetros na implantação de cada método. ..	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da água quanto à dureza em outros países. ....	18
Tabela 2 - Determinação da componente causador da alcalinidade.....	19
Tabela 3 - Fluxo de água e retenção de cálcio por membrana. ....	25
Tabela 4 - Características da água bruta e água tratada, baseados em uma média de dados de um período de 12 anos.....	37
Tabela 5 - Teste preliminar de sabor. ....	38
Tabela 6 - Determinação do número limite de sabor. ....	39
Tabela 7 - Investimento inicial de abrandador de resina catiônica, por diferentes fornecedores.....	41
Tabela 8 - Custos mensais fixos de filtração por NF e OR. ....	47
Tabela 9 - Resultados do teste com cal, sem adição de coagulante. ....	49
Tabela 10 - Resumo de custos de abrandamento por precipitação química.....	51
Tabela 11 - Tabela de resumo de custos.....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	DUREZA NA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO .....	17
2.2	TÉCNICAS DE ABRANDAMENTO EXISTENTES.....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Troca Iônica .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Filtração por Membranas .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Precipitação Química .....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
3.1	APRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ÁGUA E ESGOTOS.....	29
3.2	CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO .....	32
3.3	DETERMINAÇÃO DO VALOR LIMITE DE DUREZA AO PALADAR .....	32
3.4	DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA DUREZA NECESSÁRIA .....	33
3.5	ESTIMATIVA DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA.....	33
<b>3.5.1</b>	<b>Troca iônica.....</b>	<b>33</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Filtração por membranas.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Precipitação química .....</b>	<b>34</b>
3.6	QUADRO COMPARATIVO DOS MÉTODOS .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>37</b>
4.1	CARACTERÍSTICA DA ÁGUA DE JURERÊ INTERNACIONAL .....	37
4.2	DETERMINAÇÃO DO VALOR LIMITE DE DUREZA AO PALADAR .....	38
4.3	DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA DUREZA NECESSÁRIA .....	39
4.4	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA .....	39

<b>4.4.1</b>	<b>Troca iônica.....</b>	<b>39</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Filtração por Membranas .....</b>	<b>43</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Precipitação Química .....</b>	<b>47</b>
<b>4.5</b>	<b>RESUMO DOS MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento convencional de água para consumo humano não é capaz de remover a dureza de água brutas, em nenhuma etapa em que é composto: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. Pelo contrário, o processo geralmente aumenta a concentração final de dureza na água, agravando mais a problemática decorrente deste parâmetro em excesso (MIERZWA, 2005).

Neste contexto, Mierzwa (2005) aponta três principais técnicas de abrandamento, ou seja, técnicas capazes de remover substâncias responsáveis pela dureza da água. Essas técnicas consistem no abrandamento pela cal através de precipitação química, na troca iônica e filtração por membranas.

A dureza é um parâmetro químico frequente em áreas com a presença de rochas calcárias, responsáveis pela dissolução de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na água. A dureza pode ser expressa em mg/L de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (SILVA et al., 2017).

Em corpos d'água a dureza é frequentemente associada à cátions bivalentes, como  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  que, em condições de supersaturação, reagem com ânions, formando precipitados. O ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) estão presentes na água na forma de complexados e exercem pouca influência sobre a dureza (OLIVEIRA, 2020).

Se esses cátions reagem com ânions do tipo bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e/ou carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), a dureza é classificada como dureza carbonato – ou temporária – responsável pela alcalinidade da água. Se os cátions estão associados a ânions do tipo cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), principalmente, a dureza é classificada como não carbonato – ou permanente. A dureza total é a soma das durezas permanente e temporária (VON SPERLING, 2014).

Uma vez que a dureza presente na água bruta pode ocasionar problemas como sabor desagradável, incrustação ou corrosão de tubulações, precipitação do sabão, reduzindo a formação de espuma, em certos casos é necessário um tratamento adicional ao convencional para removê-la. Assim, de acordo com a Portaria nº 5 de 28 de setembro de 2017 do Ministério da Saúde, a dureza total máxima permitida para atender aos padrões de potabilidade é de 500 ppm em  $\text{CaCO}_3$ .

A ETA Habitasul, localizada em Florianópolis (SC) no bairro Jurerê, possui água bruta e tratada com dureza dentro dos padrões de potabilidade, porém ainda classificada como dura. Esta condição apresenta dificuldades de ordem socioeconômica, visto que a população relata dureza perceptível ao paladar e resistência à saponificação, além de incrustações nas tubulações

de água quente. Dessa forma, a empresa possui interesse em implantar um método de remoção de dureza no sistema para melhor atender ao consumidor.

Nesse contexto, o presente trabalho pretende auxiliar na escolha do melhor método de abrandamento para a ETA Habitasul, dentre a precipitação química, troca iônica e filtração por membranas, com objetivo de reduzir a dureza da água fornecida e diminuir os empecilhos relatados pelos consumidores. O estudo foi realizado nas dependências da ETA.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é propor um método de tratamento adicional àquele já implantado na Estação de Tratamento de Água da Habitasul, capaz de reduzir a dureza da água, a ponto que esta não seja mais perceptível ao paladar do consumidor.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a série histórica dos parâmetros físico-químicos da água bruta e água tratada da ETA-Habitasul;
- Quantificar a dureza detectável ao paladar humano, ou seja, o sabor desagradável ocasionado na água tratada;
- Determinar a eficiência necessária para remoção de dureza para o sistema de tratamento de água de Jurerê Internacional;
- Realizar uma estimativa da viabilidade técnica e econômica das três alternativas de abrandamento citadas, para implantação na ETA Habitasul – Jurerê Internacional.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DUREZA NA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

A principal fonte de dureza nas águas naturais é a sua passagem pelo solo, por meio da dissolução de rochas calcáreas pelo gás carbônico presente na água (PIVELI, 2001).

Segundo Piveli (2001), a dureza é classificada quanto aos cátions e ânions associados. Tais classificações permitem prever os tipos e dosagens de reagentes nos processos de abrandamento.

Quanto ao cátion, a dureza é classificada em dureza ao cálcio e dureza ao magnésio. Quanto ao ânion associado, a dureza é classificada como temporária e permanente. A dureza temporária é aquela em que o cálcio ou o magnésio se associam a carbonatos (ou bicarbonatos), por isso é conhecida como dureza carbonato. A mesma pode ser removida da água por precipitação, através de ebulição, incrustando-se em chuveiros, destiladores e outros sistemas de água quente. A dureza permanente, ou não-carbonato, ocorre quando o cálcio e o magnésio se associam principalmente a sulfatos. A dureza total é a soma das durezas temporária e permanente (PIVELI, 2001; VON SPERLING, 2014).

Richter e Netto (1991) e Von Sperling (2014) classificam as águas quanto à dureza, da seguinte maneira:

- Água mole: dureza  $< 50$  mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ;
- Água de dureza moderada: dureza entre 50 e 150 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ;
- Água dura: dureza entre 150 e 300 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ;
- Água muito dura: dureza  $> 300$  mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

De acordo com a Portaria nº 5 (2017) do Ministério da Saúde, a dureza total máxima permitida para atender aos padrões de potabilidade é de 500 ppm em  $\text{CaCO}_3$ . Piveli (2001) afirma que este padrão não é muito restritivo, pois uma água com 500 mg/L de dureza é classificada como “muito dura” mas, por outro lado, uma restrição muito severa poderia inviabilizar muitos abastecimentos públicos que utilizam água dura, por não disporem dos recursos necessários para a remoção da dureza ou abrandamento da água.

Ministérios da Saúde de outros países estabelecem classificações de dureza mais severas do que a brasileira, como Estados Unidos, França e Austrália, por exemplo. Na Tabela

1, observa-se que para os Estados Unidos uma água é considerada “muito dura” com 180 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

Tabela 1 - Classificação da água quanto à dureza em outros países.

Pais	Mole	Dureza moderada	Dura	Muito Dura
Brasil	0-50	50-150	150-300	>300
França	0-80	80-150	150-300	>300
EUA	0-60	61-120	121-180	>180
Austrália	0-60	60-120	120-200	>200

Von Sperling (2014) afirma que não há evidências de que a água dura cause problemas sanitários e estudos demonstram uma menor incidência de doenças cardíacas em locais cuja água de abastecimento possui dureza mais elevada. Contudo, em determinadas concentrações, a dureza confere sabor desagradável à água, precipitação do sabão, reduzindo a formação de espuma, o que demanda maior consumo, incrustação rígidas de tubulações de água quente e caldeiras, de difícil remoção - devido à maior precipitação do  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em temperaturas elevadas.

A alcalinidade é um parâmetro químico diretamente relacionado à dureza dos bicarbonatos e também é expressa em mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , a menos que essa alcalinidade esteja associada a bicarbonatos de sódio (Na) e potássio (K), neste caso a alcalinidade excederá a dureza (BLUMBERG, E.; AZEVEDO NETTO, 1956). Ela pode ser encontrada nas formas  $\text{HCO}_3^-$  ou  $\text{CO}_3^{2-}$  e hidróxido ( $\text{OH}^-$ ). Quando o pH da água se encontra acima de 9,4 pode-se associar a alcalinidade a hidróxidos e carbonatos, quando o pH está entre 8,3 e 9,4, está associada a carbonatos e bicarbonatos e pH entre 4,5 e 8,3, apenas bicarbonatos (VON SPERLING, 2014).

A alcalinidade parcial (AP) mede hidróxidos e metade dos carbonatos. É determinada por titulação com ácido forte em presença de fenolftaleína, por este motivo também é chamada de alcalinidade à fenolftaleína. A alcalinidade total (AT) mede a alcalinidade de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos presentes na água e é determinada por titulação com ácido forte em presença de alaranjado de metila (HEXIS, 2020). De acordo com o Portal Tratamento de Água (2008), o conhecimento da concentração destes íons fornece informações sobre as características corrosivas ou incrustantes da água analisada.

Ao analisar uma amostra é possível determinar que tipo de alcalinidade é predominante na água, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação da componente causador da alcalinidade.

Resultado	ALCALINIDADE		
	OH <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
AP = 0	Zero	Zero	AT
AP < AT/2	Zero	2AP	AT-2AP
AP = AT/2	Zero	2AP = AT	Zero
AP > AT/2	2AP-AT	2(AT-AP)	Zero
AP = AT	AT	Zero	Zero

Fonte: Hexis (2020).

Para Piveli (2001), a alcalinidade de bicarbonatos e carbonatos é equivalente à dureza temporária. O autor apresenta as seguintes relações:

- alcalinidade total < dureza total → dureza temporária com uma parcela de dureza permanente.
- alcalinidade total = dureza total → somente dureza temporária.
- alcalinidade total > dureza total → além da dureza com carbonatos de Ca/Mg, há também um excesso de alcalinidade com a presença de bicarbonatos e carbonato de sódio e potássio.

## 2.2 TÉCNICAS DE ABRANDAMENTO EXISTENTES

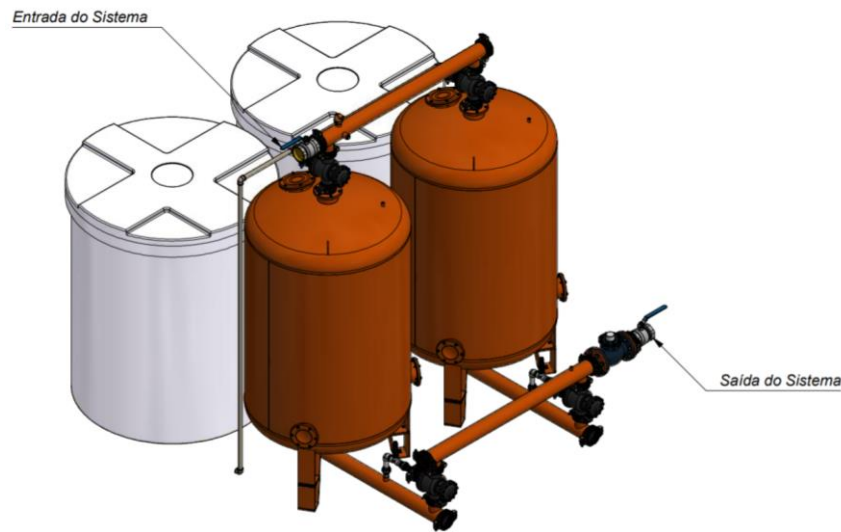
As técnicas de abrandamento mais citadas na literatura são a troca iônica, filtração por membranas e precipitação química. A seguir serão melhor detalhados cada um destes métodos.

### 2.2.1 Troca Iônica

Os zeólitos, também chamados de resinas de troca iônica, são trocadores iônicos que tem a propriedade de trocar o sódio, do qual são compostos, por outros íons, como o cálcio e o magnésio, removendo-os da água. Em estações de tratamento de água o abrandamento pode ser realizado através de leitos de zeólitos, semelhante aos filtros rápidos, onde a água a ser tratada passa pelo leito e o trocador retém seus íons. Após a saturação dos zeólitos é feita sua regeneração, com solução de sal (OLIVEIRA, 2020).

A Figura 1 é um exemplo de abrandador por troca iônica com tanque de regeneração acoplado:

Figura 1 - Desenho esquemático de um abrandador de troca iônica.



