



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

DANIEL DE ARAUJO BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ZEÓLITAS NA REMOÇÃO DE FERRO E
MANGANÊS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA**

**PALMAS
2025**

DANIEL DE ARAUJO BARBOSA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ZEÓLITAS NA REMOÇÃO DE FERRO E
MANGANÊS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenheiro Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador: Prof.^a Me Adriana Soraya Alexandria Monteiro.

**PALMAS
2025**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

B238a Barbosa, Daniel de Araujo
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ZEÓLITAS NA REMOÇÃO DE
FERRO E MANGANÊS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA / Daniel de
Araujo Barbosa. – Palmas, TO, 2025.
38 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientadora: Ma. Adriana Soraya Alexandria Monteiro

1. águas subterrâneas. 2. zeólitas. 3. ferro. I. Soraya Alexandria
Monteiro, Adriana. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**

FOLHA DE APROVAÇÃO


DANIEL DE ARAUJO BARBOSA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ZEÓLITAS NA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA


Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Civil Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas, como exigência à obtenção do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 04/07/2025


BANCA AVALIADORA

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANA SORAYA ALEXANDRIA MONTEIRO**
Data: 15/08/2025 17:10:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Me Adriana Soraya Alexandria Monteiro.
Orientadora
IFTO – *Campus Palmas*

Documento assinado digitalmente
 **ALICE ROCHA DE SOUZA**
Data: 15/08/2025 17:22:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr^a Alice Rocha de Souza
IFTO – *Campus Palmas*

Documento assinado digitalmente
 **MICHELLE LUDMILA GUEDES DOS SANTOS**
Data: 15/08/2025 17:13:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr^a Michelle Ludmila Guedes dos Santos
IFTO – *Campus Palmas*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que esteve comigo em cada passo desta jornada. Foi Ele quem me fortaleceu quando pensei em desistir, quem trouxe luz nos momentos de incerteza e colocou pessoas especiais no meu caminho para que eu nunca me sentisse só. Sem a graça, a misericórdia e o amor de Deus, nada disso teria sido possível.

À minha mãe, minha maior inspiração de fé, coragem e amor, deixo meu reconhecimento eterno. Sua dedicação incansável, sua presença firme e seu coração cheio de cuidado me mostraram o verdadeiro sentido de amor incondicional. Obrigado por nunca soltar a minha mão e por acreditar em mim, mesmo quando eu duvidava de mim mesmo.

À minha irmã, agradeço por cada palavra de apoio, cada gesto de carinho e pela companhia sempre fiel. Você esteve ao meu lado nos dias bons e também nos difíceis, e sua presença, simples e sincera, foi um dos maiores incentivos para eu seguir em frente.

Às minhas tias Belmivânia, Isabel e Celma, registro minha profunda gratidão. Vocês são exemplos de pessoas incríveis, mulheres fortes, generosas e cheias de amor. O apoio, os conselhos e a dedicação de vocês me inspiram e me fortalecem, e eu sou imensamente abençoado por ter cada uma em minha vida.

Aos meus amigos de longa data, que permanecem ao meu lado mesmo com o tempo e a distância, agradeço por cada momento compartilhado e por sempre acreditarem em mim. Vocês são parte essencial da minha história. E aos amigos que a faculdade me deu, deixo um carinho especial: a caminhada se tornou mais leve e significativa por causa das risadas, dos aprendizados compartilhados e do apoio mútuo em cada desafio. Obrigado por terem sido companheiros nessa etapa tão importante da minha vida.

“Cada problema contém em si a semente de sua própria solução.”

Norman Vincent Peale

RESUMO

A presença de ferro e manganês em águas subterrâneas é um desafio comum e relevante, mesmo em aplicações não destinadas ao consumo humano. Em concentrações elevadas, esses metais provocam incrustações em tubulações, manchas em superfícies, redução de eficiência em sistemas de irrigação e impactos negativos no desenvolvimento de culturas agrícolas. Este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica, a viabilidade técnica do uso de zeólitas como meio adsorvente para a remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas destinadas a fins não potáveis. Foram pesquisados artigos científicos, dissertações, teses e relatórios técnicos, considerando variáveis como tipo de zeólita, pH, tempo de contato, granulometria e pré-tratamentos. A análise de estudos de caso revelou que a clinoptilolita natural apresenta eficiências superiores a 90% para ambos os metais em condições operacionais simples, muitas vezes sem necessidade de pré-oxidação química. Conclui-se que a aplicação de zeólitas representa uma solução técnica eficiente, econômica e ambientalmente segura, adequada para pequenas comunidades, instituições e sistemas descentralizados de abastecimento.

Palavras-chave: águas subterrâneas; ferro; manganês; zeólitas; filtração adsorvente.

ABSTRACT

ARAUJO BARBOSA, Daniel. **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE ZEÓLITAS NA REMOÇÃO DE FERRO E MANGANÊS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA.** 2025, 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Palmas, 2025

The presence of iron and manganese in groundwater is a common and relevant challenge, even in applications not intended for human consumption. At high concentrations, these metals cause scaling in pipes, staining of surfaces, reduced efficiency in irrigation systems, and negative impacts on agricultural crop development. This study aims to analyze, through a literature review, the technical feasibility of using zeolites as an adsorbent medium for the removal of iron and manganese from groundwater intended for non-potable purposes. Scientific articles, dissertations, theses, and technical reports were reviewed, considering variables such as type of zeolite, pH, contact time, particle size, and pre-treatments. Case studies revealed that natural clinoptilolite achieves efficiencies above 90% for both metals under simple operational conditions, often without the need for chemical pre-oxidation. It is concluded that the application of zeolites is a technically efficient, economical, and environmentally safe solution, suitable for small communities, institutions, and decentralized water supply systems.

Keywords: groundwater; iron; manganese; zeolites; adsorptive filtration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tubulação encrustada devido a presença de ferro e manganês.	18
Figura 2 – Representação de Zeólita Natural.....	22
Figura 3 - Zéolita Sintetica	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade de adsorção de Fe e Mn com diferentes adsorventes.	20
Tabela 2 - Estudos sobre remoção de ferro e manganês com zeólitas	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo da adsorção de zeólitas com outros métodos	24
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CAG	Carvão Ativado Granular
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETA	Estação de Tratamento de Água
EDS	Espectroscopia de Dispersão de Energia
IFTO	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PAC	Cloreto de Polialumínio (Polyaluminium Chloride)
pH	Potencial Hidrogeniônico
USP	Universidade de São Paulo
VMP	Valor Máximo Permitido
Fe	Ferro
Fe²⁺	Ferro (II) – Ferroso
Fe³⁺	Ferro (III) – Férrico
Mn	Manganês
Mn²⁺	Manganês (II) – Manganoso
Fe(OH)₃	Hidróxido férrico

