

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Nathielly Santa Helena

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE PEDRAS AMETISTAS
COMO ADSORVENTE PARA A DESFLUORETAÇÃO DA ÁGUA**

Frederico Westphalen

Junho de 2024.

Nathielly Santa Helena

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE PEDRAS AMETISTAS
COMO ADSORVENTE PARA A DESFLUORETAÇÃO DA ÁGUA**

Nathielly Santa Helena apresentada ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Área de Concentração em Frederico Westphalen, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto do Santos Salbego

Frederico Westphalen, RS, Brasil

Junho de 2024.

Nathielly Santa Helena

**APROVEITAMENTO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE PEDRAS AMETISTAS
COMO ADSORVENTE PARA A DESFLUORETAÇÃO DA ÁGUA**

Nathielly Santa Helena apresentada ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Área de Concentração em Frederico Westphalen, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Aprovado em

Paulo Roberto do Santos Salbego, Dr. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Eliane Pereira dos Santos, Dra. (UFSM)

Bryan Brummelhaus de Menezes, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS

Junho de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Antônio e Suzana, por todo amor, paciência, apoio e compreensão ao longo da minha jornada acadêmica. Vocês foram meu ponto de partida e a inspiração para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Ao meu namorado, Lucas, que esteve ao meu lado me incentivando, encorajando, e fortalecendo nos momentos em que mais precisei. O amor que dedicou a mim foi essencial para que essa conquista fosse possível.

Aos meus familiares por todo carinho e aos meus amigos, pelo companheirismo e palavras de encorajamento que me ajudaram a enfrentar os momentos difíceis com determinação e persistência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me sustentou em todos os momentos e iluminou meu caminho para que aqui eu chegasse.

Agradeço também a minha família, que mesmo com todas as dificuldades não mediu esforços para que eu realizasse este meu sonho. Minhas avós, que me sustentaram em orações e sempre me acolheram com muito amor.

Ao meu orientador, Paulo, pela paciência, orientação e conselhos preciosos, que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, pela dedicação e conhecimento compartilhado, que enriqueceram minha formação e contribuíram para o meu crescimento profissional.

Agradeço também aos amigos que estiveram presentes nesta jornada, pelo apoio mútuo, companheirismo e pelas inúmeras trocas de conhecimento e experiências. Vocês tornaram essa jornada mais leve e prazerosa.

Aos colegas de Laboratório: Anna, Bryan, Gabriela, Haissa e Paulo. E as mestrandas: Gabriela e Milena, que me incentivaram e motivaram a seguir.

A todos os profissionais e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste Trabalho de Conclusão de Curso, meu muito obrigado.

RESUMO

REMOÇÃO DE FLÚOR UTILIZANDO REJEITO DE PEDRAS AMETISTAS, UMA ALTERNATIVA PARA TRATAMENTO DE ÁGUA

AUTOR: Nathielly Santa Helena

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Salbego

A contaminação por flúor em fontes de água potável representa um problema significativo de saúde pública, especialmente em regiões interioranas onde eventualmente os níveis de Flúor excedem os limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde. Nesse contexto, a busca por métodos eficientes e economicamente viáveis para a remoção de flúor da água é de grande importância. Uma abordagem promissora envolve uso de rejeitos de minério de ametista como material adsorvente. Esses rejeitos, abundantes no Sul do Brasil, possuem propriedades físicas e químicas que os tornam adequados para a adsorção de íons flúor. Este estudo investiga a capacidade adsorvente dos rejeitos de ametista, analisando sua eficiência em diferentes condições operacionais. A caracterização dos rejeitos inclui superfície específica e porosidade das amostras, que são fatores cruciais para entender o mecanismo de adsorção. Experimentos laboratoriais são conduzidos para otimizar parâmetros, como, tempo de contato e concentração inicial de flúor, visando maximizar a eficiência de remoção. Além disso, a pesquisa compara a performance dos rejeitos de ametista com a Permutita T® que apresentou uma eficiência razoável na remoção dos íons de Flúor, para descrever dados de adsorção. A regeneração e reutilização dos rejeitos após a adsorção também são analisadas para determinar a viabilidade de sua aplicação prática. Resultados preliminares indicam que os rejeitos de ametista possuem um potencial significativo como adsorventes para remoção de flúor, oferecendo uma solução sustentável e econômica para o tratamento de água. A implementação dessa tecnologia pode proporcionar benefícios ambientais e sociais, além de agregar valor aos resíduos de mineração.