Fonte: Hidro Solo (2021)

Hailu et al. (2019) observaram diferentes variáveis para a remoção da dureza total de uma amostra, cuja concentração inicial era de 658,3 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ . Através de contato com zeólito e com os parâmetros ajustados de pH, tamanho de partícula, dosagem de zeólito, tempo de tratamento e temperatura sendo ajustados a, respectivamente, 6,9, 1,0 mm, 50 g/L, 30 minutos e 25°C, a concentração inicial de dureza foi reduzida para 125 mg/L, ou seja, uma remoção de 81,0% da dureza total.

Após a regeneração do zeólito, a 90°C em solução de 3 mol de cloreto de sódio, os autores obtiveram uma remoção da dureza total de 80,6%.

As resinas de troca iônica são matrizes insolúveis, normalmente encontradas como pequenas esferas (Figura 2), de 1 a 2 milímetros (BENNETT, 2007). Em contato com a água estas resinas podem liberar íons sódio ou hidrogênio (resinas catiônicas) ou hidroxila (resinas aniônicas) ao mesmo tempo em que captam desta água cátions e ânions, respectivamente (KREMER, 2020).

Figura 2 - Resina catiônica fortemente ácida Purolite® C100.



Fonte: Autora (2021)

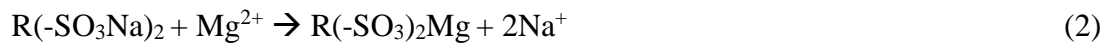
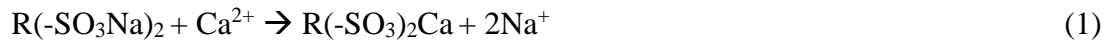
Mierzwa (2002) classifica as resinas como:

- Catiônica Fortemente Ácida (C.F.A): podem estar na forma de sal de sódio, quando são utilizadas para abrandamento da água; ou na forma de hidrogênio, quando são utilizadas para descarbonatação ou desmineralização da água. Também podem operar em uma ampla faixa de pH.
- Catiônica Fracamente Ácida (C.f.A): utilizadas para remoção de cálcio, magnésio e sódio, ligados somente a ânion fraco, como o bicarbonato e nunca aos ânions fortes, como sulfato, cloreto e nitrato. Essa resina é usada em águas com dureza temporária predominantemente elevada e atuam em pH do neutro ao alcalino.
- Aniônica Fortemente Básica (A.F.B): podem ser condicionadas na forma de hidroxila ou cloreto. São capazes de remover ânions fortes e fracos, tais como cloretos, sulfatos, nitratos, bicarbonatos e silicatos, tendo efeito em ampla faixa de pH (de 1 a 13).
- Aniônica Fracamente Básica (A.f.B): removem ânions de ácidos fortes, tais como sulfato, cloreto e nitrato, não removendo ânions fracos, como os bicarbonatos e silicatos. São úteis apenas na faixa de pH ácido.

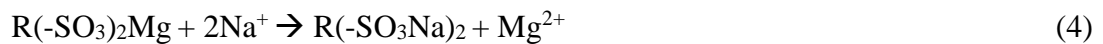
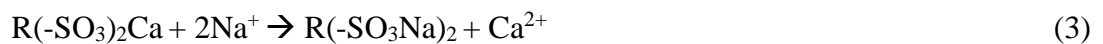
O método de abrandamento de água por resina de troca catiônica é utilizado para trocar principalmente íons de cálcio e magnésio por íons de sódio, evitando a posterior precipitação do carbonato de cálcio nos processos a jusante. A água passa através do leito de resina, que está na forma de sódio (Na). Os cátions polivalentes são absorvidos pela resina e íons de sódio são

liberados. Quando a resina é saturada ou tem sua eficiência reduzida, a regeneração deve ser feita com solução de salmoura (BENNETT, 2007).

As equações 1 e 2 abaixo mostram como se dá o processo de retenção de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na resina (R) (SILVA; CARVALHO, 2020):



As equações 3 e 4 demonstram como ocorre a regeneração da resina (SILVA; CARVALHO, 2020):



Silva e Carvalho (2020) garantem alta eficiência na remoção da dureza por troca iônica e não há geração de lodo ao final do processo, contudo, há a necessidade de regeneração da resina e destinação adequada do efluente salino da regeneração.

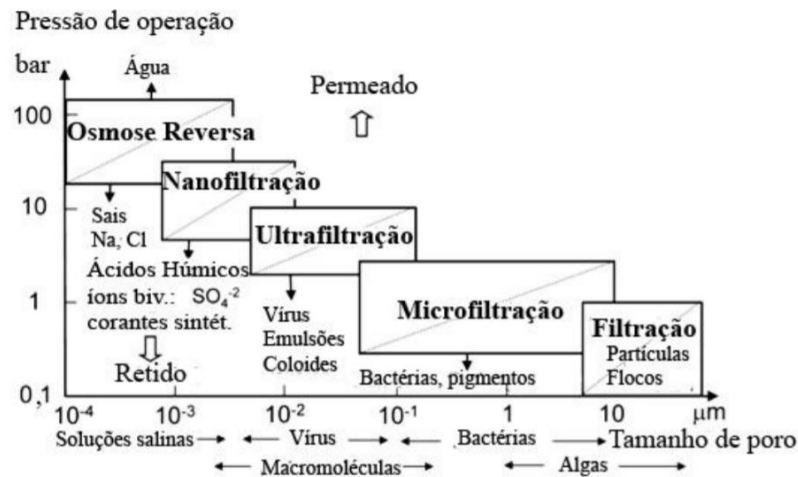
Como a água, ao sair dos trocadores iônicos, apresenta uma dureza praticamente nula, do ponto de vista econômico e do controle de corrosão, normalmente mistura-se a água tratada pelo abrandamento, com uma parte de água não tratada, de maneira a se obter um grau de dureza aceitável, pois não é recomendada a potabilidade de água isenta de sais (RICHTER; NETTO, 1991).

### 2.2.2 Filtração por Membranas

De um modo geral, as membranas podem ser divididas em não porosas, como as de osmose reversa (OR) e a nanofiltração (NF), e porosas, como as de microfiltração (MF) e a ultrafiltração (UF) (AQUINO, 2011). O tamanho do poro determina suas aplicações e materiais retidos e a pressão transmembrana exigida está intimamente ligada aos custos de operação (MORANDI, 2011). Suas estruturas variam, podendo ser de placas planas, espirais, capilares e tubulares.

Na Figura 3 são apresentados a porosidade e o tipo de material retido por cada uma das membranas citadas e a pressão exigida.

Figura 3 - Esquema do processo de separação por membranas conforme a pressão e tamanho do poro.



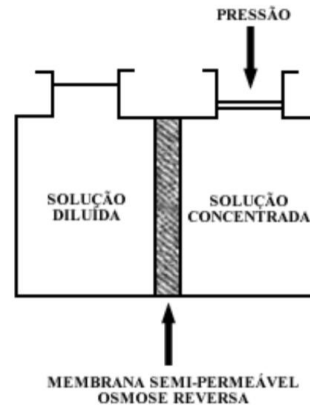
Fonte: Morandi (2011).

Pelo figura, considera-se que a NF e OR são as mais indicadas para a remoção de íons responsáveis pela dureza.

No processo natural de osmose, uma solução diluída segue o fluxo osmótico através de uma membrana semipermeável, em direção à coluna de solução salina concentrada. Ao atingir determinada altura, a coluna de água salina exerce uma pressão osmótica sobre a membrana que estabelece um equilíbrio estático entre as colunas de solução diluída e concentrada (OLIVEIRA; CARVALHO, 2020).

Na osmose reversa uma pressão, além da osmótica, é exercida sobre a água salina, como mostra a Figura 4, bombeando através da membrana uma água pura livre de sólidos dissolvidos, coloides, sólidos suspensos, bactérias, vírus e matéria orgânica (OLIVEIRA; CARVALHO, 2020).

Figura 4 - Representação do processo de osmose reversa.



Fonte: Frischkorn; Rocha Neto (2009).

Nesse processo, as membranas geram dois fluxos, um de permeado com os íons de dureza removidos, e outro de concentrado (ou rejeito), que pode ser usado para fins menos nobres ou apresentar uma destinação final adequada.

Diversas pesquisas utilizaram a nanofiltração como forma de tratamento para a remoção da dureza de águas para o abastecimento público (WATSON; HORNBERG, 1989; SCHAEP *et al.*, 1998; VAN DER BRUGGEN, 2003; WANG *et al.*, 2019).

Watson e Hornburg (1989) afirmam que os íons cálcio e magnésio são preferencialmente retidos por membranas de nanofiltração, em relação aos íons sódio e potássio. Em seu estudo, os autores observaram uma eficiência de remoção de dureza de 85% a 90% com membranas de nanofiltração (NF-70 e NF-50) e de 95% por osmose reversa de baixa pressão.

Schaep *et al.* (1998) analisaram três tipos de membranas de nanofiltração para remoção da dureza de uma água com concentração de cálcio de 130 a 158 mg/L e de magnésio de 9,1 a 10,3 mg/L. A seleção da membrana foi baseada na permeabilidade à água e na remoção de cálcio, já que a dureza é causada principalmente pela presença deste elemento.

As membranas testadas foram NF-70 (Dow-Filmtec), UTC 20 (Toray Industries) e UTC 60 (Toray Industries). A Tabela 3 abaixo apresenta os resultados de fluxo da água e retenção de cálcio para cada membrana.



Tabela 3 - Fluxo de água e retenção de cálcio por membrana.

Membrana	Fluxo de água a 10,2 kgf/cm <sup>2</sup> (L/hm <sup>2</sup> )	Retenção de Ca (%)
NF 70	123	99
UTC 20	166	96
UTC 60	148	72

Fonte: Schaep et al. (1998).

No abrandamento de águas superficiais é indicado um pré-tratamento com coagulação/floculação seguida de decantação, já que as membranas são facilmente incrustáveis por sólidos suspensos e danificadas por compostos oxidantes, como cloro ou óxidos de cloro (BRUGGEN; VANDECASTEELE, 2003).

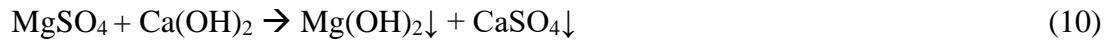
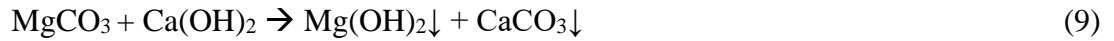
As pressões utilizadas na osmose reversa resultam em maiores custos. Ao final do processo é liberado um efluente concentrado de sais, cuja destinação pode ser realizada em corpos de água salgada, estações de tratamento esgotos, uso de poços de injeção profundos e mistura para uso como água de irrigação (BRUGGEN; VANDECASTEELE, 2003).

Para aumentar a vida útil das membranas, Oliveira e Carvalho (2020) recomendam que o pH da água a ser tratada não seja fortemente ácido ou alcalino e sua temperatura deve estar abaixo dos 30°C. Os autores recomendam também que a água esteja ausente de cloro livre, já que o mesmo é um oxidante de grande parte das membranas. As pressões de bombeamento não devem ser superiores a 90 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 2.2.3 Precipitação Química

O processo de abrandamento por precipitação química se dá pela adição de óxido de cálcio (CaO) – popularmente conhecida como cal –, responsável pela eliminação da dureza temporária, e/ou pelo carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) que fornece os íons necessários para a eliminação da dureza permanente (GLS, 2021). As equações abaixo demonstram como se dá esse processo (SILVA; CARVALHO, 2020):



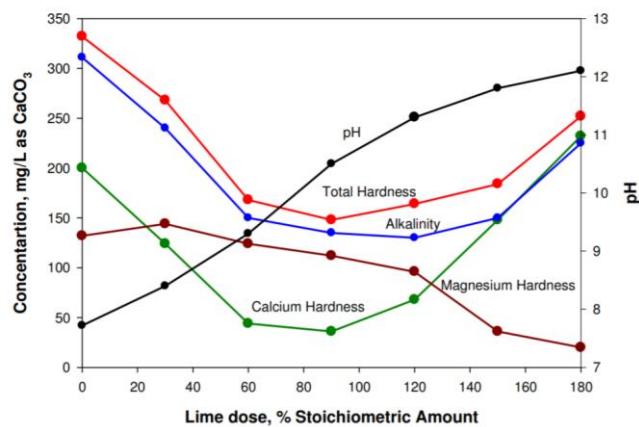


Durante a precipitação química o cálcio é removido da água na forma de precipitado de  $\text{CaCO}_3$  e o magnésio é removido como precipitado de  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Enquanto a dureza carbonato é removida pela adição de íons hidróxido e aumentando o pH, o cálcio restante, ou seja, a dureza não carbonatada, é removido pela adição externa de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (DEY; HERZOG; SRINIVASAN, 2007). O emprego de um coagulante e/ou de um floculante permitem melhorar o processo (GLS, 2006).

Comercialmente está disponível a cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) do tipo I (CH-I), cujos óxidos totais, responsáveis pela capacidade ligante do material, estão acima de 90% (ABNT, 2003),

Em seu estudo, Dey, Herzog e Srinivasan (2007) tiveram como objetivo determinar os efeitos de diferentes dosagens de cal, a uma concentração de 10 mg/mL, em parâmetros como dureza total, dureza de cálcio, dureza de magnésio, alcalinidade e pH, cujos valores iniciais apresentados foram respectivamente de 332 mg/L, 200 mg/L, 132 mg/L, 311 mg/L e 7,7. A Figura 5 apresenta os resultados.