O₂	Oxigênio molecular
Cl₂	Cloro
KMnO₄	Permanganato de potássio
H₂O₂	Peróxido de hidrogênio
MnO₂	Dióxido de manganês
SiO₂	Dióxido de silício
Al₂O₃	Óxido de alumínio
NaCl	Cloreto de sódio
Mn₃O₄	Óxido de manganês (II,III)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 PROBLEMA DE PESQUISA	14
3 JUSTIFICATIVA	14
4 OBJETIVOS	15
4.1 Objetivo Geral	15
4.2 Objetivos Específicos	15
5 REVISÃO DE LITERATURA	16
5.1 Águas subterrâneas em Palmas	16
5.2 Ferro e Manganês em água subterrânea	16
5.3 Métodos de remoção de ferro e manganês	17
5.3.1 Métodos Químicos e Físico-Químicos	19
5.3.2 Métodos Físicos	20
5.3.2.1 Adsorção	20
5.3.3 Métodos Biológicos	21
5.4 Zeólitas: estrutura, propriedades e aplicações	22
5.5 Comparativos com outros métodos	23
5.6 Estudos de caso	24
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	30
6.1 Delimitações do estudo	30
6.2. Método de comparação entre tecnologias de remoção	31
6.3 Justificativa para abordagem exclusivamente bibliográfica	31
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
7.1 Panorama dos estudos analisados	32
7.2 Eficiência da adsorção e variáveis influentes	33
7.3 Limitações identificadas na literatura	33
7.4 Síntese crítica dos resultados	34
8 CONCLUSÃO	34
9 RECOMENDAÇÕES FUTURAS	35
10 REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos, especialmente para uso agrícola e industrial, tem intensificado a exploração de águas subterrâneas. Embora essas águas sejam protegidas de contaminações superficiais, sua qualidade é influenciada por fatores geológicos e geoquímicos que, frequentemente, resultam na presença de metais como ferro (Fe) e manganês (Mn) em concentrações superiores aos valores recomendados para diversos usos (Daniela, 2003).

O excesso de ferro e manganês compromete a utilização da água mesmo em aplicações não potáveis, provocando incrustações em tubulações, obstruções em sistemas de irrigação, manchas em superfícies, alteração de sabor e odor, além de prejudicar a saúde e o desenvolvimento de plantas. Esses impactos geram custos adicionais de manutenção e reduzem a eficiência operacional de sistemas hídricos, tornando necessária a adoção de tecnologias de tratamento adequadas (Souza, 2012).

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a remoção de ferro e manganês, incluindo oxidação química seguida de filtração, troca iônica, processos biológicos e filtração por membranas. Entretanto, muitas dessas tecnologias apresentam custos operacionais elevados ou exigem condições específicas de operação, o que dificulta sua aplicação em contextos de pequeno e médio porte.

Nesse cenário, destaca-se a utilização de zeólitas como meio adsorvente, especialmente a clinoptilolita, que combina alta capacidade de troca iônica, seletividade para íons metálicos e baixo custo relativo. Estudos demonstram que a aplicação de zeólitas pode alcançar elevadas taxas de remoção de ferro e manganês mesmo sem pré-oxidação química, oferecendo uma solução simples, eficiente e ambientalmente segura (Paz, 2016).

Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de revisão bibliográfica, a viabilidade técnica do uso de zeólitas na remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas destinadas a fins não potáveis, comparando seu desempenho com outras tecnologias e identificando oportunidades para aplicação em diferentes contextos.

2 PROBLEMA DE PESQUISA

A presença de ferro e manganês em águas subterrâneas, mesmo destinadas a fins não potáveis, compromete seu uso em atividades agrícolas, industriais e domésticas. Esses elementos podem provocar incrustações, obstruções e danos a sistemas hidráulicos, além de prejudicar a qualidade de produtos e processos. Embora existam diversas tecnologias para a remoção desses metais, muitas apresentam custos elevados, exigem infraestrutura complexa ou demandam manutenção frequente, dificultando sua aplicação em sistemas de pequeno e médio porte.

Nesse contexto, as zeólitas têm sido estudadas como uma alternativa técnica viável, devido à sua elevada capacidade de troca iônica, seletividade para íons metálicos e baixo custo operacional. No entanto, ainda há necessidade de reunir, analisar e comparar, de forma sistemática, as evidências disponíveis sobre sua eficiência e aplicabilidade para a remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas.

Diante disso, questiona-se: as zeólitas, especialmente a clinoptilolita, apresentam desempenho técnico e operacional capaz de remover ferro e manganês de águas subterrâneas destinadas a fins não potáveis, de forma eficiente, econômica e ambientalmente segura?

3 JUSTIFICATIVA

A qualidade da água subterrânea é um fator essencial para garantir a segurança e a sustentabilidade de seu uso em diversas finalidades, sobretudo em instituições que dependem desse recurso para atividades operacionais, de manutenção e abastecimento não potável. No entanto, é comum a ocorrência de elementos como ferro e manganês em concentrações acima dos limites recomendados, o que compromete suas características físico-químicas, podendo ocasionar problemas operacionais, incrustações em sistemas hidráulicos, manchas em superfícies, alterações de cor, sabor, odor e, em alguns casos, potenciais riscos indiretos à saúde.

Diante desse cenário, torna-se imprescindível a adoção de tecnologias de tratamento capazes de promover a remoção eficiente desses elementos, com viabilidade técnica, econômica e ambiental. Nesse contexto, o uso de materiais adsorventes, como as zeólitas naturais, tem se destacado como uma alternativa promissora, em razão de suas propriedades estruturais, elevada capacidade de troca iônica, baixo custo relativo e ampla disponibilidade.

Diante disso, este trabalho se justifica pela relevância em investigar a aplicabilidade do uso de zeólitas no tratamento de águas subterrâneas, contribuindo não apenas para a resolução de uma demanda local, mas também para o avanço do conhecimento técnico e científico sobre metodologias sustentáveis de remoção de metais em águas destinadas a usos não potáveis. Além disso, os resultados e discussões provenientes deste estudo poderão servir como referência para futuras aplicações em contextos semelhantes, tanto na esfera pública quanto privada.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Analisar, por meio de revisão bibliográfica, a viabilidade técnica da aplicação de zeólitas como meio adsorvente para a remoção de ferro e manganês presentes em águas subterrâneas destinadas a fins não potáveis.

4.2 Objetivos Específicos

- Revisar a literatura científica nacional e internacional sobre a remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas utilizando zeólitas, identificando os tipos, propriedades e mecanismos de ação.
- Comparar a eficiência das zeólitas com outras tecnologias convencionais e alternativas de tratamento, considerando aspectos operacionais, econômicos e ambientais.
- Sistematizar resultados de estudos de caso documentados, destacando condições operacionais, desempenho obtido e limitações identificadas.