Palavras-Chave: Fluorose; Adsorventes; Rejeito de mineração; Ametista.

ABSTRACT

FLUORIDE REMOVAL USING AMETHYST STONE WASTE, AN ALTERNATIVE FOR WATER TREATMENT

AUTHOR: Nathielly Santa Helena

ADVISOR: Prof. Dr. Paulo Salbego

Fluoride contamination in drinking water sources represents a significant public health issue, especially in rural regions where fluoride levels sometimes exceed the limits recommended by the World Health Organization. In this context, the search for efficient and economically viable methods for fluoride removal from water is of great importance. A promising approach involves the use of amethyst mining waste as an adsorbent material. This waste, abundant in southern Brazil, possesses physical and chemical properties that make it suitable for the adsorption of fluoride ions. This study investigates the adsorptive capacity of amethyst waste, analyzing its efficiency under different operational conditions. The characterization of the waste includes specific surface area and sample porosity, which are crucial factors for understanding the adsorption mechanism. Laboratory experiments are conducted to optimize parameters such as contact time and initial fluoride concentration, aiming to maximize removal efficiency. Additionally, the research compares the performance of amethyst waste with Permutit T, which has shown reasonable efficiency in fluoride ion removal, to describe adsorption data. The regeneration and reuse of the waste after adsorption are also analyzed to determine the feasibility of its practical application. Preliminary results indicate that amethyst waste has significant potential as an adsorbent for fluoride removal, offering a sustainable and economical solution for water treatment. The implementation of this technology could provide environmental and social benefits, as well as add value to mining waste.

Keywords: Fluorosis; Adsorbents; Mining waste; Amethyst.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. JUSTIFICATIVA	13
4. REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1 ÁGUA DE ABASTECIMENTO	14
4.2 ÁGUA SUBTERRÂNEA	15
4.3 FLÚOR.....	16
4.3.1 Fluorose dentária	17
4.3.2 Fluorose óssea	17
4.3.3 Problemas relacionados	18
4.4 ADSORVENTES	18
4.4.1 Rejeitos de minério de ametista.....	20
5. MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1 PREPARO DAS SOLUÇÕES DE FLUORETO E CURVA DE CALIBRAÇÃO 21	
5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ROCHAS A SEREM EMPREGADAS COMO ADSORVENTES	23
5.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO	25
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO.....	28
6.2 MATERIAL ADSORVENTE.....	30
6.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO.....	31
7. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de soluções de fluoreto preparadas para a curva de calibração e para os ensaios de adsorção.	21
Tabela 2 – Dados de pesagem das amostras.....	26
Tabela 3 – Dados obtidos para a curva de calibração de fluoreto (F^-) com Eletrodo de Íon Seletivo (ISE), em faixa de concentração de 0.02 até 10 mg L ⁻¹	28
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de adsorção	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostras de Fluoreto de Sódio diluídas.	23
Figura 2 – Peneira de Análise Granulométrica.....	24
Figura 3 – Configuração granulométrica de pesagem	25
Figura 4 – Amostras dispostas na incubadora	27
Figura 5 – Curva de calibração demonstrando a relação logarítmica entre o potencial elétrico medido e a concentração de fluoreto.	29
Figura 6 – Curva de calibração linearizada (concentração de fluoreto em escala logarítmica).	29

1. INTRODUÇÃO

A contaminação por flúor em fontes de água potável é um problema ambiental e de saúde pública que afeta diversas regiões ao redor do mundo. Embora o flúor seja essencial em pequenas quantidades para a prevenção de cáries dentárias, em concentrações elevadas podem levar a condições adversas como fluorose dentária e esquelética. A Organização Mundial da Saúde recomenda que a concentração de flúor na água potável não ultrapasse $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ (OMS, 1982), entretanto, muitas áreas interioranas, apresentam níveis que excedem esse limite. A presença de íons fluoreto na água pode ser resultado tanto de processos naturais quanto antropogênicos, por sua elevada eletronegatividade e sua reatividade são impeditivos de encontrá-lo na natureza em seu estado elementar.

Diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para a remoção de flúor da água, incluindo a troca iônica, a precipitação química, a osmose reversa e a adsorção. Dentre essas, a adsorção destaca-se por sua eficiência, custo relativamente baixo e simplicidade operacional. Tradicionalmente, materiais como alumina ativada, carvão ativado e zeólitas são utilizados como adsorventes. No entanto, a busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas tem incentivado a investigação de materiais de baixo custo e abundantes, especialmente resíduos industriais e minerais.