Figura 5 - Variação de dureza, alcalinidade e pH para várias dosagens de cal.

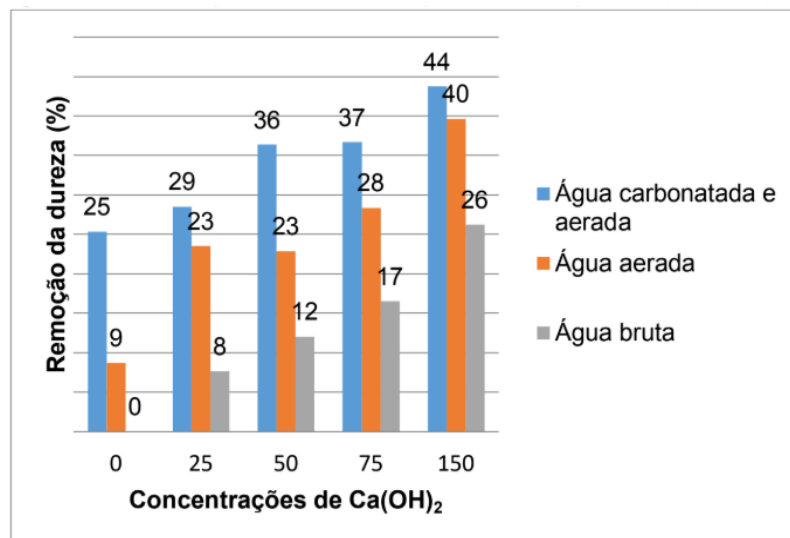


Fonte: Dey; Herzog; Srinivasan (2007).

Os resultados demonstraram que com 90% de dosagem de cal a remoção dos parâmetros de dureza total, dureza de cálcio e alcalinidade atingiram a eficiência máxima de respectivamente, 52%, 82% e 57%. Nessa concentração o pH foi aumentado para 11. A concentração de dureza do magnésio teve decréscimo até a concentração máxima de 180% de cal, onde a eficiência de remoção atingida foi de 85%.

A Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA/MG) realizou um estudo para o abrandamento de água do poço tubular no distrito de Quem Quem no município de Janaúba/MG (MARCAL-SILVA et al. 2017). A pesquisa consistiu em verificar a eficiência na remoção da dureza pela adição de diferentes dosagens de  $\text{Ca(OH)}_2$  em água bruta pura, água bruta após receber aeração e água bruta após ser aerada e carbonatada com  $\text{CO}_2$ . Ao final do tratamento, após a decantação dos sólidos durante 2 horas, as amostras ainda foram filtradas. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Figura 6 - Taxas de remoção de dureza (%) para as concentrações de  $\text{Ca(OH)}_2$  nos diferentes métodos.



Fonte: SILVA et al. (2017).

Os resultados mostraram maior taxa de redução da dureza, 44%, na água tratada pelo processo de carbonatação e aeração e com a utilização da maior concentração de  $\text{Ca(OH)}_2$ , de 150 mg/L. O tratamento da água bruta apenas com adição de cal obteve as menores eficiências na remoção da dureza, chegando a apenas 26% com a maior concentração de cal.

A precipitação química para a remoção da dureza é uma tecnologia bem estabelecida, contudo o processo exige utilização de produtos químicos, além de geração de lodo como

resíduo final (SILVA; CARVALHO, 2020). Os estudos também demonstraram que o método de adição de cal, por si só, não remove completamente a dureza da água. Além disso, em ETAs convencionais que utilizam a cal hidratada, as águas tratadas apresentam dureza geralmente superiores à das águas brutas pela reação da cal com o sulfato de alumínio, formando sulfato de cálcio (PIVELI, 2001).

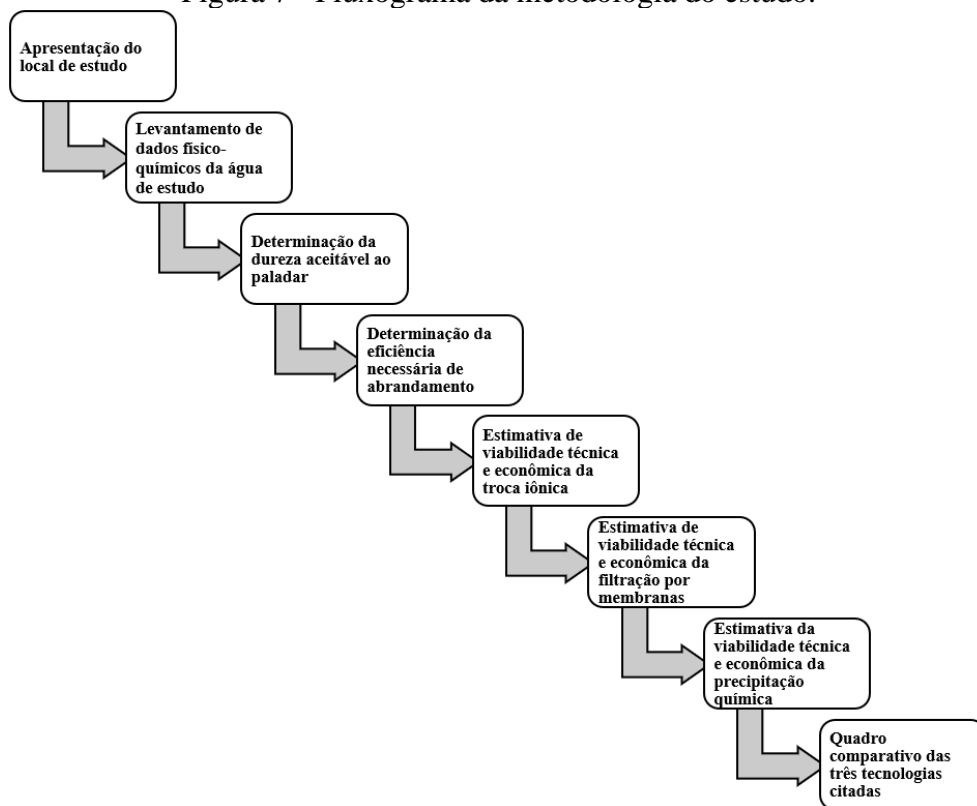
A utilização deste método também exige estabilização do pH, que estará elevado ao final do tratamento, devido a presença de hidróxido de cálcio em excesso. Essa estabilização pode ser feita pela adição de ácido ou pela recarbonatação da água. O processo de recarbonatação consiste na adição de  $\text{CO}_2$  à água e deve acontecer antes da filtração, pois forma carbonato e bicarbonato de cálcio. A adição de ácido pode ser feita com ácido sulfúrico ou clorídrico, que não forma carbonato de sódio e não necessita tratamento adicional, contudo pode ocorrer um aumento da dureza permanente pelo aumento da concentração de íons sulfato e cloretos, causando um inconveniente (MIERZWA, 2002).

### 3 METODOLOGIA

Neste estudo foi considerado que a captação de água bruta e produção de água tratada pela ETA – Habitasul seja de 70 L/s nas 24 horas diárias e durante todos os dias do ano, visando uma demanda futura.

A Figura 7 apresenta um fluxograma da metodologia utilizada para a realização deste estudo.

Figura 7 - Fluxograma da metodologia do estudo.



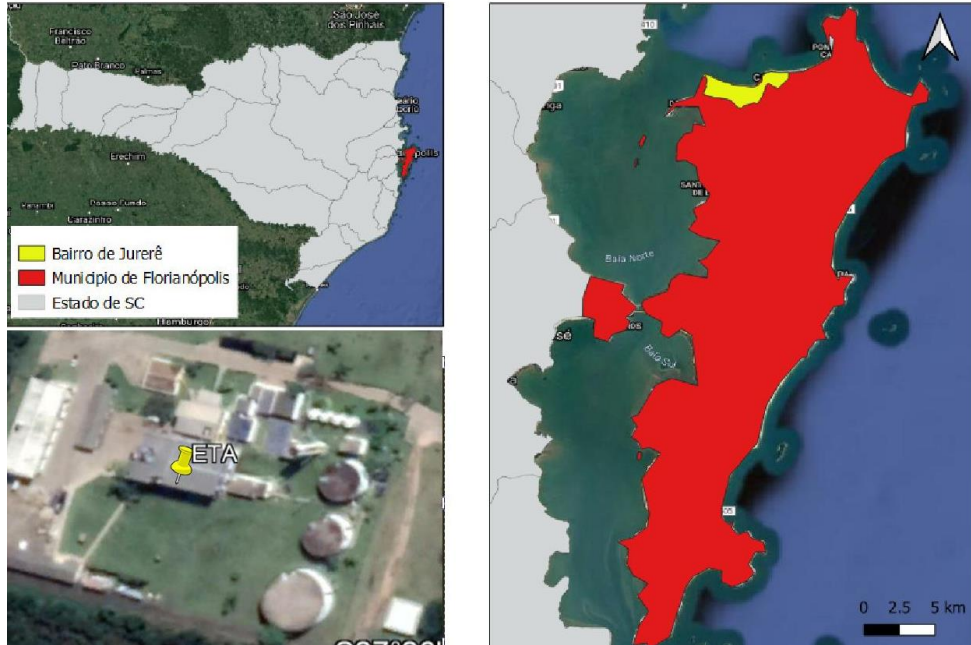
Fonte: Autora (2021).

#### 3.1 APRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE ÁGUA E ESGOTOS

O Sistema de Água e Esgotos (SAE) é uma unidade da empresa Habitasul Empreendimentos Imobiliários (HEI). Localizada no bairro Jurerê, em Florianópolis, o SAE é responsável pela gestão do saneamento no empreendimento “Jurerê Internacional (JI)” e é composto pela estação de tratamento de água (ETA) e pela estação de tratamento de esgotos (ETE).

A Figura 8 mostra a localização da ETA.

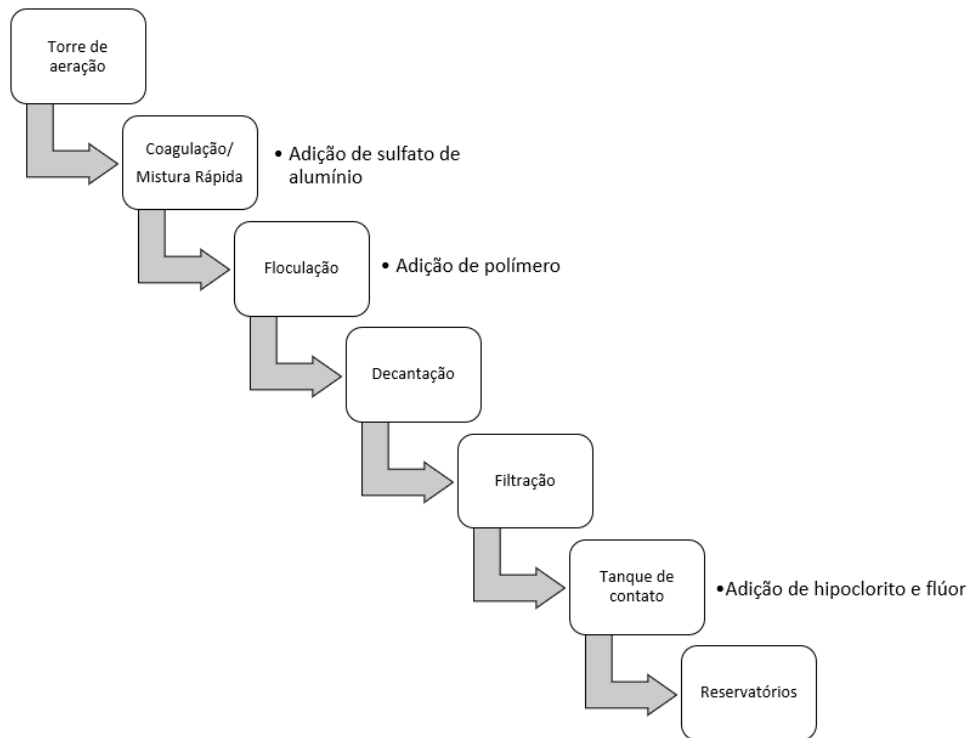
Figura 8 - Localização da ETA no bairro de Jurerê.



Fonte: Autora (2021)

A ETA conta com um sistema de tratamento convencional automatizado com capacidade de tratamento de 70 L/s. A Figura 9 - Fluxograma de tratamento da ETA. Figura 9 mostra o fluxograma do tratamento e os pontos de aplicação dos produtos químicos.

Figura 9 - Fluxograma de tratamento da ETA.



Fonte: Autora (2021)

Em relação a cada etapa de tratamento, pode-se acrescentar que: o misturador rápido é hidráulico, do tipo calha Parshall; os floculadores são do tipo mecânico, com três câmaras em série; os decantadores são de alta taxa de placas planas paralelas; os filtros rápidos são descendentes, com camada dupla (areia e antracito). Os produtos químicos aplicados atualmente são: sulfato de alumínio para coagulação; polímero aniônico para auxiliar na floculação; hipoclorito de sódio para desinfecção; e fluossilicato de sódio para fluoretação.