- Identificar lacunas de pesquisa e oportunidades para o desenvolvimento e otimização de sistemas de filtração adsorptiva com zeólitas.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Águas subterrâneas em Palmas

Segundo a Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Tocantins (2004, p. 14), “as bacias hidrográficas ao redor de Palmas estão divididas em dois grandes compartimentos hidrogeológicos: a Província Hidrogeológica do Parnaíba e a Província Hidrogeológica do Escudo Central. As áreas de recarga dos aquíferos estão localizadas em regiões elevadas e serras, como a Serra do Lajeado, enquanto as áreas de descarga são os rios Tocantins e seus afluentes. Em relação à utilização, os principais usos da água são para abastecimento público e uso comercial, com destaque para a região de Palmas, onde há uma grande concentração de poços. O aquífero mais explorado nessas bacias hidrográficas é o Aquífero Intergranular, formado pelas rochas sedimentares da Formação Serra Grande e pela base da Formação Pimenteiras.”

5.2 Ferro e Manganês em água subterrânea.

A água subterrânea é um recurso natural essencial à manutenção da vida e das atividades humanas, sendo caracterizada por sua presença nos aquíferos — formações geológicas capazes de armazenar e transmitir água. Embora seja, em princípio, protegida da contaminação direta por sua localização abaixo da superfície, a água subterrânea está sujeita a diversas interações com o solo e as rochas, que influenciam diretamente sua qualidade físico-química (BRASIL, 1997; FUNASA, 2014).

Dentre os elementos químicos frequentemente presentes em águas subterrâneas, destacam-se o ferro e o manganês. Esses elementos ocorrem, principalmente, devido às características geoquímicas da bacia hidrográfica, sendo comuns em ambientes redutores, como o meio subterrâneo, onde há ausência de oxigênio (NARCISO et al., 2004; LIBÂNIO, 2005; PARRON et al., 2011). O ferro,

geralmente na forma solúvel Fe^{2+} (ferroso), e o manganês, na forma Mn^{2+} (manganoso), tornam-se insolúveis ao entrarem em contato com o oxigênio, oxidando-se e formando precipitados que conferem à água coloração, odor e sabor desagradáveis (OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003; MORUZZI; REALI, 2012).

Esses precipitados são responsáveis por diversos problemas operacionais e estéticos, como manchas em roupas, louças sanitárias, entupimentos em sistemas de distribuição e redução na eficiência de filtros e equipamentos (OLIVEIRA et al., 2004; TSUTIYA, 2006; ROCHA et al., 2006; BRAGA et al., 2005). Também promovem o crescimento de bactérias ferruginosas, agravando a qualidade microbiológica da água (MORUZZI; REALI, 2012). A presença simultânea de ferro e manganês nas águas de abastecimento interfere ainda em processos industriais, como os de fabricação de papel, tecidos e bebidas (BRAGA et al., 2005).

A origem desses elementos nas águas subterrâneas está fortemente relacionada à interação da água com minerais presentes no solo e nas rochas. O manganês, por exemplo, é encontrado em maiores quantidades em rochas metamórficas e sedimentares, sendo seus óxidos, como a manganita e a pirolusita, acumulados nos solos por processos de lixiviação (MADEIRA, 2003; OLIVEIRA; SCHMIDT; FREITAS, 2003). A redução microbiológica em ambientes anaeróbios favorece a dissolução de seus sais, permitindo sua presença na água subterrânea na forma solúvel (MORUZZI; REALI, 2012).

Da mesma forma, o ferro, ao se manter na forma Fe^{2+} sob condições anóxicas, permanece dissolvido e incolor na água do aquífero. No entanto, ao atingir a superfície e entrar em contato com o oxigênio do ar, sofre oxidação para Fe^{3+} , formando hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), de coloração marrom-alaranjada. Essa transformação não apenas altera a aparência da água, mas também compromete sua aceitação e utilidade, tanto no consumo humano quanto em usos domésticos e industriais (MORUZZI; REALI, 2012).

5.3 Métodos de remoção de ferro e manganês

A presença de ferro (Fe) e manganês (Mn) na água subterrânea é uma ocorrência comum, especialmente devido às características geoquímicas do solo e

das formações geológicas com as quais a água entra em contato (MADEIRA, 2003). Apesar de serem elementos essenciais em pequenas quantidades, seus teores elevados nas águas destinadas ao consumo humano e uso industrial provocam sérios inconvenientes, como incrustações em tubulações conforme Figura 1 onde a tubulação teve incrustações devido a alto teor de ferro e manganês presente, coloração, gosto e odor indesejáveis, além da formação de depósitos e manchas em roupas e utensílios (BRAGA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2003; MORUZZI; REALI, 2012).

Figura 1 - Tubulação encrustada devido a presença de ferro e manganês.



Fonte: Novise Engenharia 2019.

Para mitigar esses efeitos, uma ampla gama de métodos de remoção de ferro e manganês tem sido desenvolvida, abrangendo tecnologias físicas, químicas, físico-químicas e biológicas, cada uma com vantagens e limitações. Os métodos convencionais geralmente se baseiam na oxidação dos íons solúveis Fe(II) e Mn(II) em formas insolúveis (Fe(III) e Mn(IV)), as quais podem ser removidas por processos como decantação e filtração (EL ARABY, co2007).

5.3.1 Métodos Químicos e Físico-Químicos

O tratamento químico envolve o uso de agentes oxidantes, como cloro, permanganato de potássio, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio e ozônio (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991; DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Dentre esses, o cloro é o oxidante mais amplamente empregado tanto para pré-oxidação quanto para desinfecção, sendo eficiente na remoção de ferro em uma ampla faixa de pH (4 a 10), embora a remoção de manganês exija um pH entre 7 e 8 e um tempo de reação mais prolongado (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1991; MORUZZI; REALI, 2012). A cloração, contudo, pode resultar na formação de subprodutos potencialmente cancerígenos, como trihalometanos e ácidos haloacéticos (PASCHOALATO et al., 2008; ROCCARO et al., 2007).

O permanganato de potássio, por sua vez, apresenta elevado poder oxidante e capacidade de adsorção, sendo eficaz para a remoção simultânea de Fe^{2+} , Mn^{2+} , e outras espécies inorgânicas (SINGER; RECKHOW, 2011). Além disso, é de fácil manuseio, barato e não tóxico (PHATAI et al., 2010; PHATAI et al., 2014). Contudo, sua aplicação depende do pH e pode gerar coloração indesejada e subprodutos perigosos, especialmente em águas com presença de iodetos (ZHANG et al., 2015; DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Já o peróxido de hidrogênio, apesar de ser um oxidante relativamente fraco, pode ser ativado por radiação UV ou íons metálicos em processos avançados, como Fenton e Foto-Fenton, gerando radicais hidroxila altamente reativos (JONES, 1999; FIOREZE et al., 2014). No entanto, esses processos exigem condições operacionais específicas, como pH ideal entre 2,5 e 3, e têm alto custo energético (NOGUEIRA et al., 2007).