Neste contexto, os rejeitos de ametista surgem como uma alternativa promissora. A ametista, uma variedade de quartzo amplamente extraída em diversas partes do mundo, gera uma quantidade significativa de rejeitos durante seu processo de mineração e lapidação. Estes rejeitos, frequentemente considerados resíduos sem valor comercial, possuem características físico-químicas que podem ser aproveitadas para a adsorção de íons fluoreto.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o poder adsorptivo dos rejeitos de minério de ametista em escala laboratorial na remoção de íons de flúor da água, a fim de estabelecer parâmetros e validar estudos anteriores sobre este tema. Este estudo visa responder se é possível remover o excesso de flúor da água utilizando rejeitos de mineração de ametista a ponto de atingir os níveis desejados de potabilidade e se essas rochas podem ser potencialmente utilizadas em filtros para remoção de fluoreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a eficiência dos rejeitos de ametista com a Permutita T, uma zeólita conhecida por seu poder adsorptivo na remoção de flúor.
- Avaliar os benefícios ambientais e a viabilidade econômica do uso de rejeitos de ametista como adsorventes.
- Avaliar o poder adsorptivo dos rejeitos de minério de ametista em escala laboratorial na remoção de íons de fluoreto da água.
- Estabelecer parâmetros e validar estudos anteriores sobre este tema.

3. JUSTIFICATIVA

O foco principal desta pesquisa se desenvolve a partir da necessidade de remover os íons de fluoreto da água, que quando consumidos em excesso e por um longo período, são prejudiciais à saúde.

O presente trabalho também leva em consideração a necessidade ambiental que existe de destinar os subprodutos que já estão presentes em nosso meio, como os rejeitos de minério de ametista, associados aos benefícios para a saúde populacional de uma água segura e de boa qualidade para consumo da população.

Esta proposta visa reutilizar esses materiais, que até então não possuíam valor algum, e promover sustentabilidade e melhoria de qualidade de vida aos beneficiados por esse tipo de tratamento alternativo. Levando em consideração que os rejeitos possuem baixo custo de manuseio e preparação, em função de serem fruto de descarte, é uma alternativa muito viável para ser estudada.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 ÁGUA DE ABASTECIMENTO

Acesso a água potável segura é essencial para a saúde humana e para a promoção de comunidades saudáveis, reduzindo a incidência de doenças transmitidas pela água (UNICEF e WHO, 2019). Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável para todos é um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, destacando a importância deste recurso vital (UNITED NATIONS, 2015).

A água potável é essencial para a saúde e o bem-estar humano. A falta de disponibilidade de água de qualidade pode levar a problemas graves de saúde, além de impactar negativamente o desenvolvimento social e econômico (PORTARIA Nº 05/2017). O acesso a água potável reduz significativamente a incidência de doenças transmitidas pela água, como diarreia, cólera, disenteria, febre tifoide e poliomielite. A escassez de água potável afeta bilhões de pessoas em todo o mundo, exacerbando problemas de saúde, pobreza e desigualdade (BANCO MUNDIAL).

A contaminação da água potável por agentes patogênicos, produtos químicos e metais pesados é um problema crítico de saúde pública, especialmente em países em desenvolvimento (UNICEF). O tratamento adequado e o fornecimento seguro de água potável são fundamentais para prevenir doenças e promover a saúde pública (EPA).

A água é um recurso vital para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento socioeconômico, desempenhando um papel crucial na saúde, agricultura e indústria (GLEICK, P.H., 1993). Segundo Falkenmark e Rockström, a gestão sustentável dos recursos hídricos é fundamental para enfrentar os desafios globais de escassez de água, poluição e mudanças climáticas. As mudanças climáticas agravam a escassez de água potável ao alterar os padrões de precipitação e aumentar a frequência e a intensidade de secas e inundações (IPCC).

Os métodos de tratamento de água, como filtração, adsorção e desinfecção, são essenciais para garantir a potabilidade e a segurança da água consumida pela população (SHANNON, M.A, et al., 2008). A contaminação da água potável por produtos químicos, como o flúor, é uma preocupação significativa, exigindo monitoramento rigoroso e estratégias de mitigação eficazes (SMITH, et al., 2000).

Segundo a Portaria de Consolidação nº 888/2021, os padrões e parâmetros de potabilidade visam assegurar que a água fornecida para consumo humano seja segura, evitando riscos à saúde pública. Ele também estabelece o limite de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de fluoreto para que não apresente risco a saúde pública.