A água utilizada para abastecimento do empreendimento provém de um lago construído artificialmente, de 54 milhões de litros, recarregado através do lençol freático e do sistema de drenagem pluvial. Além do lago artificial, o sistema dispõe de 20 ponteiros.

Na baixa temporada, a vazão de 50 L/s do lago já é suficiente para abastecer a população fixa e as ponteiros são ativadas apenas para sua manutenção. Já na alta temporada, devido à população flutuante, há um acréscimo de 20 L/s por meio de captação das 20 ponteiros, ou seja, a vazão máxima é de 70 L/s.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE ESTUDO

Parâmetros físico-químicos da água bruta e tratada, como alcalinidade, cloretos, condutividade, cor, dureza, ferro, manganês, pH, sólidos dissolvidos, sulfato e turbidez serão analisados para auxiliar na compreensão da natureza da dureza presente na água de estudo e verificação da qualidade da água. Tais parâmetros foram reunidos de uma série histórica disponível na base de dados da estação, e serão apresentados em forma de tabela como uma média dos meses de janeiro de 2018 a dezembro de 2020.

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO VALOR LIMITE DE DUREZA AO PALADAR

Para definir a dureza aceitável ao paladar do consumidor, primeiro realizou-se a diluição da água tratada (AT) dura, cujas amostras foram coletadas do reservatório que abastece o empreendimento e a ETA, em água destilada (AD), utilizando a metodologia 2160 B do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), para teste de limite de sabor – FTT (sigla em inglês).

O FTT é usado para determinar se o sabor de uma amostra de água tratada é detectável e diferente de um padrão definido, no caso, água destilada.

Foram realizadas diferentes diluições e para cada diluição foi atribuído um número limite de sabor – FTN (sigla em inglês), que é a maior diluição da amostra com água de referência, AD, produzindo uma diferença perceptível definitivamente.

O valor de FTN é dado pela equação abaixo:

$$FTN = \frac{A+B}{A} \quad (12)$$

Onde:

A = volume de água tratada (mL);

B = volume de água destilada (mL).

A degustação das amostras e identificação do sabor foram realizadas por 5 funcionários da estação, corroborando com o número mínimo de pessoas, necessário para a execução do teste. Para a seleção do painel de testadores, foram escolhidos aqueles interessados em fazer testes de sabor, livres de resfriados ou alergias. Também foram excluídas pessoas



fumantes, conforme indicava o método. Os testadores foram familiarizados com o gosto da água dura, antes do início do teste (APHA, 2017).

Para cada diluição foi verificada ainda a dureza total equivalente através do método de determinação de dureza 2340 B, pela titulação com EDTA (APHA, 2017).

Tanto no teste preliminar quanto no teste de determinação do número limite de sabor, os testadores foram familiarizados com o sabor da água tratada dura, para facilitar sua identificação. Cada teste foi realizado somente uma vez, utilizando o mesmo painel de testadores.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA DUREZA NECESSÁRIA

Após identificar o FTN e a dureza equivalente para sua diluição, foi possível determinar a eficiência necessária para alcançar essa concentração através da equação abaixo:

$$E = \frac{C - C_0}{C} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

E = eficiência de remoção (%);

C = dureza inicial (mg/L de CaCO<sub>3</sub>), média da série de dados da ETA;

C<sub>0</sub> = dureza final (mg/L de CaCO<sub>3</sub>), identificada pelos testadores.

### 3.5 ESTIMATIVA DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

#### 3.5.1 Troca iônica

Para testes feitos com resina, as amostras de água foram coletadas da saída do filtro, antes da entrada no tanque de contato. No estudo da viabilidade técnica foi primeiro determinado o tipo de resina, em seguida analisado fatores como: capacidade de remoção de dureza, vida útil da resina, frequência necessária de regeneração da resina, a geração e disposição de efluente com elevado teor salino.

Para verificar a eficiência de abrandamento através de resina de troca iônica, foram feitos experimentos utilizando diferentes doses de resina catiônica fortemente ácida, da marca

Purolite® C100, fornecida pela empresa Hidro Solo. As amostras de água tratada foram coletadas da saída do filtro, antes da sua entrada no tanque de contato.

Recipientes de dois litros com água tratada, permaneceram em agitação contendo diferentes concentrações da resina (1, 5, 10, 30 e 50 mg/L). Após 30 minutos em agitação a 150 rotações por minuto (RPM), alíquotas de 50 mL foram retiradas para a determinação da dureza e alcalinidade.

Além dos testes realizados em laboratório, um levantamento técnico e econômico foi disponibilizado por três empresas. Dentro da estimativa econômica também se ponderou o custo do sal grosso, uma estimativa do consumo desse sal, a construção de armazenamento para o mesmo.

### **3.5.2 Filtração por membranas**

A eficiência da membrana foi observada em termos de remoção de elementos relacionados à dureza, como cálcio, magnésio, bicarbonato, carbonato, sulfato e cloreto, através de informações dadas por fornecedores de membranas e de levantamento bibliográfico.

Para estimativa da viabilidade econômica, além do preço relativo às membranas, ao bombeamento e demais componentes estruturais de ambos os sistemas, também se analisou a necessidade de manutenção e troca das membranas, da compra regular de produto químico (antincrustante), de operadores, e de recursos necessários para disposição final do rejeito concentrado.

As informações técnicas e econômicas foram fornecidas pela empresa Yporã Ind. Com. e Serv. de Equip. para Filtração Ltda, pela DuPont e pela Tigre.

Além de comparar a filtração por membranas com os outros dois tipos de tratamento estudados, foram comparados aspectos como eficiência e custos entre a nanofiltração e a osmose reversa. Realizou-se ainda um estudo técnico comparativo dos dois tipos de membrana verificando as eficiências de remoção de dureza; pressão transmembrana necessária; dosagem de antincrustante; potência da bomba do sistema; geração e disposição de resíduo concentrado; espaço necessário e complexidade de operação.

### **3.5.3 Precipitação química**

Nos testes de precipitação química foram coletadas amostras de água bruta, a mesma captada na ETA Habitasul, proveniente do lago artificial e ponteiros.

A precipitação química foi testada em relação a dois produtos químicos: cal hidratada e carbonato de sódio (ou barrilha), testados de forma combinada.

Para realizar a viabilidade técnica, analisou-se: a dosagem ideal de produto químico, e consequentemente seu consumo mensal; a necessidade de tanque de preparo e homogeneização do produto; a necessidade de bomba dosadora; a geração de lodo; e possível correção final do pH.

A demanda das etapas de agitação do produto na água dura e de separação dos sólidos precipitados, essenciais ao processo, são supridas com a presença das unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração na ETA Habitasul.

A eficiência da precipitação química na remoção da dureza foi determinada em ensaio de tratabilidade, utilizando Jartest. A cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e a barrilha ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) foram fornecidas pela empresa Buschle e Lepper S.A.

As soluções de cal e de barrilha testadas foram preparadas com concentração de 1%. Os ensaios de Jartest foram realizados com parâmetros idênticos (dose, tempo e gradiente) aos ensaios diários executados pelos operadores da estação, de acordo com o funcionamento da ETA. Dessa forma, as doses de coagulante e polímero foram as mesmas já utilizadas na ETA. O único diferencial foi acrescentar a aplicação de cal hidrata e barrilha.

Em um dos casos ainda foi testada a substituição do coagulante utilizado na ETA, sulfato de alumínio, pelo cloreto de polialumínio (PAC), para verificar a influência do coagulante no processo. A melhor dosagem do PAC foi determinada previamente através de Jartest. A programação do Jartest seguiu conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Programação do Jartest

<b>Tempo</b>	<b>Rotação (RPM)</b>	<b>Dosagem de Produto</b>
10 segundos	20	
59 segundos	400	Diferentes dosagens de cal e/ou barrilha; 4,5 mL de Sulfato de alumínio ou 1,0 mL de PAC
59 segundos	300	
10 minutos	35	
59 segundos	34	
10 minutos	30	
59 segundos	29	
10 minutos	25	1,0 mL de Polímero
15 minutos	Decantação	

Após a decantação as amostras ainda foram filtradas em filtros de papel Whatman 40 de 125 mm de diâmetro.

O primeiro Jarrest buscou testar diferentes dosagens de cal hidratada (10, 15, 20, 30; 40; 50; 70; 100 e 130 mg/L) para a remoção da dureza total da água bruta. Neste teste a barrilha não foi adicionada. Foi utilizada a melhor dosagem de sulfato de alumínio feita no período pelo operador da estação e 1,0 mL de polímero.

O segundo Jarrest buscou verificar a eficiência de diferentes dosagens da solução de 1% de barrilha (5; 10; 15; 20; 25 e 30 mg/L) na remoção da dureza total. Adicionou-se a melhor dosagem de solução de cal, determinada pelo teste anterior, em cada jarro, a melhor dosagem de sulfato de alumínio, além de 1,0 mL de polímero.

Com o terceiro Jarrest, verificou-se a influência do coagulante sulfato de alumínio na dureza total. Foram adicionadas dosagens ainda menores de cal hidratada (2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 mg/L). Neste teste, nem a barrilha nem o sulfato de alumínio foram adicionados, somente 1,0 mL de polímero.

Um último ensaio ainda foi realizado aplicando a solução de 1% de cal em dosagens que variaram de 5 a 300 mg/L. O coagulante PAC foi adicionado no lugar do sulfato de alumínio. A melhor dosagem de PAC foi determinada em um Jarrest prévio, sem adição de cal. O polímero foi aplicado da mesma forma que nos testes anteriores.

Em relação a uma estimativa dos custos para a viabilidade econômica, considerou-se o custo mensal para compra dos produtos químicos, a compra de tanque de mistura do produto, a compra de bomba dosadora, a instalação de tubulação entre o tanque e ponto de aplicação; custos adicionais com o tratamento de lodo da ETA; custos em possível estabilização final do pH.

### 3.6 QUADRO COMPARATIVO DOS MÉTODOS

Para possibilitar uma comparação geral entre os métodos, realizou-se um quadro-resumo, determinando a intensidade dos principais parâmetros analisados na viabilidade das três técnicas de abrandamento, são eles: geração de lodo; utilização de produtos químicos; necessidade de tratamento de efluente gerado; necessidade de alteração da planta da ETA existente; custos fixos; eficiência na remoção da dureza e custo inicial de implantação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERÍSTICA DA ÁGUA DE JURERÊ INTERNACIONAL

Mensalmente são realizados monitoramentos da qualidade da água bruta e tratada pelo SAE. Na Tabela 4 estão apresentados alguns parâmetros cujos valores são referentes a uma média dos meses de janeiro de 2009 a dezembro de 2020.

Tabela 4 - Características da água bruta e água tratada, baseados em uma média de dados de um período de 12 anos.

Parâmetro/ Amostra	Unidade	Portaria MS 2.914/11	Água Bruta (AB)	Desvio padrão AB	Água tratada (AT)	Desvio padrão AT
Alcalinidade	mg/L	-	166,23	40,25	113,45	87,41
Cloretos	mg/L	250	79,94	32,38	80,73	38,19
Condutividade	µS/cm	-	537,30	106,87	599,80	107,81
Cor aparente	uH	15	139,26	54,67	5,07	5,37
Dureza total	mg/L	500	208,79	37,84	207,71	31,08
Ferro	mg/L	0,3	0,44	0,23	0,03	0,06
Manganês	mg/L	0,1	0,18	0,09	0,04	0,03
pH	-	6,0-9,5	7,13	0,61	7,75	0,48
SDT	mg/L	1000	285,08	64,07	319,97	67,91
Sulfatos	mg/L	250	31,27	10,39	88,07	21,92
Turbidez	uT	5	10,30	6,96	0,50	0,67

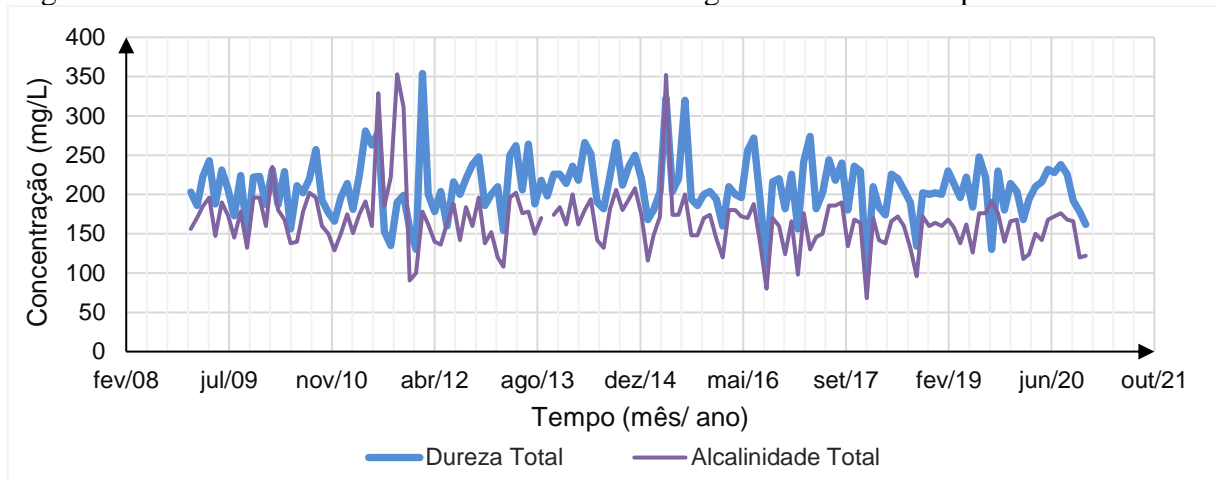
Legenda: SDT = sólidos dissolvidos totais.