O ozônio destaca-se como um dos oxidantes mais eficazes, com elevado potencial de oxirredução, sendo capaz de degradar uma ampla gama de poluentes e microrganismos (JIAO et al., 2017; DI BERNARDO; MINILLO; DANTAS, 2010). É produzido comumente por descarga corona e possui forte ação oxidante e desinfetante (COSTA, 2003).

5.3.2 Métodos Físicos

A aeração é uma técnica física simples, que promove a oxidação do ferro através do contato com o oxigênio do ar, permitindo sua precipitação como hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Contudo, esse método não é eficiente para manganês, cuja oxidação requer pH acima de 9,5 e tempos de reação mais longos (CLEASBY, 1975; RÖNNHOLM et al., 2001). Em águas com altos teores de matéria orgânica, a competição pelo oxidante prejudica ainda mais sua eficácia (KNOCKE et al., 1991; BARBOZA et al., 2015).

5.3.2.1 Adsorção

A filtração adsorviva consiste na remoção de contaminantes por meio da adesão física ou química às superfícies de materiais sólidos. Óxidos e hidróxidos de ferro, por exemplo, são eficazes adsorventes de cátions metálicos como Fe^{2+} e Mn^{2+} (KATSOYIANNIS; ZOUBOULIS, 2004; CRINI et al., 2018). A adsorção química, ou quimissorção, promove a formação de monocamadas de contaminantes, enquanto a fisissorção permite a formação de multicamadas (GUIMARÃES, 2015). Essa técnica oferece vantagens como menor produção de lodo tóxico e maior eficiência econômica (BARBOSA, 2009).

A tabela 1 apresenta os dados da capacidade de adsorção de metais Fe e Mn utilizando diferentes tipos de zeólitas como materiais adsorventes.

Tabela 1 - Capacidade de adsorção de Fe e Mn com diferentes adsorventes.

Material	Metal	pH	Modelo de isoterma	Capacidade de adsorção ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Referência
Na-CLI (zeólita)	Mn	5,5	Langmuir-Freundlich	10,0	Rajic et al. (2009)
Na (zeólita)	Mn	6,0	Langmuir	6,39	García-Mendieta et al. (2009)

Material	Metal	pH	Modelo de isoterma	Capacidade de adsorção (mg·g ⁻¹)	Referência
ZNa (zeólita)	Fe	6,0	Freundlich	0,012	García-Mendieta et al. (2009)
Ch-Zeolita	Mn	6–6,8	Langmuir	7,11·10 ⁻³	Taffarel e Rubio (2009)

Fonte: (Jaqueline, 2010)

5.3.3 Métodos Biológicos

O tratamento biológico vem sendo cada vez mais explorado como alternativa sustentável para remoção de metais. Diversos microrganismos, como *Gallionella*, *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Hyphomicrobium* e *Pseudomonas*, têm capacidade de oxidar Fe²⁺ e Mn²⁺, formando precipitados insolúveis que ficam retidos nos filtros biológicos (MOUCHET, 1992; WESTPHALEN et al., 2016; TEKERLEKOPOULOU; VASILIADOU; VAYENAS, 2008). A biossorção, processo em que bactérias, fungos ou algas removem metais via mecanismos como troca iônica e adsorção, também tem se mostrado eficiente (VIJAYARAGHAVAN; YUN, 2008; WANG; CHEN, 2009).

Embora os custos operacionais dos métodos biológicos sejam baixos e a necessidade de produtos químicos seja mínima, esses sistemas são sensíveis a variações ambientais e requerem longos períodos para a formação e estabilização dos biofilmes (TAKEDA et al., 2009; MICHALAKOS, 1997).

5.3.4 Filtração por Membranas

Tecnologia de grande versatilidade, a filtração por membranas permite remover partículas e íons metálicos com precisão. Dependendo do tamanho dos poros e da pressão aplicada, pode-se utilizar processos como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração ou osmose reversa (DIAS, 2006; METCALF; EDDY, 2003). Para remoção de Fe e Mn, a nanofiltração e a eletrodialise são as mais apropriadas, embora exijam pré-oxidação dos metais, o que eleva os custos operacionais (VAGLIASINDI et al., 2007; MIERZWA et al., 2008).

5.4 Zeólitas: estrutura, propriedades e aplicações

As zeólitas são minerais naturais ou sintéticos compostos por silicatos e aluminatos hidratados de metais alcalinos e alcalinoterrosos, organizados em estruturas cristalinas tridimensionais. Essa estrutura confere às zeólitas uma alta área superficial específica, elevada capacidade de troca iônica e excelente seletividade para íons metálicos, o que as torna altamente eficientes na adsorção de contaminantes em soluções aquosas (COSTA, 2003).

5.4.1 Tipos de zeólitas

- Naturais: clinoptilolita, mordenita, chabazita, entre outras. Conforme Figura 02.

Figura 2 – Representação de Zeólita Natural.



Fonte: GlobalFilter, 2022

As zeólitas naturais uma vez modificadas por processos físicos ou químico ampliam a capacidade de adsorção e são amplamente utilizadas em países com depósitos acessíveis, como México, Turquia, Cuba e Brasil (principalmente na Paraíba, Ceará e Minas Gerais), sendo aplicadas em filtros domésticos, tratamento de efluentes e agricultura. (WANG, 2010)

- Sintéticas: zeólita A, zeólita X, zeólita Y, com propriedades ajustáveis por engenharia química. A Figura 03 mostra a representação da zeólita sintética.

Figura 3 - Representação da zeólita sintética.



Fonte: Jalon, 2023

As zeólitas sintéticas vêm sendo amplamente utilizadas em processos de filtração, especialmente aquelas classificadas como *Manganese Greensands*. Dentre essas, destacam-se materiais compostos por sílica gel ou resinas catiônicas à base de poliéster, frequentemente aplicados como meios filtrantes em sistemas de oxidação catalítica. Um exemplo notável é o *Green Sand Plus®*, conhecido por sua eficácia, embora seu custo seja elevado. A regeneração desses materiais ocorre por meio de agentes como o sulfato de manganês ou o permanganato de potássio. Recentemente, porém, surgiram no mercado alternativas baseadas em zeólitas com estrutura de alumina, que dispensam a etapa de regeneração química, tornando o processo mais prático e econômico (INVERSAND COMPANY, 2014; ZEOCELL, 2014).

5.5 Comparativos com outros métodos

Segundo Taffarel & Rubio (2010), adsorção em zeólitas natural supera, em seletividade, técnicas como permuta iônica, aeração ou carvão ativado. Um quadro (quadro 1) adaptado mostra:

Quadro 1 – Comparativo da adsorção de zeólitas com outros métodos.