No Brasil, as estações de tratamento de água realizam a fluoretação desde a década de 1950. A fluoretação da água é uma medida de saúde pública eficaz, comprovada para a prevenção da cárie dentária em populações de todas as idades (CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, 1999).

4.2 ÁGUA SUBTERRÂNEA

A crescente demanda por água subterrânea devido ao crescimento populacional e às mudanças climáticas está aumentando a pressão sobre os aquíferos, levando à queda dos níveis freáticos e à degradação da qualidade da água (TAYLOR, et al., 2013).

A água subterrânea é uma fonte crítica de água para consumo, irrigação e usos industriais em todo o mundo, fornecendo quase metade de toda a água potável e 43% da água para irrigação (USGS).

A água subterrânea é uma fonte crucial de água doce para muitas regiões do mundo, fornecendo cerca de metade da água potável global e suportando a irrigação agrícola (FOSTER e CHILTON, 2003). De acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) do Ministério do Meio Ambiente, as águas subterrâneas são uma parte essencial do ciclo hidrológico, representando 98% das águas doces e líquidas do planeta. Elas desempenham um papel crucial na alimentação e regulação de rios, córregos e lagos, garantindo que esses corpos d'água continuem fluindo durante períodos de seca (BRASIL, 2006).

Em muitas regiões, especialmente nas áreas rurais, a principal fonte de água potável é a água subterrânea. No entanto, essas fontes estão frequentemente contaminadas com diferentes substâncias, incluindo fluoreto, o que compromete sua potabilidade. A contaminação das águas subterrâneas é um problema sério que afeta a qualidade da água potável e representa riscos para a saúde humana e o meio ambiente (BRASIL, 2006).

Em regiões rurais, a falta de infraestrutura para tratamento de água e o baixo acesso a tecnologias de purificação tornam o problema do excesso de fluoreto ainda mais crítico. Estas

comunidades muitas vezes dependem exclusivamente de poços para seu abastecimento de água, expondo-se a riscos maiores de contaminação.

Diversos estudos apontam níveis elevados de fluoreto nas águas subterrâneas do Sul do Brasil, especialmente em áreas onde a geologia favorece a presença natural de fluoretos (BRASIL, 2006). A gestão sustentável das águas subterrâneas é essencial para garantir a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos para as gerações futuras (ONU).

Fatores geológicos e ambientais que contribuem para os níveis elevados de fluoreto, a composição mineral do solo e das rochas nessa região pode liberar fluoreto na água subterrânea. Além disso, a atividade agrícola e o uso de fertilizantes fluorados podem contribuir para a contaminação (BRASIL, 2006).

É importante comparar os dados do sul do Brasil com outras regiões do mundo onde o problema do fluoreto é prevalente, como na Índia, China e Quênia. Estes países enfrentam problemas semelhantes e têm implementado diversas estratégias para mitigar os efeitos do excesso de fluoreto na água potável. Uma das estratégias que vem sendo analisadas, é com adsorventes provenientes de minerais (BRASIL, 2006).

4.3 FLÚOR

O flúor, símbolo F, é um elemento químico situado no grupo 17 da tabela periódica, pertencendo à família dos halogênios. Reconhecido por sua elevada reatividade e eletronegatividade, o flúor apresenta características únicas que o diferenciam dos demais elementos. O flúor ostenta o título de elemento mais eletronegativo da tabela periódica. Essa propriedade indica sua forte tendência a atrair elétrons para si ao formar ligações químicas. Sua reatividade torna-o um elemento perigoso em sua forma natural, pois pode causar queimaduras graves em contato com a pele ou os olhos (BRASIL, 2006).

O flúor é um mineral importante para a saúde pública, conhecido principalmente por seu papel na saúde dental. Ele ajuda na remineralização do esmalte dos dentes, revertendo o início da cárie dentária e inibindo o crescimento de bactérias causadoras de cáries. O uso regular de flúor, como através da água fluoretada e de produtos dentários, pode reduzir o risco de cáries em cerca de 25% (MELLO, 2022). Os efeitos tóxicos do flúor em humanos são mais comuns em regiões com água potável contendo altos níveis naturais de flúor, muitas vezes acima dos limites recomendados (CHOUBISA, 2001).

O flúor é encontrado naturalmente na água em diversas concentrações, variando de acordo com a geologia da área. Águas subterrâneas em regiões de rochas fluoradas tendem a apresentar níveis mais elevados de flúor (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2006).