Nota-se que a água, após passar pelo tratamento físico-químico, atende aos padrões estabelecidos pela legislação vigente, contudo, tanto a água bruta como a água tratada, são classificadas como águas duras, por possuir dureza entre 150 e 300 mg/L de CaCO<sub>3</sub>.

Como a alcalinidade de ambas as águas se encontra em uma parcela menor que a dureza total, significa que há uma parcela equivalente a dureza permanente, que é relativamente maior na água tratada. Este aumento da dureza permanente após o tratamento físico-químico pode ser explicado pelo acréscimo de sulfatos na água, após a adição do coagulante a base de sulfato de alumínio.

O parâmetro de alcalinidade da água bruta, associado ao seu pH (entre 4,5 e 8,3), mostra que o principal componente responsável pela dureza na água de Jurerê são os íons bicarbonato. Na Figura 10 o gráfico que mostra que a alcalinidade está relacionada à dureza.

Figura 10 - Gráfico de dureza total e alcalinidade da água bruta durante o período de 12 anos.



Apesar de não ter maiores impactos negativos na saúde, a água dura causa incrustações nas tubulações de água quente, além disso, no JI já foi relatado pela população que a dureza é perceptível ao paladar e pela resistência à reação de saponificação.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR LIMITE DE DUREZA AO PALADAR

No teste preliminar foram testadas cinco diluições intermediárias para se delimitar a faixa onde o sabor da dureza é perceptível (Tabela 5).

Tabela 5 - Teste preliminar de sabor.

Volume de Água Tratada (mL)	Volume de Água Destilada (mL)	Número FTN	Dureza Total (mg/L)	Percepção da dureza pelos 5 testadores
200	0	1	140	Sim
50	150	4	40	Não
12	188	17	14	Não
4	196	50	8	Não
0	200	-	4	Não

Com o teste preliminar foi verificado que a faixa de percepção da dureza é aquela em que a água tratada foi provada sem diluição, ou seja, cuja dureza foi de 140 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  (dureza determinada para a água sem diluição, no momento da coleta da amostra). Com isso, realizou-se a segunda etapa do teste, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Determinação do número limite de sabor.

<b>Volume de Água Tratada (mL)</b>	<b>Volume de Água Destilada (mL)</b>	<b>Número FTN</b>	<b>Dureza Total (mg/L)</b>	<b>Percepção da dureza pelos 5 testadores</b>
200	0	1	140	Sim
100	100	2	80	Sim
70	130	3	60	Sim
50	150	4	34	Não
35	165	6	24	Não
25	175	8	16	Não
17	183	12	12	Não

Com a etapa 2 do teste de sabor foi identificado que os testadores começaram a perceber a presença da dureza a partir do FTN igual a 3, onde a dureza foi de 60 mg/L. Nesta concentração a diluição foi realizada com 70 mL de água tratada dura em 130 mL de água destilada.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA DUREZA NECESSÁRIA

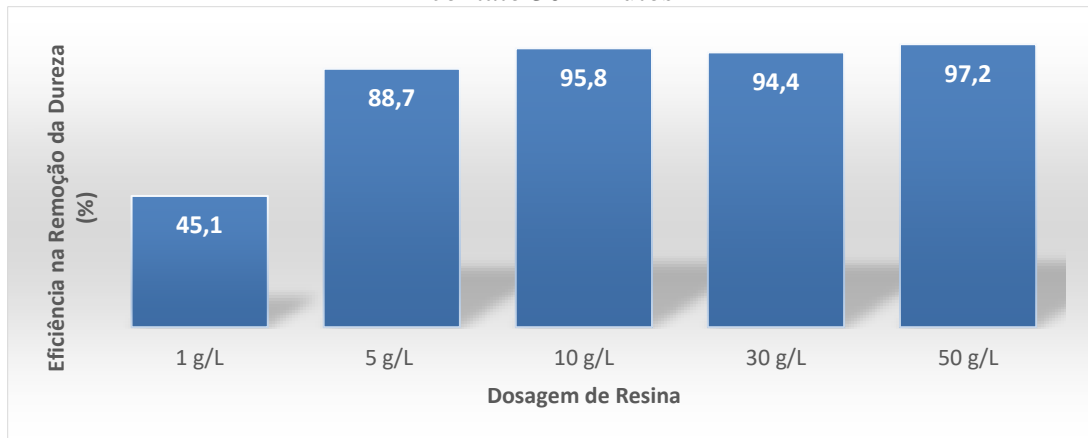
Determinado o limite de sabor aceitável, onde a diluição da água apresentou concentração de dureza moderada, 60 mg/L e considerando que a dureza da água tratada e bruta variam em torno de 200 mg/L, sabe-se que é preciso encontrar um método de remoção de dureza cuja a eficiência mínima seja de 70%.

#### 4.4 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

##### 4.4.1 Troca iônica

Após o contato da água com diferentes dosagens de resina, foram obtidas as seguintes eficiências na remoção da dureza (Figura 11):

Figura 11 - Eficiência na remoção da dureza por dosagem de resina catiônica - tempo de contato 30 minutos



O gráfico mostra que, com uma dosagem de 5 g/L de resina e um tempo de contato de 30 minutos com a água filtrada da ETA foi possível atingir a eficiência desejada. Com uma dosagem maior, 10 g/L, a dureza passou de 142 para 6 mg/L.

Considerando que toda a dureza da água tenha sido removida ao passar pelo abrandador, é necessário que apenas uma parte da vazão total seja abrandada, cerca de 75%, para posterior mistura com 25% da vazão de água dura (200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ )<sub>q</sub>. Desta maneira, será alcançada a dureza média de 60 mg/L, objetivados neste estudo.

A Figura 12 apresenta o fluxograma das vazões de entrada e saída do sistema além das concentrações de dureza.

Figura 12 - Fluxo de vazões e concentração de dureza em um abrandador de resina catiônica.



Fonte: Adaptado de Hidro Solo (2021).

O sistema de abrandamento por troca iônica se aplica para a remoção dos íons causadores da dureza da água (cálcio e magnésio). Os cloretos, sílica, condutividade e os sólidos dissolvidos totais não serão removidos.



As resinas são regeneradas por uma solução de sal armazenada em tanques acoplados aos abrandadores, geralmente inclusos nos custos de compra (Figura 1). O consumo de sal varia ao longo dos dias da semana, a depender do consumo de água de cada dia. O sal a ser utilizado deverá ser granulado e não conter iodo em sua composição.

A concentração de sódio na água tratada tende a aumentar, devido a troca iônica, na mesma proporção de seus respectivos equivalentes-grama, de retirada de cálcio e magnésio, com consequente aumento da condutividade da água.

A presença de cloro sob qualquer forma pode deteriorar rapidamente a resina catiônica. Sendo assim, o local de instalação dos abrandadores na ETA seria logo após os filtros rápidos e anterior ao tanque de contato. Vale ressaltar que a água filtrada da estação atende as características físico-químicas recomendadas para alimentação dos filtros de resina, como: turbidez inferior a 5 uT e cor aparente igual ou menor que 5 uH.

Através de orçamentos levantados com três empresas (Acqua Máxima, Hidro Solo e Tigre), foi estimado o custo do abrandamento pelo método de troca iônica.

Uma média entre os valores fornecidos pelas empresas resultou em um custo médio de 750 mil reais com a aquisição do equipamento abrandador, incluindo a recarga inicial de resina, de cerca de 11 mil litros. A Tabela 7 apresenta valores para diferentes fornecedores do equipamento.

Tabela 7 - Investimento inicial de abrandador de resina catiônica, por diferentes fornecedores.

Fornecedor	Numero de Abrandadores	Volume total de Resina (L)	Preço (R\$)
Acqua Máxima	5	8250	430 mil
Hidro Solo	6	6750	870 mil
Tigre	2	20000	960 mil
<b>Média Aproximada</b>	<b>4</b>	<b>11000</b>	<b>750 mil</b>

Não estão inclusos neste orçamento: Obras civis, ligações elétricas, tubulações de sucção e recalque, bomba de operação, materiais para a interligação do abrandador à rede hidráulica existente, nem o sal necessário para a regeneração da resina.

A Figura 13 apresenta um detalhamento dos custos incluindo outros itens.

Figura 13 - Orçamento de abrandador por troca iônica.

QTD.	DESCRIÇÃO	FORNECEDOR	VALOR VENDA (Unit)	VALOR VENDA TOTAL
<b>SISTEMA DE ABRANDAMENTO - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS</b>				
2	Coluna Catiônica - AC - 99 m3/h com crepinas e PSV - Ø 2300	Calderaria	R\$ 227.787,19	R\$ 455.574,38
20000	Resina catiônica (L)	DOW/Purolite	R\$ 25,28	R\$ 505.537,46
2	Bomba centrífuga - retrolavagem/lavagem - 99 m3/h x 2 bar - FF	KSB/Imbil/Ebara	R\$ 11.389,36	R\$ 22.778,72
2	Bomba dosadora de salmoura - centrífuga PP - 35.000 l/h	Grabe/Pumping	R\$ 20.521,17	R\$ 41.042,35
1	Tanque de preparo de salmoura - PRFV- 10 m3 com agitador	Grabe/Gratt/Mixtura	R\$ 16.416,94	R\$ 16.416,94
<b>MATERIAIS DE INTERLIGAÇÃO E MONTAGEM EM GERAL</b>				
1	Materiais de interligação mecânica	Geral	R\$ 109.446,25	R\$ 109.446,25
1	Suportes em geral e estruturas metálicas	Geral	R\$ 10.944,63	R\$ 10.944,63
1	Material pneumático	Geral	R\$ 6.840,39	R\$ 6.840,39
1	Compressor de ar	Geral	R\$ 4.104,23	R\$ 4.104,23
1	Material de fixação em geral	Geral	R\$ 8.208,47	R\$ 8.208,47
1	Material elétrico	Geral	R\$ 41.042,35	R\$ 41.042,35
1	Painel CCM + CLP/IHM	ETNM/Chronus/Loop	R\$ 109.446,25	R\$ 109.446,25
1	Tagueamento e miscelâneas em geral e imprevistos	Geral	R\$ 31.465,80	R\$ 31.465,80
<b>INSTRUMENTAÇÃO</b>				
3	Medidor e transmissor de vazão eletromagnético	Endress/Siemens	R\$ 18.423,45	R\$ 55.270,36
1	Rotâmetro	Blaster	R\$ 2.325,73	R\$ 2.325,73
10	Manômetros 2 1/2" vertical inox 304	Wicka	R\$ 273,62	R\$ 2.736,16
3	Transmissores de pressão (PIT)	Endress/Siemens	R\$ 2.530,94	R\$ 7.592,83
2	Chaves de nível alto e baixo para tanques - pera	Geral	R\$ 205,21	R\$ 410,42
10	Válvulas automáticas 6" on/off	GEA/BRAY/Valmicro/MGA	R\$ 3.830,62	R\$ 38.306,19
2	Válvulas automáticas 3" on/off - dosagem regenerantes	GEA/BRAY/Valmicro/MGA	R\$ 2.872,96	R\$ 5.745,93
<b>SERVIÇOS</b>				
1	Engenharia e projetos	TAE/Terceiros	R\$ 126.123,78	R\$ 126.123,78
1	Fretes e Transporte com seguro e embalagem	Geral	R\$ 78.827,36	R\$ 78.827,36
1	Serviço de montagem eletromecânica	Montanamec/Fieldtech	R\$ 236.482,08	R\$ 236.482,08
1	Serviço de automação	Loop/Chronus	R\$ 47.296,42	R\$ 47.296,42
1	Supervisão, comissionamento, start up e treinamento	TAE	R\$ 34.744,84	R\$ 34.744,84
1	Serviço de NR-13 em campo	Geral	R\$ 15.765,47	R\$ 15.765,47
<b>TOTAL</b>				<b>R\$ 2.014.475,79</b>

Fonte: Tigre (2021).

Além do investimento inicial, a técnica gera custos mensais com a regeneração e troca da resina, energia elétrica, entre outros, que devem ser considerados.

Aproximadamente 1 (um) quilograma de sal será consumido para cada 1,58 m<sup>3</sup> de água abrandada produzida. Considerando que apenas 75% da vazão total seja abrandada, serão necessárias 86 toneladas de sal para a regeneração da resina, por mês. Com um custo médio do quilo de sal grosso livre de R\$ 1,40 (Buschle e Lepper, 2021), serão gastos mensalmente com a compra de sal, cerca de 120 mil reais.

Os abrandadores são compostos por um leito de resina, em que o volume vai depender da quantidade de vasos e de seu tamanho, de acordo com a estimativa do fornecedor para a ETA

de Jurerê Internacional. As resinas têm uma vida útil de aproximadamente 3 anos, no entanto, sem contaminantes pode superar os 5 anos. Se faz necessário então, prever um valor adicional de R\$ 264.000,00 a cada 3-5 anos, para a troca da resina catiônica, que possui um custo por litro de R\$ 24,00. Considerando a troca mínima de 3 anos, mensalmente serão gastos cerca de R\$ 7.400,00 com a troca do leito de resina.