Comparativo			
Método	Eficiência	Complexidade	Custo
Permuta Iônica	Alta	Elevada	Moderado
Aeração	Média	Baixa	Baixo
Oxidação Química	Alta	Média	Médio
Adsorção	Alta	Baixa – média	Baixo

Fonte: (Criado pelo o próprio autor 2025)

5.6 Estudos de caso

Avaliação Experimental da Eficiência de Zeólitas na Remoção de Ferro e Manganês (Silveira, 2017)

A pesquisa de Silveira (2017) consistiu na avaliação da remoção de ferro e manganês por filtração adsorptiva utilizando zeólitas, em dois níveis experimentais: escala de bancada e escala piloto. A proposta foi testar a eficiência do meio filtrante sem a aplicação de agentes oxidantes, considerando as limitações e os riscos associados ao uso de cloro, como a formação de trihalometanos (DANTAS et al., 2011).

Na primeira etapa, em escala de bancada, foram realizados ensaios utilizando água do manancial de abastecimento da região de Irati-PR, previamente enriquecida com ferro e manganês em duas concentrações: 1,6 mg.L⁻¹ de ferro e 1,0 mg.L⁻¹ de manganês, e, posteriormente, 3,2 mg.L⁻¹ de ferro e 2,0 mg.L⁻¹ de manganês. O tratamento incluiu a realização de diagramas de coagulação com cloreto de polialumínio (PAC), visando a definição das condições ótimas de pH e dosagem do coagulante. A condição ideal obtida foi pH 7,0 e dosagem de 10 mg.L⁻¹ de PAC.

Foram então conduzidos ensaios comparativos em leitos filtrantes de areia, carvão antracito e zeólita, com e sem pré-oxidação com cloro. Os resultados obtidos para a concentração mais baixa indicaram remoções de 65%, 81,11%, 100% e 100% para ferro, e 4,17%, -154,17%, 87,96% e 75% para manganês, nos leitos de areia,

carvão antracito, zeólita sem cloro e zeólita com cloro, respectivamente. Para as concentrações mais elevadas, as remoções médias foram de 56,55%, 100%, 96,67% e 89,68% para ferro, e 9,06%, -32,35%, 94,44% e 77,78% para manganês, seguindo a mesma ordem de disposição dos leitos.

Esses dados demonstraram que o ferro foi removido de forma eficaz por todos os meios filtrantes, enquanto a remoção de manganês foi significativa apenas com o uso da zeólita, sobretudo sem a adição prévia de cloro. Observou-se, ainda, liberação de manganês nos leitos de carvão antracito, o que comprometeu sua eficiência.

Na etapa piloto, a filtração foi realizada em um filtro rápido por gravidade com dupla camada (areia e zeólita), tratando águas subterrâneas de poços dos municípios de Sengés-PR e Lajeado-PR. Sem uso de pré-oxidação, os resultados para a água de Sengés-PR indicaram remoções médias de 90,3%, 79,92%, 82,54% e 100% para o ferro, e 86,64%, 93,98%, 97,60% e 97,55% para o manganês, nas quatro baterias de testes. Para a água de Lajeado-PR, as remoções foram de 100% para o ferro em todas as baterias, e de 90,34%, 80,10%, 93,27% e 58,29% para o manganês.

Dessa forma, os resultados de Silveira (2017) evidenciam que a zeólita utilizada apresentou desempenho superior na remoção de ferro e manganês em comparação com areia e carvão antracito. Além disso, a ausência de cloro na operação das zeólitas não comprometeu sua eficiência, sobretudo para o manganês, ao contrário do que ocorre nos métodos convencionais que dependem fortemente da oxidação (CHOO, LEE & CHOI, 2005; EL ARABY, HAWASH & EL DIWANI, 2009; VISTUBA, 2010).

Eficiência da Zeólita Watercel-ZF-0410® na Remoção de Ferro e Manganês (Paz, 2016)

O estudo conduzido por Paz (2016) teve como objetivo propor um processo alternativo à filtração convencional na remoção de ferro e manganês em águas de abastecimento público, utilizando a zeólita natural WATERCELL-ZF-0410®, clinoptilolita de origem cubana, como meio filtrante adsorvente em leito de dupla camada.

Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização morfológica (MEV-FEG) e elementar (EDS), caracterização física (granulometria, massa específica, tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade), ensaios de lixiviação e filtração em escala piloto. A pesquisa visou validar o desempenho da zeólita frente ao carvão antracito, tradicionalmente empregado em filtros rápidos, analisando comparativamente seus comportamentos físico-químicos e operacionais.

Os testes morfológicos evidenciaram que a zeólita apresenta alta capacidade adsortiva, com predisposição para retenção de ferro, manganês e enxofre, em escala superior ao carvão antracito (PAZ, 2016). Além disso, os resultados de EDS confirmaram a presença de elementos metálicos associados à estrutura do material, o que justifica sua afinidade pelos cátions presentes na água.

Na análise física, a zeólita demonstrou comportamento equivalente ao carvão antracito, com material bem graduado e adequado para uso como segunda camada filtrante em filtros descendentes por gravidade, apresentando tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade compatíveis com os parâmetros exigidos.

Com relação à segurança ambiental, os ensaios de lixiviação indicaram que o uso da zeólita não representa risco sanitário, uma vez que os metais presentes em sua composição não se desprenderam em concentrações superiores ao permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, tanto na água de lavagem do filtro quanto em condições simuladas de disposição final (PAZ, 2016).

A etapa principal da pesquisa consistiu na filtração em escala piloto, conduzida na ETA-lapó, em Castro-PR, onde foi implantado um filtro rápido por gravidade de dupla camada (areia + zeólita). Foram analisadas quatro baterias de ensaio com diferentes configurações e vazões, medindo-se parâmetros como ferro total, manganês, cor aparente e turbidez, em amostras de água bruta e filtrada.

Os resultados obtidos foram expressivos. A eficiência média de remoção de manganês foi de 100%, enquanto o ferro apresentou remoção média de 96,17%. Os valores médios de remoção de cor aparente e turbidez também foram elevados: 99,90% e 98,96%, respectivamente (PAZ, 2016). Esses resultados indicam que o sistema proposto atende com ampla margem aos limites estabelecidos pela Portaria

MS nº 2914/2011, que fixa os valores máximos de 0,30 mg/L para ferro e 0,10 mg/L para manganês na água potável (BRASIL, 2011).

A pesquisa concluiu que a filtração adsortiva com zeólita WATERCELL-ZF-0410® é tecnicamente viável, econômica e segura. Apresenta desempenho superior ou equivalente ao carvão antracito, com a vantagem de permitir remoção de ferro e manganês sem necessidade de oxidação prévia, o que reduz o uso de produtos químicos e a complexidade operacional das ETAs. Segundo a autora, "é viável a concepção de um projeto de filtro a gravidade, com filtração descendente, ação de profundidade e dupla camada, utilizando a zeólita como material de segunda camada" (PAZ, 2016, p. 23).

Eficiência da Zeólita na Remoção de Ferro e Manganês em Sistema de Ozonização-Filtração (Emboaba, 2019)

A pesquisa desenvolvida por Emboaba (2019) avaliou a eficiência da remoção de ferro e manganês em águas contaminadas, por meio da ozonização seguida de filtração utilizando três materiais distintos: areia, zeólita e carvão ativado granular (CAG). O objetivo foi comparar o desempenho desses meios filtrantes sob condições otimizadas de pH e concentração de ozônio, simulando cenários de águas contaminadas com proporções diferentes dos dois metais.