4.3.1 Fluorose dentária

A ingestão de flúor em quantidades superiores ao limite estabelecido pela resolução, por um longo período, especialmente até os 5 anos de idade, pode causar uma lesão de hipomineralização, que se estende da subsuperfície profunda até a superfície do esmalte externo e, em casos mais graves, pode se romper após a erupção (REVELO-MEJÍA et al., 2020). O consumo excessivo de flúor durante a formação dos dentes pode resultar em fluorose dentária, uma condição que provoca manchas e fissuras no esmalte dental, afetando tanto a estética quanto a funcionalidade dos dentes (AOBA e FEJERSKOV, 2002).

Concentrações de fluoreto na água superiores a 1 mg L^{-1} podem causar fluorose dentária, enquanto concentrações a partir de $3,5 \text{ mg L}^{-1}$, quando ingeridas por longos períodos, podem levar à fluorose óssea (MAGALHÃES, 2018). Embora a fluorose leve possa não ser esteticamente preocupante, formas mais graves podem causar danos significativos à aparência dos dentes (CLARK, D.C., 1994).

A fluorose dentária é um marcador biológico da exposição crônica ao flúor durante a infância e pode indicar a necessidade de revisar as políticas de fluoretação da água (BUZALAF e LEVY, 2011).

4.3.2 Fluorose óssea

A fluorose esquelética é uma doença crônica resultante da ingestão prolongada de altos níveis de flúor, causando dor nas articulações, rigidez e, em casos graves, deformidades ósseas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2002). A fluorose esquelética pode manifestar-se em diferentes estágios, desde formas assintomáticas até formas graves com deformidades ósseas significativas e disfunção física (GUPTA e GUPTA, 2015). O diagnóstico de fluorose óssea é baseado em sintomas clínicos, histórico de exposição ao flúor e exames de imagem que mostram aumento da densidade óssea.

A fluorose óssea é uma condição debilitante causada pela exposição crônica a altos níveis de flúor, resultando na calcificação dos ligamentos, endurecimento e dor nas articulações e, em casos graves, imobilidade (KRISHNAMACHARI, 1986).

Casos de fluorose óssea têm sido identificados em vários países, e estudos indicam que estão relacionados ao consumo de águas subterrâneas com elevados níveis de flúor. As populações interioranas, em sua maioria, consomem água in natura com alto teor de flúor, o que pode levar ao desenvolvimento de fluorose óssea, que é uma doença degenerativa. A prevenção e o controle dessa condição são questão de saúde pública.

4.3.3 Problemas relacionados

Além da fluorose dental e óssea, estudos apontam que o excesso de fluoreto pode afetar o funcionamento da glândula tireoide, o sistema nervoso, e segundo Grandjean e Landrigan, ele interfere no desenvolvimento cognitivo de crianças, o que sugere necessidade de monitoramento rigoroso dos níveis de flúor. Estudos epidemiológicos indicam que a exposição prolongada ao flúor pode estar relacionada a problemas renais, especialmente em populações com predisposição genética ou condições pré-existentes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2006).

A ingestão de flúor em níveis tóxicos pode causar distúrbios gastrointestinais agudos, como náusea, dor abdominal e vômitos, além de efeitos crônicos sobre a saúde óssea e dental (WHITFORD, 1996). Além dos efeitos sobre os dentes e ossos, o excesso de flúor tem sido estudado por seus potenciais impactos sobre outros sistemas corporais, incluindo efeitos neurotóxicos e efeitos sobre a função renal (CHOI, et al., 2012).

A adsorção é destacada pela sua eficiência, custo relativamente baixo e simplicidade operacional, utilizando tradicionalmente materiais como alumina ativada, carvão ativado e zeólitas como adsorventes. No entanto, a busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas tem impulsionado a pesquisa em materiais de baixo custo e abundantes, especialmente resíduos industriais e minerais (ALMEIDA, 2018).

4.4 ADSORVENTES

Adsorventes são materiais que possuem a capacidade de reter moléculas de gases, líquidos ou solutos dispersos na superfície de seus sólidos, sendo amplamente utilizados em diversas aplicações industriais e ambientais (ALMEIDA, 2018).

Adsorventes de origem natural, como resíduos agrícolas e minerais, têm ganhado destaque como alternativas sustentáveis para a remoção de contaminantes de águas residuais (GUPTA E SUHAS, 2009).