#### **4.4.2 Filtração por Membranas**

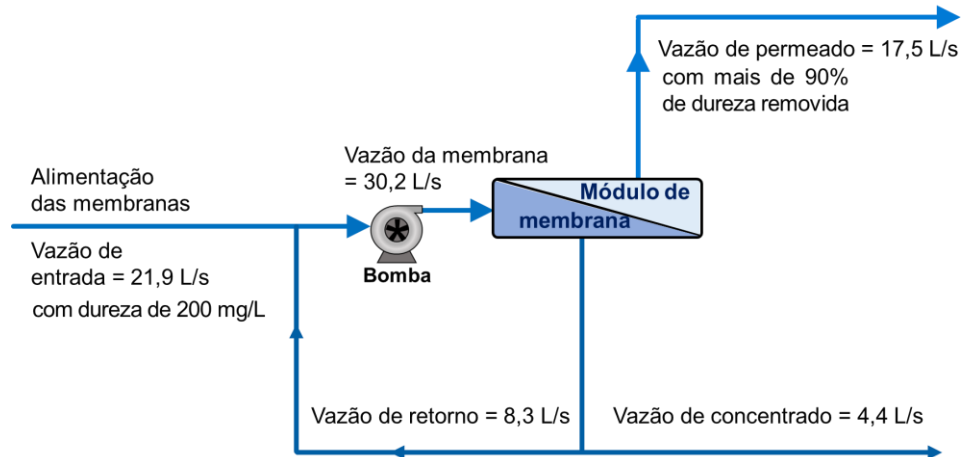
A membrana de osmose reversa (OR) reduz drasticamente todos os sais presentes na água, com eficiência acima de 90%. Já a nanofiltração (NF) remove em torno de 90% os sais divalentes ou trivalentes, tendo uma remoção inferior para os monovalentes, cerca de 50%. Como os sais responsáveis pela dureza são divalentes, ambas as tecnologias apresentaram remoções acima do mínimo necessário, determinado no teste de sabor (70%).

Segundo os engenheiros consultados pelas empresas, as membranas são capazes de reduzir a dureza de 200 mg/L para um valor em torno de 20 mg/L. Dessa forma, nem toda a vazão da ETA necessita passar pelo tratamento com membranas.

Os fornecedores ainda indicaram a necessidade do aumento na vazão de captação de cerca de 20%. De acordo com a proposta da empresa Yporã, que considerou uma reconversão de 80%, seriam necessários 4 módulos de membranas para gerar 70 L/s de permeado, e um abastecimento da ETA igual a 87,5 L/s. Porém, como apenas uma parcela da vazão necessita ser tratada, 3 módulos seriam o suficiente, produzindo uma vazão de permeado igual a 52,5 L/s a partir de uma vazão de entrada de 65,6 L/s.

Na Figura 14, é apresentada uma alternativa técnica para as vazões relacionadas a alimentação de um módulo de membrana da empresa Yporã.

Figura 14 - Fluxo de vazões para sistema de membranas OR e NF.



Fonte: Adaptado de Yporã (2021).

A vazão de concentrado é elevada, de 13,1 L/s (considerando 3 módulos). Isso é considerado uma desvantagem técnica, visto que seria necessário um licenciamento ambiental, caso fosse decidido lançar esse rejeito em um corpo hídrico, sem tratamento. Considerada uma das maiores dificuldades técnicas relacionada a aplicação das membranas.

É preciso considerar também que na filtração por membranas não há adição de sal, mas é necessária a utilização de um antincrustante para elevar a vida útil das membranas, cuja dose é da ordem de 2 a 5 mg/L.

O abrandamento por membranas, seja nanofiltração ou osmose reversa, incluem, além de gastos com membranas, gastos com bombas, energia, manutenções, antincrustante, troca de eventuais peças danificadas, entre outros.

A Figura 15 detalha os custos individuais com equipamentos, materiais, instrumentação e serviços, para a implantação do sistema no SAE.

Figura 15 – Orçamento de osmose reversa.

QTD.	DESCRIÇÃO	FORNECEDOR	VALOR VENDA (Unit)	VALOR VENDA TOTAL
<b>SISTEMA OR - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS</b>				
2	Filtro cartucho - 153 m3/h	Petramago/Microline/Filterinter	R\$ 128.130,29	R\$ 256.260,59
252	Membranas de osmose reversa	DOW/TORAY	R\$ 5.055,37	R\$ 1.273.954,40
2	Estrutura metálica em AC /suportes para OR	Calderaria	R\$ 27.361,56	R\$ 54.723,13
3	Bomba de alta pressão OR 131 m3/h x 12 bar - AI304	KSB/Imbil/Ebara	R\$ 61.563,52	R\$ 184.690,55
36	Vasos de OR 8" com 7 membranas 300 psi	YPORÃ/Wave Cyber	R\$ 12.996,74	R\$ 467.882,74
3	Tanques: antiincrustante, metabissulfito e soda - 300 L - PE	Rotoplas/Marplast	R\$ 820,85	R\$ 2.462,54
2	Bombas dosadora antiincrustante - 5 l/h - 4-20 mA	Prominent/Eatron/Emec	R\$ 3.420,20	R\$ 6.840,39
4	Bomba dosadora soda e metabissulfito - 10 L/h - 4-20 mA	Prominent/Eatron/Emec	R\$ 4.788,27	R\$ 19.153,09
2	Bomba centrífuga CIP OR 60 m3/h x 2 bar - AI304	KSB/Imbil/Ebara	R\$ 16.416,94	R\$ 32.833,88
1	Tanque de CIP 5.000 L - PE	Rotoplas/Marplast	R\$ 4.788,27	R\$ 4.788,27
1	Filtro cartucho CIP - 60 m3/h	Petramago/Microline/Filterinter	R\$ 49.828,45	R\$ 49.828,45
<b>MATERIAIS DE INTERLIGAÇÃO E MONTAGEM EM GERAL</b>				
1	Materiais de interligação mecânica	Geral	R\$ 136.807,82	R\$ 136.807,82
1	Suportes em geral	Geral	R\$ 6.840,39	R\$ 6.840,39
1	Material pneumático	Geral	R\$ 6.840,39	R\$ 6.840,39
1	Compressor de ar	Geral	R\$ 4.104,23	R\$ 4.104,23
1	Material de fixação em geral	Geral	R\$ 10.944,63	R\$ 10.944,63
1	Material elétrico	Geral	R\$ 41.042,35	R\$ 41.042,35
1	Painel CCM + CLP/IHM	ETNM/Chronus/Loop	R\$ 177.850,16	R\$ 177.850,16
1	Tagueamento e miscelâneas em geral e imprevistos	Geral	R\$ 54.723,13	R\$ 54.723,13
<b>INSTRUMENTAÇÃO</b>				
6	Medidor e transmissor de vazão eletromagnético	Endress/Siemens	R\$ 19.153,09	R\$ 114.918,57
12	Manômetros 2 1/2" vertical inox 304	Wicka	R\$ 273,62	R\$ 3.283,39
2	Chaves de nível pera	Geral	R\$ 164,17	R\$ 328,34
1	Analizador de ORP	Prominent	R\$ 9.576,55	R\$ 9.576,55
1	Analizador de pH	Prominent	R\$ 9.576,55	R\$ 9.576,55
2	Analizador de condutividade	Prominent	R\$ 9.576,55	R\$ 19.153,09
6	Transmissores de pressão (PT)	Endress/Siemens	R\$ 2.530,94	R\$ 15.185,67
2	Pressostato	Danfoss	R\$ 547,23	R\$ 1.094,46
2	Válvula controle rejeito 26 m3/h	Bray/GEA	R\$ 16.416,94	R\$ 32.833,88
4	Válvulas automáticas 8"	Bray/Varb	R\$ 4.423,45	R\$ 17.693,81
<b>SERVIÇOS</b>				
1	Engenharia e projetos	TAE	R\$ 126.123,78	R\$ 126.123,78
1	Fretes e Transporte com seguro e embalagem	Geral	R\$ 78.827,36	R\$ 78.827,36
1	Serviço de montagem eletromecânica	Geral	R\$ 236.482,08	R\$ 236.482,08
1	Serviço de automação	Loop/Chronus	R\$ 47.296,42	R\$ 47.296,42
1	Supervisão, comissionamento, start up e treinamento	TAE	R\$ 34.744,84	R\$ 34.744,84
<b>TOTAL</b>				<b>R\$ 3.539.689,90</b>

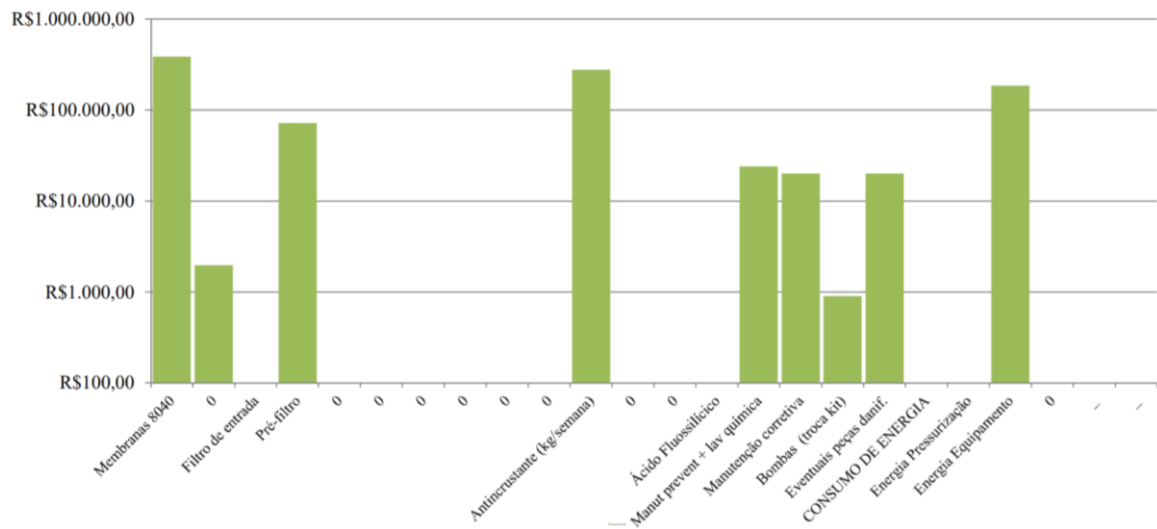
Fonte: Tigre (2021).

Além dos gastos demonstrados na tabela acima, há aqueles custos fixos, como com dosagem de antiincrustante, manutenção preventiva com lavagens químicas e manutenção corretiva das membranas, gasto de energia, entre outros.

Ambas as membranas possuem características semelhantes de eficiência e custo de implantação, contudo, uma vantagem da NF em relação a OR é que a pressão transmembrana necessária para a primeira é de cerca de 5 bar, enquanto a segunda trabalha em torno de 10 bar. Essa diferença será refletida nos gastos com bombas e energia.

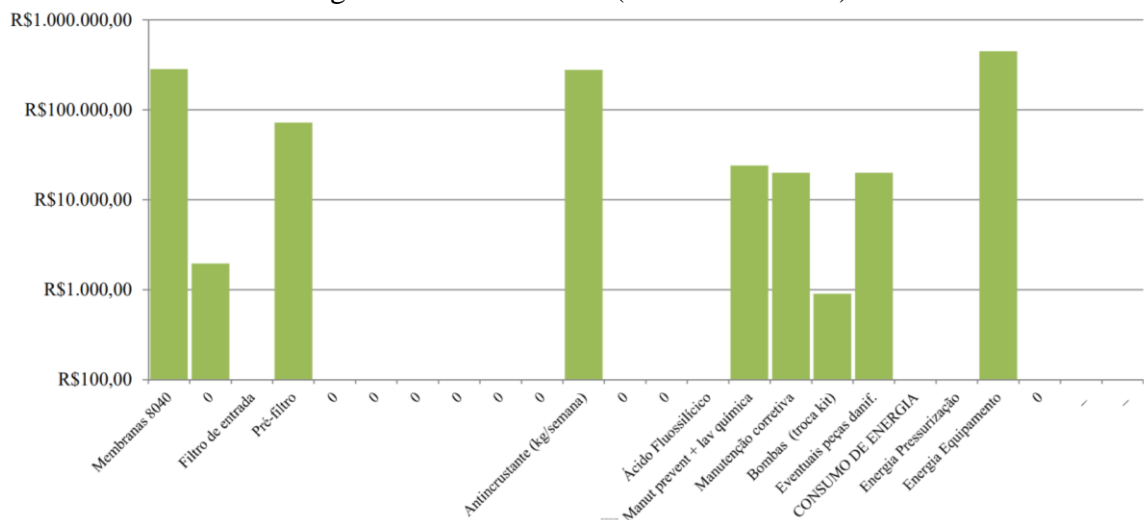
A Figura 16 e Figura 17 apresentam os gastos anuais necessários, por item, para a nanofiltração e osmose reversa, consecutivamente.