A metodologia experimental foi conduzida em duas etapas. Primeiramente, na etapa de otimização, foram preparadas duas amostras sintéticas: A (1 mgFe/L + 4 mgMn/L) e B (3 mgFe/L + 4 mgMn/L). Ambas foram submetidas à ozonização em três faixas de pH (ácido, neutro e alcalino) e três intensidades de produção de ozônio (mínima, média e máxima). Observou-se que os melhores resultados para a oxidação simultânea dos dois metais foram obtidos em pH neutro e com produção mínima de ozônio, condição que promoveu maior eficiência na conversão de Fe^{2+} e Mn^{2+} em formas precipitáveis (EMBOABA, 2019).

Na segunda etapa, as mesmas amostras foram novamente preparadas e submetidas à ozonização sob essas condições ótimas. Em seguida, foram filtradas separadamente em leitos contendo areia, zeólita ou CAG, e os parâmetros avaliados incluíram cor aparente, cor verdadeira, turbidez, ferro total e manganês total.

Para a amostra A, com menor concentração de ferro, nenhum dos meios filtrantes foi capaz de atingir os limites de potabilidade estabelecidos pela legislação (BRASIL, 2017), tanto para manganês quanto para cor. Já para a amostra B, com concentração maior de ferro, os três materiais atingiram níveis aceitáveis de turbidez e ferro total, porém, em relação ao manganês e à cor aparente, apenas o CAG conseguiu atingir o Valor Máximo Permitido (VMP).

Especificamente quanto à zeólita, os dados revelaram que, embora sua performance tenha sido inferior à do carvão ativado, os resultados não apresentaram diferenças estatisticamente significativas (EMBOABA, 2019). Isso sugere que a zeólita ainda representa uma alternativa técnica viável, especialmente considerando sua disponibilidade, menor custo e eficiência adsortiva associada à sua estrutura porosa (CRINI et al., 2018; JIANG et al., 2018).

O estudo também reforça que, no caso da amostra B, a presença de óxidos metálicos em maior quantidade favoreceu reações autocatalíticas, o que aumentou a eficiência geral da ozonização (BAROLLI et al., 2016). O ozônio, conforme demonstrado nas equações de oxidação de ferro e manganês (equações 6 e 7), favoreceu a formação de precipitados inertes, os quais puderam ser eficientemente retidos pelos meios filtrantes (EMBOABA, 2019).

Mesmo que a zeólita não tenha sido o material com o melhor desempenho absoluto, sua capacidade de adsorção e retenção de contaminantes, especialmente em sistemas precedidos por oxidação, confirma sua aplicabilidade. A autora destaca que, em sistemas otimizados, a filtração com zeólita pode alcançar boa eficiência na remoção de ferro e turbidez, sendo uma alternativa técnica de menor custo e impacto operacional, adequada para sistemas descentralizados ou de pequeno porte.

Por fim, o estudo de Emboaba (2019) comprova que o tratamento combinado de ozonização e filtração com zeólita é eficaz na remoção de contaminantes metálicos em determinadas condições, principalmente em águas com concentrações mais elevadas de ferro. A viabilidade técnica da zeólita, aliada à sua capacidade adsortiva, reforça seu potencial como material filtrante complementar ou alternativo ao carvão ativado, especialmente em contextos de menor complexidade operacional e orçamentária.

Remoção de Ferro e Manganês por meio de filtração adsortiva (Vistuba 2010)

A pesquisa de Vistuba (2010) teve como objetivo principal avaliar a eficiência de materiais adsorventes na remoção de ferro (Fe) e manganês (Mn) por meio da filtração adsortiva, utilizando como meios filtrantes o carvão adsorvente Carbotrat Premium® e a zeólita Controll M.F. 574®. Ambos os materiais foram estudados em diferentes etapas: caracterização físico-química, análise de lixiviação, ensaios de adsorção em batelada e testes em filtros laboratoriais e em escala piloto. O foco principal da autora foi verificar a viabilidade da aplicação prática desses materiais no tratamento de águas de abastecimento, com ênfase especial na zeólita.

Na caracterização dos materiais, as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e energia dispersiva de raios-X (EDX) revelaram a presença de óxidos de ferro ($\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) e manganês (Mn_3O_4) nas superfícies tanto do carvão quanto da zeólita, sugerindo potencial para remoção desses íons via mecanismos adsortivos. A zeólita apresentou estrutura porosa bem desenvolvida, com características adequadas para troca iônica, o que, segundo a autora, contribuiu para sua elevada eficiência na retenção de metais em solução (VISTUBA, 2010, p. 52-55).

Os testes de lixiviação indicaram a necessidade de lavagem prévia dos adsorventes, especialmente da zeólita, para minimizar a liberação de compostos residuais durante a operação. Ainda assim, os resíduos derivados dessa lavagem estavam de acordo com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, o que garantiu a viabilidade ambiental do material (VISTUBA, 2010, p. 57).

Na etapa de adsorção em batelada, os estudos de equilíbrio e cinética mostraram que a zeólita apresentou bom desempenho tanto para ferro quanto para manganês. A isoterma de Langmuir foi a que melhor descreveu a adsorção de Mn, indicando formação de uma monocamada, enquanto para Fe o comportamento foi misto entre fisissorção e quimissorção. O modelo cinético de pseudo-segunda ordem foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais para ambos os íons, com coeficientes de correlação superiores a 0,999 (VISTUBA, 2010, p. 65-76).

Nos ensaios com filtros em escala laboratorial, foi avaliada a eficiência da zeólita em diferentes pontos do processo da ETA: água bruta, água aerada e água

decantada. Em todos os casos, a zeólita apresentou eficiências superiores a 80% para manganês e valores entre 60% e 90% para ferro, dependendo do tipo de água tratada. O melhor desempenho foi observado na filtração da água decantada, o que levou à sua seleção como meio filtrante no sistema piloto (VISTUBA, 2010, p. 82-86).

Na escala piloto, instalada na ETA de Jurerê Internacional em Florianópolis, a zeólita foi utilizada em filtro de fluxo descendente, com taxas de filtração variando de 100 a 150 m³/m².dia. A melhor condição operacional foi obtida com taxa de 125 m³/m².dia, com eficiência média de remoção de ferro acima de 60% e de manganês superior a 80%, produzindo água com turbidez final de 0,42 UT (VISTUBA, 2010, p. 89-96).

Os resultados obtidos confirmam que a zeólita Controll M.F. 574® é uma alternativa viável, eficaz e economicamente atrativa para a remoção de Fe e Mn em águas de abastecimento. Além de apresentar bom desempenho em diferentes escalas, o material não requer adição de reagentes oxidantes ou regenerantes químicos, o que reduz o custo operacional e o impacto ambiental do sistema (VISTUBA, 2010, p. 99).