A escolha do material adsorvente é uma etapa essencial para garantir a eficiência do processo. Para serem comercialmente viáveis, os materiais adsorventes devem possuir certas características desejáveis, como: grande área específica, que permite alta capacidade de adsorção; alta seletividade, possibilitando a adsorção de um componente específico mesmo em misturas; cinética de transferência de massa favorável; baixa ou nenhuma solubilidade, preservando as características de adsorção e do adsorvente; nenhuma tendência a realizar reações químicas indesejáveis; e baixo custo. Cada material possui diferentes capacidades de adsorção, influenciadas pela sua área superficial, estrutura porosa e composição química (SING, 1985).

O adsorvente mais conhecido atualmente é o carvão ativado comercial, que possui uma eficiência ótima, em contrapartida possui um elevado custo de mercado. Também se usa a alumina ativada, que é eficiente para fluoreto, mas pode ser influenciada pelo pH da água. E as zeólitas, que são naturais e baratas, mas menos eficientes que os materiais sintéticos (AHMAD, 2015).

A adsorção é um processo eficaz para a remoção de metais pesados e compostos orgânicos da água, com diversas vantagens, incluindo simplicidade operacional e custo relativamente baixo (BABEL E KURNIAWAN, 2003). O uso de materiais de resíduos como adsorventes não só trata a água contaminada, mas também promove a reciclagem e a reutilização de subprodutos industriais e agrícolas (CRINI E LICHTFOUSE, 2019).

Adsorventes derivados de resíduos minerais demonstraram alta eficiência na remoção de íons de metais pesados, oferecendo uma solução ambientalmente amigável e economicamente viável (MOHAMMED et al., 2014).

4.4.1 Rejeitos de minério de ametista

O uso de resíduos de mineração como materiais adsorventes tem mostrado resultados promissores na remoção de contaminantes de águas residuais, contribuindo para uma abordagem mais sustentável e econômica no tratamento de água (SILVA E OLIVEIRA, 2020). Resíduos de pedras preciosas, como ametista, possuem características que os tornam candidatos potenciais para a adsorção de íons devido à sua estrutura porosa e composição química (FERREIRA E ALMEIDA, 2021).

Estudos iniciais indicam que os resíduos de ametista possuem uma superfície ativa que pode ser eficaz na adsorção de fluoreto, tornando-os uma solução viável e sustentável, tendo em vista que hoje eles são um problema ambiental pois não ocorre uma destinação correta deste material (MOHAN e PITTMAN, 2006). Resultados preliminares sugerem que os resíduos de ametista podem competir com outros materiais tradicionais em termos de capacidade adsorptiva, ao qual se baseia este trabalho (KYZAS e MITROPOULOS, 2017).

A utilização de rejeitos de ametista para a remoção de íons fluoreto vem se mostrando uma abordagem muito promissora, principalmente devido à sua estrutura porosa e à presença de grupos funcionais na superfície desses rejeitos, o que permite uma adsorção poderosa. Estudos recentes indicam que esses materiais possuem uma alta capacidade de adsorção, rivalizando com adsorventes convencionais como a alumina ativada. A capacidade de adsorção de metais pesados e íons de flúor por rejeitos de minerais é amplamente influenciada pelas propriedades físicas e químicas dos resíduos, como a superfície específica e a porosidade (COSTA E SANTOS, 2019).

Os rejeitos de ametista foram avaliados como um material adsorvente de baixo custo para a remoção de flúor de águas subterrâneas. A análise termodinâmica indicou que a adsorção é espontânea e favorável em uma ampla faixa de temperaturas. Este material não apenas oferece uma solução eficaz para a descontaminação de água, mas também contribui para a redução de resíduos minerais. O uso de rejeitos de ametista como adsorventes oferece uma solução dupla: trata a água contaminada e proporciona um destino ambientalmente correto para os resíduos de mineração (MARTINS E RIBEIRO, 2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 PREPARO DAS SOLUÇÕES DE FLUORETO E CURVA DE CALIBRAÇÃO

Para o preparo das soluções foi utilizado Fluoreto de Sódio comercial (Marca Vetec®). Todas as soluções foram preparadas em água destilada.

Inicialmente realizou-se a preparação do Fluoreto de Sódio para uma solução estoque de 500 mg L^{-1} . A partir da solução de estoque foram preparadas sete concentrações distintas, que variam de $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ e $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, para a curva de calibração, que é uma representação gráfica e relaciona a concentração conhecida de uma substância (ou analito) com a resposta analítica gerada pelo método de análise utilizado. Em outras palavras, é um gráfico que mostra a relação entre a quantidade de um composto e a resposta medida pelo instrumento de análise (SKOOG, 2014).