Figura 16 - Custo anual (Nanofiltração).



Fonte: Yporã (2021).

Figura 17 - Custo anual (Osmose Reversa).



Fonte: Yporã (2021).

Os custos são bastante semelhantes para as duas tecnologias, contudo, na nanofiltração, o custo das bombas e o gasto suplementar com energia é menor, pela redução de potência necessária para seu bombeamento, visto que necessita de uma pressão transmembrana inferior. A Tabela 8 apresenta os custos fixos mensais para as duas tecnologias.

**Tabela 8 - Custos mensais fixos de filtração por NF e OR.**

<b>CUSTOS MENSAIS FIXOS</b>	<b>NF Custos (R\$)</b>	<b>OR Custos (R\$)</b>
Membranas 8040	32.200,00	23.600,00
Pré-filtro	6.000,00	6.000,00
Antincrustante	23.123,10	23.123,10
Manutenção preventiva e lavagem química	2.000,00	2.000,00
Manutenção corretiva	1.666,67	1.666,67
Bombas (troca kit)	75,00	75,00
Eventuais peças danificadas	1.666,67	1.666,67
Energia equipamento	15.505,18	37.212,42
<b>Custo total mensal</b>	<b>82.236,62</b>	<b>95.345,86</b>

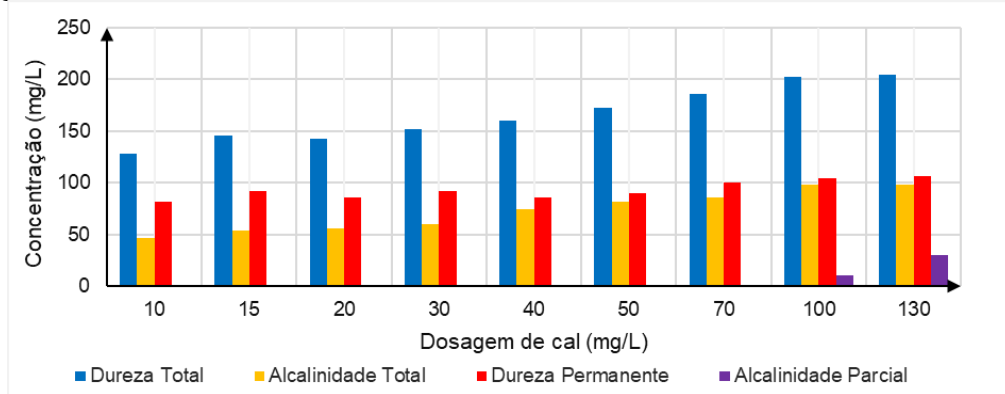
Para realizar a disposição do rejeito, os recursos financeiros necessários dependeriam do local escolhido para a disposição, seja o mar ou algum afluente próximo; a técnica de lançamento; e do licenciamento ambiental. Todos são fatores desafiadores, que aumentam os impedimentos para a escolha desta alternativa.

#### **4.4.3 Precipitação Química**

Neste estudo foram testadas diferentes dosagens de cal em Jarrest e, para simular o tratamento na ETA, foram aplicadas as dosagens usuais de coagulante e floculante.

No primeiro teste foram variadas as dosagens da solução de cal. O gráfico da Figura 18 mostra o comportamento da dureza e alcalinidade ao se adicionar diferentes dosagens de cal.

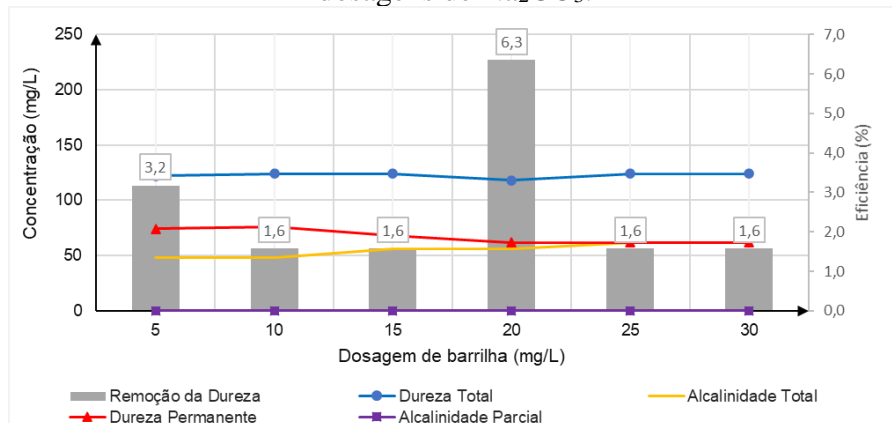
Figura 18 - Comportamento de diferentes parâmetros por dosagens de cal hidratada.



Percebe-se que não houve remoção da dureza inicial da água bruta (120 mg/L), ao contrário, houve um aumento gradativo da dureza, e da alcalinidade na mesma proporção, à medida em que se elevou a dosagem de cal. O aumento nestes parâmetros pode ser explicado pela reação da cal hidratada com o sulfato de alumínio, provocando um aumento da dureza permanente. A presença de alcalinidade à fenolftaleína indicou alcalinidade à hidróxidos, devido ao excesso de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a partir da dosagem de 100 mg/L de cal hidratada.

Em um segundo teste, feito com barrilha, buscou-se uma redução da dureza pela ação do  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  sobre a dureza permanente, gerada pela cal hidratada. Neste teste foram variadas as dosagens de barrilha e utilizou-se a melhor dosagem de cal do teste anterior (10 mg/L), além de sulfato de alumínio e polímero. Os resultados estão apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Concentração de parâmetros e eficiência na remoção da dureza com diferentes dosagens de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .



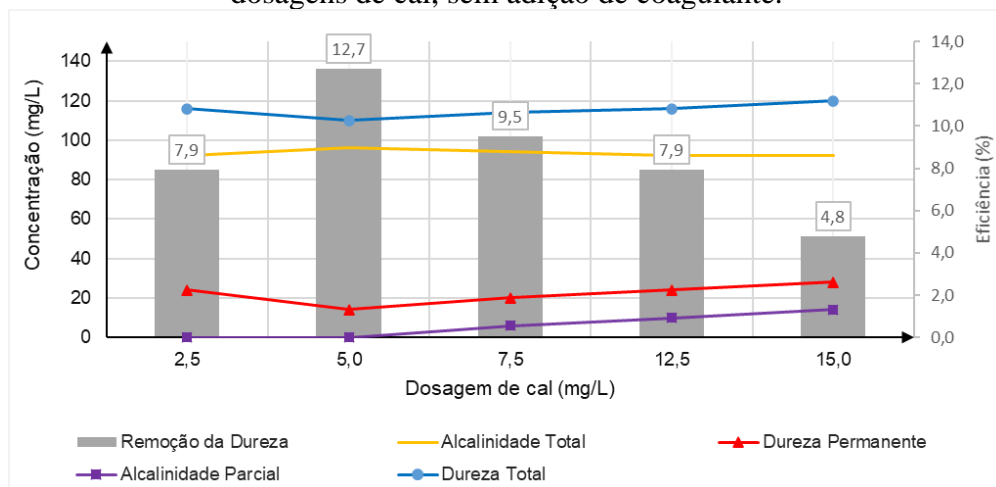
De fato, observa-se que, com a barrilha associada à cal, foi possível atingir uma remoção de 6,3% da dureza total, contudo, este valor encontra-se muito abaixo do que se busca para a ETA de Jurerê, visto que nessa eficiência a dureza inicial foi reduzida de 126 mg/L para



118 mg/L. Nota-se que não houve presença de alcalinidade a fenolftaleína, sendo a alcalinidade total equivalente a dureza temporária. A presença do  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ainda causou uma leve redução da dureza permanente, relativa aos sulfatos.

Um terceiro teste foi realizado sem a adição de coagulante adicionando-se menores da solução de cal aos jarros, visto que a dureza teve menor aumento com dosagens menores. A Figura 20 apresenta os resultados.

Figura 20 - Concentração de parâmetros e eficiência na remoção da dureza por diferentes dosagens de cal, sem adição de coagulante.



Sem a adição de sulfato de alumínio a eficiência máxima de remoção da dureza foi de cerca de 13%, com dosagem de cal igual a 5,0 mg/L. Percebe-se uma dureza permanente inferior, quando comparada à mesma dosagem de cal no teste com sulfato, o que comprova a influência do sulfato de alumínio neste parâmetro. Neste teste, o excesso de cal já é notado acima dos 5,0 mg/L. A Tabela 9 mostra os resultados obtidos no teste.

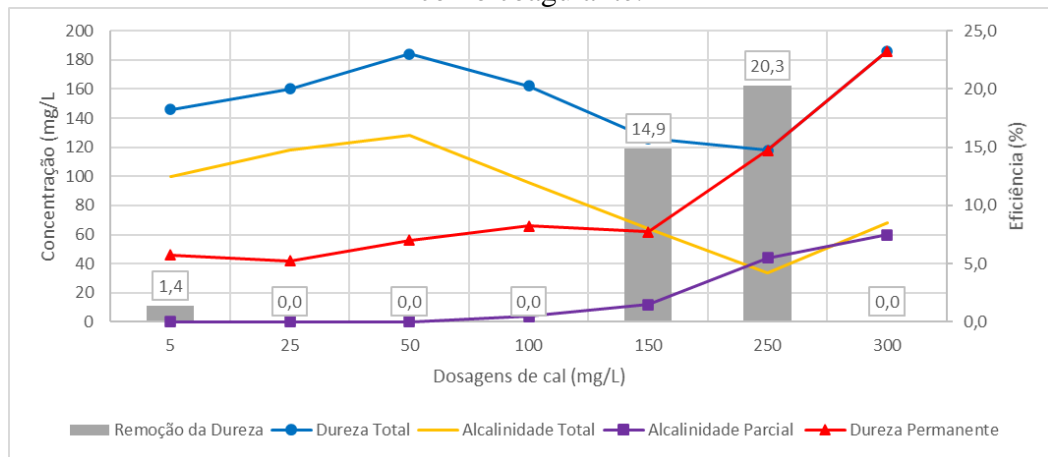
Tabela 9 - Resultados do teste com cal, sem adição de coagulante.

Dosagem Cal (mg/L)	pH	Turbidez (uT)	Cor (uH)	Dureza Total (mg/L)	Alcalinidade Total (mg/L)	Dureza Permanente (mg/L)	Alcalinidade Parcial (mg/L)	Eficiência na remoção da dureza (%)
Água bruta sem tratamento	6,93	15,3	252	126	92	34	0	-
2,5	6,82	14,5	260	116	92	24	0	7,9
5,0	7,05	15,6	277	110	96	14	0	12,7
7,5	7,33	15,4	275	114	94	20	6	9,5
12,5	7,87	15,6	284	116	92	44	10	7,9
15,0	8,06	16,7	293	120	92	56	14	4,8

Apesar de se ter obtido uma eficiência na remoção da dureza, percebeu-se que, nestas concentrações, a cal hidratada sozinha não possui efeito coagulante, visto que a cor e turbidez das amostras permaneceram elevados. Portanto, faz-se necessária a adição de um coagulante ao tratamento para que a água se encaixe aos padrões de potabilidade.

Buscou-se então, testar um coagulante diferente daquele utilizado atualmente na ETA. Neste teste foram adicionadas diferentes dosagens de cal hidratada, além do PAC como coagulante e polímero. A Figura 21 apresenta os resultados.

Figura 21 - Eficiência na remoção da dureza por diferentes dosagens de cal, utilizando PAC como coagulante.



Com a substituição do sulfato de alumínio pelo PAC se atingiu uma eficiência de 20%, reduzindo a dureza total de 148,0 para 118,0 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , contudo, a dosagem de cal foi elevada, 250 mg/L, e o pH chegou a 8,9. Com dosagens de cal inferiores a 150 mg/L e superiores a 250 mg/L o tratamento foi ineficiente.

A partir de 250 mg/L de cal, a alcalinidade total foi dada somente pela alcalinidade à fenolftaleína, portanto, a dureza temporária não pôde ser igualada a alcalinidade aos bicarbonatos, a partir deste valor.

A baixa eficiência na remoção da dureza por simples adição de cal era esperada, conforme estudos realizados por SILVA et al. (2017) e Dey; Herzog e Srinivasan (2007). De acordo com Richter e Netto (1991) e Mierzwa (2002), o método de precipitação química usualmente remove a dureza até 80 mg/L. Caso esse método diminuísse a dureza para 80 mg/L nos testes em laboratório, poderia apresentar o melhor custo-benefício dentre os tipos de abrandamento, dependendo da viabilidade econômica. Entretanto, os valores de dureza total da

água tratada não atingiram valores menores que 100 mg/L, inviabilizando a aplicação técnica deste método.

Os produtos químicos utilizados no processo abrandamento por precipitação química possuem custos relativamente baixos, em relação a outros processos. O custo da cal hidratada, por kg, é de R\$ 1,10, enquanto que a barrilha possui um custo de R\$ 4,50 (BUSCHLE e LEPPER, 2021). Contudo, com os testes realizados para o abrandamento da água bruta do SAE, obteve-se uma eficiência relativamente baixa, visto que busca-se 70% de remoção da dureza.