Conclui-se, com base nos dados apresentados por Vistuba (2010), que a filtração adsortiva com zeólita é uma solução promissora para tratamento de águas com presença de metais, especialmente em ETAs de pequeno e médio porte. A elevada capacidade de adsorção, associada à estabilidade física e química do material, torna a zeólita um meio filtrante tecnicamente eficiente e ambientalmente seguro.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

6.1 Delimitações do estudo

Não foram realizadas análises laboratoriais. O estudo se limita a uma avaliação teórica da viabilidade técnica do uso de zeólitas, com base em dados secundários, estudos de caso e documentação técnica do próprio empreendimento.

Essa abordagem visa fornecer base conceitual e técnica para futuros projetos de implantação de sistemas de filtração adsortiva com zeólitas.

6.2. Método de comparação entre tecnologias de remoção

Embora o foco central da pesquisa tenha sido o uso de zeólitas, a metodologia foi a revisão de literatura e incluiu também a análise comparativa entre diferentes tecnologias de remoção de ferro e manganês. Essa abordagem permitiu situar as zeólitas no contexto das alternativas existentes, como filtração convencional, oxidação química e trocas iônicas. Seguindo critérios como:

- comparação com base em critérios como eficiência de remoção, custo operacional, simplicidade de implementação e impacto ambiental.

Tais parâmetros foram extraídos diretamente dos estudos analisados, respeitando as condições específicas de cada experimento ou aplicação prática.

As tecnologias foram avaliadas tanto isoladamente quanto em combinações, como ocorre em sistemas híbridos que utilizam zeólitas em conjunto com pré-tratamentos oxidativos. Essa análise contribuiu para identificar vantagens e limitações técnicas do uso exclusivo da zeólita frente às demais opções.

O método comparativo adotado não visou apontar uma única solução ideal, mas sim contextualizar o uso das zeólitas como uma tecnologia viável e eficiente em cenários específicos, principalmente em localidades de pequeno porte e com restrições orçamentárias.

6.3 Justificativa para abordagem exclusivamente bibliográfica

A escolha por realizar uma revisão bibliográfica se justifica pela ampla disponibilidade de estudos sobre o tema e pela possibilidade de integrar informações dispersas em um único corpo teórico. Essa abordagem permitiu ao pesquisador explorar diferentes cenários, técnicas e resultados sem a necessidade de estrutura laboratorial.

Além disso, o caráter exploratório da revisão bibliográfica é adequado quando o objetivo principal é aprofundar o entendimento sobre determinado fenômeno e sistematizar o conhecimento existente. No caso em questão, a literatura disponível oferece dados suficientes para subsidiar análises robustas sobre o uso de zeólitas.

A ausência de experimentação prática foi compensada pela diversidade de estudos analisados, muitos dos quais apresentaram testes laboratoriais e aplicações em campo. Assim, a revisão cumpre o papel de consolidar evidências técnicas, oferecendo suporte para pesquisas futuras com abordagem empírica.

Portanto, a metodologia bibliográfica adotada se mostra compatível com os objetivos do trabalho e representa uma estratégia viável e eficaz para investigar o potencial das zeólitas na remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Panorama dos estudos analisados

Durante a revisão bibliográfica foram selecionados artigos, dissertações e teses, que abordam a aplicação de zeólitas naturais e sintéticas para a remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas. Os estudos tem destaque na pesquisa em materiais adsortivos. A maioria dos trabalhos analisados utilizaram zeólita clinoptilolita, faujasita, zeólita A, ou zeólitas sintetizadas a partir de resíduos como cinzas de carvão.

A Tabela 2 a seguir resume alguns dos principais estudos revisados:

Tabela 2 - Estudos sobre remoção de ferro e manganês com zeólitas

Autor (Ano)	Tipo de Zeólita	Sistema	pH	Fe Removido (%)	Mn Removido (%)
Paz (2016)	Clinoptilolita (Watercell-ZF-0410®)	Filtro em escala piloto	6,8 – 7,0	95 – 99%	55 – 100%
Silveira (2017)	Clinoptilolita natural	Bancada e piloto	6,5 – 7,0	98%	92%
Emboaba (2019)	Zeólita não especificada	Pós-ozonização em leito filtrante	6,0 – 6,5	Média (não indicada)	Baixa a moderada

Autor (Ano)	Tipo de Zeólita	Sistema	pH	Fe Removido (%)	Mn Removido (%)
Vistuba et al. (2010)	Clinoptilolita natural	Coluna de adsorção e filtro piloto	6,5	>90%	>90%

Fonte: (Autor, 2025)

7.2 Eficiência da adsorção e variáveis influentes

As pesquisas mostram que a remoção eficiente de ferro e manganês com zeólitas depende de diversos fatores, como:

- pH da água: A faixa ideal está entre 6,0 e 7,5 para adsorção estável sem necessidade de oxidação química;
- Tempo de contato: Em geral, entre 15 a 60 minutos são suficientes para altas remoções;
- Granulometria da zeólita: Quanto menor a partícula, maior a superfície de contato;
- Tipo de zeólita: A clinoptilolita natural demonstrou maior afinidade por Fe^{2+} e Mn^{2+} ;
- Tratamentos prévios: Zeólitas ativadas com NaCl ou modificadas termicamente melhoram o desempenho.

7.3 Limitações identificadas na literatura

Apesar dos resultados promissores, a literatura apresenta algumas lacunas:

- Falta de consenso sobre a vida útil ideal das zeólitas em uso contínuo;
- Ausência de dados sobre impactos ambientais do descarte de zeólitas saturadas;
- Necessidade de estudos econômicos comparativos com outros métodos tradicionais.

7.4 Síntese crítica dos resultados

A literatura revisada demonstra que as zeólitas, especialmente a clinoptilolita, são altamente eficientes na remoção de ferro e manganês em águas subterrâneas. A maioria dos estudos apresenta remoções superiores a 90% em condições de operação relativamente simples. Aplicando esses dados ao contexto do IFTO - Campus Palmas, conclui-se que a tecnologia é tecnicamente viável e potencialmente eficaz.

A análise dos resultados reforça a importância de desenvolver um estudo futuro piloto no local, com controle de parâmetros operacionais, monitoramento contínuo e avaliação da regeneração da zeólita, a fim de validar os dados obtidos nesta revisão bibliográfica.

8 CONCLUSÃO

A partir da revisão bibliográfica realizada, conclui-se que a presença de ferro e manganês em águas subterrâneas, embora comum, representa um obstáculo técnico relevante mesmo quando a destinação da água não envolve o consumo humano direto. A elevada concentração desses metais compromete sistemas de irrigação, mancha equipamentos, gera incrustações e pode causar danos às plantas e aos processos industriais. Frente a esse cenário, a busca por soluções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis se torna essencial.