E cinco soluções para os ensaios de adsorção, variando entre $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ e $9,0 \text{ mg L}^{-1}$. A lista de soluções preparadas está apresentada na Tabela 1.

Para que as amostras estivessem aptas a serem analisadas com Eletrodo de Íon Seletivo, se fez necessário a realização de uma solução TISAB, que ajusta a força iônica da mistura. Para a preparação do TISAB (Tampão de ajuste de força iônica), foi disposto 500 mL de água destilada em um béquer de 1 litro, adicionado 57 mL de ácido acético glacial e 58 g de cloreto de sódio de grau reagente ao béquer. Colocou-se o béquer em um banho-maria para resfriamento e mergulhado um eletrodo de pH calibrado na solução adicionando lentamente $\text{NaOH } 5 \text{ mol L}^{-1}$ até que o pH esteja entre 5,0 e 5,5. Resfriou-se a solução até a temperatura ambiente e foi despejada em um frasco volumétrico de 1 litro e diluído até a marca do frasco com água destilada.

Preparou-se uma solução concentrada de 20 mg L^{-1} de Flúor em um balão de 1000 ml, e a partir dela foram realizadas diluições nas seguintes concentrações: 1 mg L^{-1} , 3 mg L^{-1} , 5 mg L^{-1} , 7 mg L^{-1} e 9 mg L^{-1} .

Tabela 1 – Lista de soluções de fluoreto preparadas para a curva de calibração e para os ensaios de adsorção.

Curva de Calibração (mg L^{-1} de F^-)	Ensaio de Adsorção (mg L^{-1} de F^-)
--	---

0,02	1,0
0,1	3,0
0,5	5,0
1,0	7,0
2,0	9,0
5,0	
10,0	

Fonte: Autora, 2024.

O Flúor possui uma massa molar de $18,99 \text{ g mol}^{-1}$, enquanto o Fluoreto de Sódio possui a massa de $41,99 \text{ g mol}^{-1}$. O cálculo para preparação das soluções se deu da seguinte maneira:

$$41,99 \text{ NaF} - 18,99 \text{ F}$$

$$x - 500$$

$$18,99x = 20995$$

$$x = 1105,58 \text{ mg NaF}$$

$$x = 110,55 \text{ mg NaF (100 ml)}$$

$$x = 0,11055 \text{ g NaF (100 ml)}$$

Então, foi pesado 0,1105 g de Fluoreto de Sódio, que foi diluído em 100 ml de água destilada. O cálculo para volumetria do líquido realizou-se conforme a fórmula:

$$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$$

Com esta fórmula, obtiveram-se os volumes para as sete amostras distintas que estavam previstas, com a variação de $0,02 \text{ mg L}^{-1}$ a $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1: Cálculos para preparo das soluções

$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \text{ ppm} \cdot V1 = 20 \text{ ppm} \cdot 50 \text{ mL}$ $V1 = 2,0 \text{ mL}$	$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \cdot V1 = 15 \text{ ppm} \cdot 50 \text{ mL}$ $V1 = 1,5 \text{ mL}$	$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \cdot V1 = 10 \text{ ppm} \cdot 50 \text{ mL}$ $V1 = 1,0 \text{ mL}$
---	---	---

$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \cdot V1 = 5 \text{ ppm} \cdot 100 \text{ mL}$ $V1 = 1,0 \text{ mL}$	$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \cdot V1 = 2 \text{ ppm} \cdot 250 \text{ mL}$ $V1 = 1,0 \text{ mL}$	$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \cdot V1 = 1 \text{ ppm} \cdot 250 \text{ mL}$ $V1 = 0,5 \text{ mL}$
$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$ $500 \cdot V1 = 0,5 \text{ ppm} \cdot 250 \text{ mL}$ $V1 = 0,25 \text{ mL}$		

Fonte: Autora, 2024.

Na Figura 1, está exposta a imagem das diluições nas concentrações que foram realizadas segundo os cálculos expressados anteriormente. Nela, estão dispostos os balões volumétricos onde ocorreu a mistura do Fluoreto de Sódio com a água destilada para obter as concentrações desejadas.

Figura 1 – Amostras de Fluoreto de Sódio diluídas.



Fonte: Autora, 2024.