Com a eficiência máxima atingida nos testes realizados, 20%, utilizou-se uma dosagem de cal de 250 mg/L, ou 0,25 kg/m<sup>3</sup>. O gasto com cal seria de 45360 kg por mês. O custo mensal com cal seria de cerca de 50 mil reais.

Há um custo adicional com a disposição do lodo suplementar gerado e com correção do pH. Se for considerado que toda a cal utilizada no processo será removida na forma de lodo, e sendo o custo da disposição final do lodo, atualmente pago pelo SAE ao aterro sanitário industrial, de R\$ 115,00 por tonelada, mensalmente serão gastos cerca de 5 mil reais a mais com a disposição final do lodo, além do custo com a mão de obra e transporte, avaliados em 390 reais por tonelada (SAE, 2021). A Tabela 10 mostra um resumo mensal dos custos.

Tabela 10 - Resumo de custos de abrandamento por precipitação química.

Item	Kg/mês	Preço por kg (R\$)	Custo mensal médio (R\$)
Cal Hidratada	45360	1,10	50.000,00
Mão de obra e transporte do lodo	45360	0,390	17.690,00
Destinação final do lodo	45360	0,115	5.216,00
<b>Estimativa de custo final total mensal</b>			<b>73.000,00</b>

A ETA já conta com local para armazenamento do produto, além de operadores que já trabalham com dosagem de outros produtos químicos. É necessário prever, para a compra de bombas dosadoras e de tanque misturador, como investimento inicial, o valor em torno de R\$ 10 mil, além dos R\$ 73 mil discriminados.

#### 4.5 RESUMO DOS MÉTODOS

Após a análise dos principais métodos descritos na literatura para a remoção da dureza, será apresentado um resumo técnico e econômico para melhor visualização dos resultados. A tabela apresenta os custos de investimento inicial e de gastos mensais para cada uma das tecnologias.

Tabela 11 - Tabela de resumo de custos.

	<b>Troca Iônica</b>	<b>Membranas de Filtração</b>	<b>Precipitação Química</b>
Investimento Inicial (R\$)	2.000.000,00	3.500.000,00	83.000,00
Custos mensais (R\$)	128.000,00	90.000,00	73.000,00

O Quadro 2 apresenta um resumo de relevância das características na escolha de cada método incluindo geração de lodo, utilização de produtos químicos, necessidade de tratamento de efluente gerado, necessidade de alteração da planta da ETA existente, custos fixos (com manutenção, compra de produtos, troca de resinas, entre outros), eficiência na remoção da dureza e custo inicial de implantação. A relevância destes quesitos foi determinada especificamente, considerando sua aplicação na estação de tratamento de água de Jurerê Internacional.

Quadro 2 – Relevância de diferentes parâmetros na implantação de cada método.

<b>Item</b>	<b>Troca Iônica (TI)</b>	<b>Membrana de Filtração (MF)</b>	<b>Precipitação Química (PQ)</b>
Eficiência no tratamento	Alta	Alta	Baixa
Custo inicial de implantação	Alta	Alta	Baixa
Custos fixos posteriores	Alta	Média	Baixa
Geração de Lodo	Baixa	Baixa	Alta
Utilização de produtos químicos	Baixa	Média	Alta
Efluente concentrado de sais	Média	Alta	Baixa
Alteração na planta	Média	Alta	Baixa
Aumento da vazão de captação	Média	Alta	Baixa

Apesar de ter apresentado menor custo de implantação e de manutenção, menor complexidade de operação e outras vantagens, a precipitação química não apresentou a eficiência necessária para a remoção da dureza, com os testes realizados neste estudo. Por este motivo, sua aplicação na ETA – Habitasul será descartada.

A TI e MF apresentaram alta eficiência e também custos elevados de implantação e de manutenção dos sistemas, se comparados à PQ.

É preciso considerar que no abrandamento por MF há uma perda maior de vazão, que será transformada em efluente concentrado com o sal retido na membrana, o que demanda um aumento na vazão de captação.

Considerando o custo-benefício das três tecnologias estudadas, o método considerado mais adequado para ser utilizado adicionalmente ao tratamento já existente na ETA – Habitasul, é o de abrandadores de resina de troca iônica.

## 5 CONCLUSÃO

A água tratada do SAE atende aos padrões estabelecidos pela legislação vigente, no entanto, a dureza permanece elevada após passar pelo tratamento físico-químico convencional. Além disso, o coagulante aplicado no tratamento aumenta a dureza permanente da água.

Com o teste de sabor foi possível identificar que a partir de 60 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  presentes na água, os consumidores começaram a perceber gosto na água devido à dureza. Com isso, determinou-se a necessidade de um método de abrandamento com eficiência mínima de 70%.

O tipo de resina mais indicado para o abrandamento foi a do tipo catiônica, de sal de sódio. A resina apresentou alta eficiência (> 95%) na remoção da dureza com dosagem de 10 g/L. Estudos bibliográficos também demonstraram alta eficiência ao utilizar este método de abrandamento. Foi concluído que existe viabilidade técnica para a aplicação do método na saída dos filtros, antes da entrada da água tratada no tanque de contato. Contudo, verificou-se a necessidade de grande investimento inicial e necessidade de tratamento do efluente de regeneração da resina.

No processo de abrandamento por membranas, tanto a nanofiltração como a osmose reversa apresentaram alta eficiência. Um comparativo entre as duas tecnologias, utilizando máquinas com mesmo tamanho, mesmo número de membranas e mesma produção possuem preços semelhantes, contudo, os custos adicionais com bombas e energia são maiores na osmose reversa, já que nesse caso é necessário o dobro da pressão utilizada na nanofiltração.

Estudos realizados em laboratório, além de dados bibliográficos, confirmaram que a adição de cal hidratada como método adicional ao tratamento convencional utilizado pelo SAE, não é eficaz para atingir a dureza em uma concentração aceitável ao paladar do consumidor.

Associando-se a viabilidade técnica à econômica, a troca iônica se mostrou mais interessante, analisando custos posteriores com mão de obra, manutenções, energia e bombeamento. Por isso, este método é o escolhido como mais adequado para implantação na ETA Habitasul – Jurerê internacional.

## 6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Afim de se obter um estudo mais completo e de poder definir o método ideal para o SAE, recomenda-se como estudos futuros:

- Estudar a possibilidade de troca de coagulante na ETA Habitasul, de sulfato de alumínio para PAC, considerando o custo-benefício para o tratamento convencional existente e na remoção de dureza;
- Realizar um estudo do período de retorno do investimento inicial;
- Realizar novos testes de sabor, aumentando-se o painel de testadores para maior precisão dos resultados;
- Estudar o impacto causado no tratamento biológico de esgotos ao receber o efluente gerado na osmose reversa e da regeneração de resina;
- Verificar a viabilidade de lançamento do efluente gerado na osmose reversa e pela regeneração da resina, sem tratamento, na rede de drenagem pluvial e seu impacto no corpo receptor;
- Aplicar o método de membranas em escala piloto no SAE;
- Realizar novas pesquisas com a precipitação química.

## REFERÊNCIAS

- APELL, J. N.; BOYER, T. H. *Combined ion exchange treatment for removal of dissolved organic matter and hardness*. Water Research, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 2419-2430, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.004>.
- APHA (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23<sup>th</sup> ed. Washington.
- AQUINO, A. *As Diferenças Entre Nanofiltração, Ultrafiltração, Microfiltração E Osmose Reversa*. 2011. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/649/as-diferencas-entre-nanofiltracao-ultrafiltracao-microfiltracao-e-osmose-reversa>. Acesso em: 16 jan. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7175: Cal hidratada para argamassas - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.
- BLUMBERG, E.; AZEVEDO NETTO, J. M. *Alcalinidade e dureza das águas naturais: processos de redução da Dureza*. Departamento de Águas e Esgotos. 28<sup>a</sup> ed. 1956.
- BENNETT, A. *High purity water: advances in ion exchange technology*. *Filtration & Separation*, [S.L.], v. 44, n. 6, p. 20-23, jul. 2007. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0015-1882\(07\)70180-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0015-1882(07)70180-5).
- BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. *Manual prático de análise de água*. 1<sup>a</sup> ed. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004. 146 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. *Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano*. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília: Ministério da Saúde, 2006
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. *Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde*. Brasília: Ministério da Saúde, 2017.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Técnica de abastecimento e tratamento de água*. 2. ed. rev. São Paulo: CETESB, 1976. 2 v.il.
- DEY, D.; HERZOG, A.; SRINIVASAN, V. *Chemical Precipitation: water softening*. 2007. 16 f. Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Michigan State University, East Lansing, 2007.
- FRISCHKORN, H.; ROCHA NETO, J. L. *Osmose reversa: limpeza química em membranas de dessalinizadores do ceará*. Revista Tecnológica. Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 61-76, jun. 2009.
- GLS (org.). *Les procédés d'adoucissement en traitement de l'eau potable*. 2006. Memotec n6. Disponível em: [http://gls.fr/wp-content/uploads/Memotec\\_6.pdf](http://gls.fr/wp-content/uploads/Memotec_6.pdf). Acesso em: 15 jan. 2021.

HAILU, Y; TILAHUN, E; BRHANE, A; RESKY, H; SAHU, O. *Ion exchanges process for calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite*. Groundwater For Sustainable Development, [S.L.], v. 8, p. 457-467, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.009>.

HEXIS. *Como os métodos de alcalinidade medem hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos?* 2020. Hexis. Disponível em: [https://suporte.hexis.com.br/app/answers/answer\\_view/a\\_id/1027215/~/~/como-os-m%E3%A9todos-de-alcalinidade-medem-hidr%E3%B3xidos%2](https://suporte.hexis.com.br/app/answers/answer_view/a_id/1027215/~/~/como-os-m%E3%A9todos-de-alcalinidade-medem-hidr%E3%B3xidos%2). Acesso em: 29 jan. 2021.

KREMER, T. O. *Resinas de Troca Iônica*. 2020. Elaborado por Tatiana de Oliveira Kremer. Disponível em: <http://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/resinas-de-troca-ionica/>. Acesso em: 05 jan. 2021.

MARCAL-SILVA, H.; DUARTE, F. V.; OLIVEIRA, A. L. G. *Avaliação do abrandamento de água calcária utilizando hidróxido de cálcio e carbonatação*. Águas Subterrâneas, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 310-314, 29 ago. 2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28871>.

MIERZWA, J. C. *O Uso Racional e o Reúso como Ferramentas para o Gerenciamento de Águas e Efluentes na Indústria: estudo de caso da kodak brasileira*. 2002. 2 v. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MORANDI, Carlo Gottardo. *Síntese, Caracterização e Otimização de Membranas Poliméricas Adsorventes para a Remoção de Disruptores Endócrinos de Águas Residuais*. 2011. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

OLIVEIRA, A. M. P. *Alcalinidade e Dureza das Águas*. 2020. Elaborado por Aline Maxiline Pereira Oliveira. Disponível em: <http://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/alcalinidade-e-dureza-das-aguas/>. Acesso em: 06 jan. 2021.

OLIVEIRA, T.; CARVALHO, A. R. P. *Osmose Reversa*. 2020. Elaborado por Tatiana de Oliveira/Antonio R. P. Carvalho. Disponível em: <http://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/osmose-reversa/>. Acesso em: 06 jan. 2021.

PIVELI, R. *Curso Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos*, Notas de Aula, EEUSP, 2001.

Portal Tratamento de Água. *Determinação da Alcalinidade*. 2008. Acervo: Enasa Engenharia. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/determinacao-da-alcalinidade/>. Acesso em: 29 jan. 2021.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. *Tratamento de Água: tecnologia atualizada*. São Paulo: Blucher, 1991. 332 p.

SCHAEP, J.; VAN DER BRUGGEN, B.; UYTTERHOEVEN, S.; CROUX, R.; VANDECASTEELE, C.; WILMS, D.; VAN HOUTTE, E.; VANLERBERGHE, F. *Removal*



*of hardness from groundwater by nanofiltration. Desalination*, [S.L.], v. 119, n. 1-3, p. 295-301, set. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0011-9164\(98\)00172-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0011-9164(98)00172-6).

SILVA, D. O.; CARVALHO, A. R. P. *Abrandamento*. 2020. Elaborado por Diego de Oliveira e Silva/Antonio R. P. Carvalho. Disponível em: <http://kurita.com.br/index.php/artigos-tecnicos/abrandamento/>. Acesso em: 06 jan. 2021.

VAN DER BRUGGEN, B.; VANDECASTEELE, C. *Removal of pollutants from surface water and groundwater by nanofiltration: overview of possible applications in the drinking water industry*. *Environmental Pollution*, [S.L.], v. 122, n. 3, p. 435-445, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0269-7491\(02\)00308-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00308-1).

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4ª ed., Belo Horizonte: UFMG, 2014.

WANG, Y; JU, L; XU, F; TIAN, L; JIA, R; SONG, W; LI, Y; LIU, B. *Effect of a nanofiltration combined process on the treatment of high-hardness and micropolluted water*. *Environmental Research*. [S.L.], v. 182, p. 1-9, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2019.109063>.

WATSON, B. M.; HORNBERG, C. D. *Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies*. *Desalination*, [S.L.], v. 72, n. 1-2, p. 11-22, abr. 1989. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0011-9164\(89\)80024-4](http://dx.doi.org/10.1016/0011-9164(89)80024-4).