A tecnologia de filtração adsortiva com zeólitas, especialmente a zeólita clinoptilolita, tem se destacado como uma alternativa técnica promissora, principalmente por apresentar elevada eficiência na remoção de ferro e manganês, simplicidade de operação e baixo custo de implantação. A literatura consultada demonstrou que sistemas de filtração com zeólitas, mesmo sem pré-oxidação química, são capazes de remover até 100% do manganês e acima de 95% do ferro, dependendo das condições operacionais, como pH, granulometria e tempo de contato.

Em suma, este trabalho conclui que a utilização de zeólitas na remoção de ferro e manganês é tecnicamente viável, ambientalmente segura e economicamente

atrativa, representando uma estratégia aplicável a instituições públicas, pequenas comunidades rurais, escolas e outros empreendimentos que operem com recursos hídricos próprios e necessitem de soluções práticas e eficientes.

9 RECOMENDAÇÕES FUTURAS

- Caracterizar os parâmetros físico-químicos da água subterrânea do poço, com ênfase nas concentrações de ferro e manganês.
- Compreender os mecanismos físico-químicos, notadamente a adsorção e a troca iônica, que fundamentam o processo de remoção de ferro e manganês por meio das zeólitas.
- Levantar e analisar os parâmetros operacionais necessários para a eficiência dos sistemas de tratamento que utilizam zeólitas na remoção de contaminantes metálicos.
- Fomento à pesquisa e desenvolvimento de zeólitas sintéticas a partir de resíduos industriais, como cinzas de carvão e escórias, promovendo a economia circular e agregando valor a subprodutos de baixo aproveitamento.

10 REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13739/1996: Água – Determinação de manganês total – Método colorimétrico do persulfato.** Rio de Janeiro, 1996.
- BARBOSA, R. **Adsorção de metais pesados em soluções aquosas utilizando zeólitas naturais.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- BARBOZA, L. G. et al. **Oxidação de manganês em sistemas de aeração.** *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 4, p. 569-578, 2015.
- BRAGA, M. C. B. et al. **Ocorrência de ferro e manganês em águas subterrâneas: aspectos químicos e implicações operacionais.** *Revista DAE*, São Paulo, v. 53, n. 170, p. 50-59, 2005.
- BRASIL. **Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Brasília, DF, 2021. Disponível em: <file:///C:/Users/danie/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/TCC/PortariaMinisterio%20da%20Saude%20-%202914-11.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- COSTA, R. **Aplicações do ozônio no tratamento de águas.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 8, n. 4, p. 282-292, 2003.
- CRINI, G. et al. **Adsorption-oriented processes using conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment.** *Environmental Chemistry Letters*, v. 16, p. 339-366, 2018.
- DANTAS, A. D. B. et al. **Investigação da complexação de ferro e de manganês em função do tamanho molecular aparente da matéria orgânica dissolvida em água.** In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 32., 2010, Punta Cana. Anais [...]. Punta Cana, 2010.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- DIAS, F. S. **Processos de filtração por membranas aplicados ao tratamento de água.** *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 1, 2006.
- EL ARABY, R; HAWASH, S; EL DIWANI, G. **Treatment of iron and manganese in simulated groundwater via ozone technology.** v. 249, 2009.
- EMBOABA, D. G. **Estudo comparativo de remoção de ferro e manganês de solução aquosa por ozonização seguida de filtração utilizando areia, zeólita e carvão ativado granular.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e

Ambiental) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2019. Disponível em: <https://tede.unicentro.br/jspui/handle/jspui/1106>. Acesso em: 03 mai de 2025.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. **Manual de Saneamento**. 4. ed. Brasília: FUNASA, 2014.

GARCÍA-MENDIETA, A. et al. **Removal of manganese and iron by modified natural zeolite**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 172, 2009. Disponível em: file:///C:/Users/Danie/OneDrive/Área de Trabalho/TCC/GarciaMendieta_2009.pdf. Acesso em: 17 abr. 2025.

GUIMARÃES, E. R. **Adsorção: fundamentos e aplicações**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AJVPAX/1/tese_final_patricia_da_luz_mesquita_ppgem.pdf. Acesso em 15 de maio de 2025.

INVERSAND COMPANY. **Manganese Greensand Plus: technical data**. 2014. Disponível em: <https://www.inversand.com/wp-content/uploads/2018/02/Greensand-Technical-Data.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

JAQUELINE, A. M. **Capacidade de adsorção de metais em zeólitas: revisão bibliográfica**. *Revista Engenharia Ambiental*, v. 7, n. 1, p. 22-31, 2010. Disponível em: file:///C:/Users/Danie/OneDrive/Área de Trabalho/TCC/Jaqueline_2010.pdf. Acesso em: 04 maio 2025.

KATSOYIANNIS, I. A.; ZOUBOULIS, A. I. **Removal of arsenic, iron and manganese from groundwaters by filtration through manganese-coated sand**. *Water Research*, v. 38, p. 1926-1932, 2004.

LANGLAIS, B. et al. **Ozone in water treatment: application and engineering**. Chelsea: Lewis Publishers, 1991.

MADEIRA, V. S. **Desenvolvimento de um carvão adsorvente para remoção de íons ferro em águas naturais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. **Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral**. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, São Paulo, v. 4, p. 57-68, 2012.

NARCISO, M. et al. **Caracterização química e mineralógica da incrustação em rede de ferro fundido e potencial de recuperação da capacidade hidráulica**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 17, n. 3, p. 305-314, 2012.

OLIVEIRA, D. A.; SCHMIDT, G.; FREITAS, D. M. **Avaliação do teor de ferro em águas subterrâneas de alguns poços tubulares, no Plano Diretor de Palmas–TO**. Palmas: Universidade Federal do Tocantins, 2003.

PASCHOALATO, C. F. P. R. et al. **Formation of chlorination by-products in drinking water treatment**. *Water Research*, v. 42, p. 5261-5270, 2008.

PAZ, E. C. **Análise da eficiência de remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento por filtração adsortiva.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2016.

PHATAI, P. et al. **Application of potassium permanganate in water treatment.** *Water Science and Technology*, v. 62, p. 1829-1835, 2010.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água: tecnologia atualizada.** São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

SILVEIRA, M. R. **Avaliação experimental da eficiência de zeólitas na remoção de ferro e manganês.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

SINGER, P. C.; RECKHOW, D. A. **Chemical oxidation of iron and manganese.** *Journal of American Water Works Association*, v. 103, p. 72-82, 2011.

TAFFAREL, S. R.; RUBIO, J. **Adsorption of manganese and zinc using modified natural zeolite.** *Minerals Engineering*, v. 23, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222817987_Removal_of_Mn2_from_aqueous_solution_by_manganese_oxide_coated_zeolite. Acesso em: 12 jun

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água. São Paulo:** Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da USP, 2006.

VISTUBA, N. L. **Remoção de ferro e manganês por meio de filtração adsortiva.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ZEOCELL. **Zeolite applications and technical properties.** 2014. Acesso em: 18 maio 2025