5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ROCHAS A SEREM EMPREGADAS COMO ADSORVENTES

Realizou-se a fragmentação do resíduo de pedras Ametistas, de maneira irregular e manual, para posterior peneiramento. O peneiramento foi realizado com a Peneira de Análise Granulométrica da marca A Bronzinox (Figura 2), que está disponível no Laboratório 314, Blocos 3 e 4 da UFSM-FW. Ela é capaz de selecionar seis tamanhos de granulometria, sendo elas: 2,00 – 1,20 mm; 1,2 – 0,60 mm; 0,60 – 0,42 mm; 0,42 – 0,25 mm; 0,25 – 0,15 mm; > 0,15 mm.

Figura 2 – Peneira de Análise Granulométrica



Fonte: Autora, 2024.

Foram selecionadas duas faixas granulométricas que variam de 2,0 – 1,2 mm e a de 0,42 – 0,25 mm. A seleção se deu através das quantidades de material obtidas nas peneiras, e a observação da área específica de contato do material adsorvente com as amostras contaminadas por fluoreto.

Após o preparo das amostras, realizou-se a separação da granulometria do material adsorvente, nesse caso o rejeito de minério de ametista. O peneiramento ocorreu de forma regular, por um tempo de 5 minutos, com isso, obtiveram-se sete (07) amostras com granulometrias diversas (demonstrado na Figura 3), já mencionadas anteriormente, sendo apenas utilizada nesta pesquisa dois tamanhos, a faixa de 0,42 – 0,25 mm e 2,0 – 1,2 mm de espessura.

Figura 3 – Configuração granulométrica de pesagem



Fonte: Autora, 2024.

5.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

Após o processo de separação da granulometria, realizou-se a pesagem e separação das amostras. Separadas em 03 grupos de amostragem, a Permutita T, a granulometria 0,42 – 0,25 mm e a granulometria 2,0 – 1,2 mm.

Pesou-se aproximadamente 1,0 g de cada amostra de material adsorvente, o que resultou em 15 amostras para análise (representadas na Tabela 2). Essas 15 amostras foram adicionadas a 100 mL das soluções descritas na Tabela 1, nas concentrações de 1 mg L⁻¹, 3 mg L⁻¹, 5 mg L⁻¹, 7 mg L⁻¹ e 9 mg L⁻¹.

Ao fim dos processos anteriores, elas foram submetidas ao agitador (Incubadora Shaker Refrigerada SL-223), a uma temperatura de 25 °C, agitação de 120 rpm, no tempo de 64 horas (ilustrado na Figura 4).

Tabela 2 – Dados de pesagem das amostras

[F] 100 mL (mg L ⁻¹)	0,42 - 0,25 mm (g)	2,0 - 1,20 mm (g)	Permutita T (g)
1,0	1,0010	1,0056	1,0024
3,0	1,0009	1,0087	1,0021
5,0	1,0013	1,0088	1,0048
7,0	1,0062	1,0011	1,0002
9,0	1,0093	1,0075	1,0033

Fonte: Autora, 2024.

Figura 4 – Amostras dispostas na incubadora



Fonte: Autora, 2024.

Após esse processo, misturou-se em frascos estéreis, 30 mL de TISAB com 30 mL de cada amostra para posterior utilização. Todas as amostras foram testadas pela Sonda de Íon Seletivo durante o tempo padronizado de 3 minutos, para que fosse possível detectar seu real poder adsortivo. Os resultados estão expressos no próximo tópico, na Tabela 1, que está convertida para melhor percepção de remoção de Flúor.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CURVA DE CALIBRAÇÃO

Os resultados de potencial elétrico medidos com Eletrodo de Íon Seletivo (Tabela 1) mostram uma relação logarítmica entre a concentração de íons fluoreto e o potencial elétrico medido com o eletrodo (Figura 5). Plotando o logaritmo da concentração versus o potencial elétrico podemos observar a relação linear (Figura 6), com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9913.

Tabela 3 – Dados obtidos para a curva de calibração de fluoreto (F^-) com Eletrodo de Íon Seletivo (ISE), em faixa de concentração de 0.02 até 10 $mg L^{-1}$.

$[F^-]$ ($mg L^{-1}$)	$\ln([F^-])$	P(mV)
0,02	-3,9120	-32,8
0,1	-2,3026	-36,0
0,5	-0,6931	-38,0
1	0,0000	-38,7
2	0,6931	-39,6
5	1,6094	-41,1
10	2,3026	-42,4

Figura 5 – Curva de calibração demonstrando a relação logarítmica entre o potencial elétrico medido e a concentração de fluoreto.

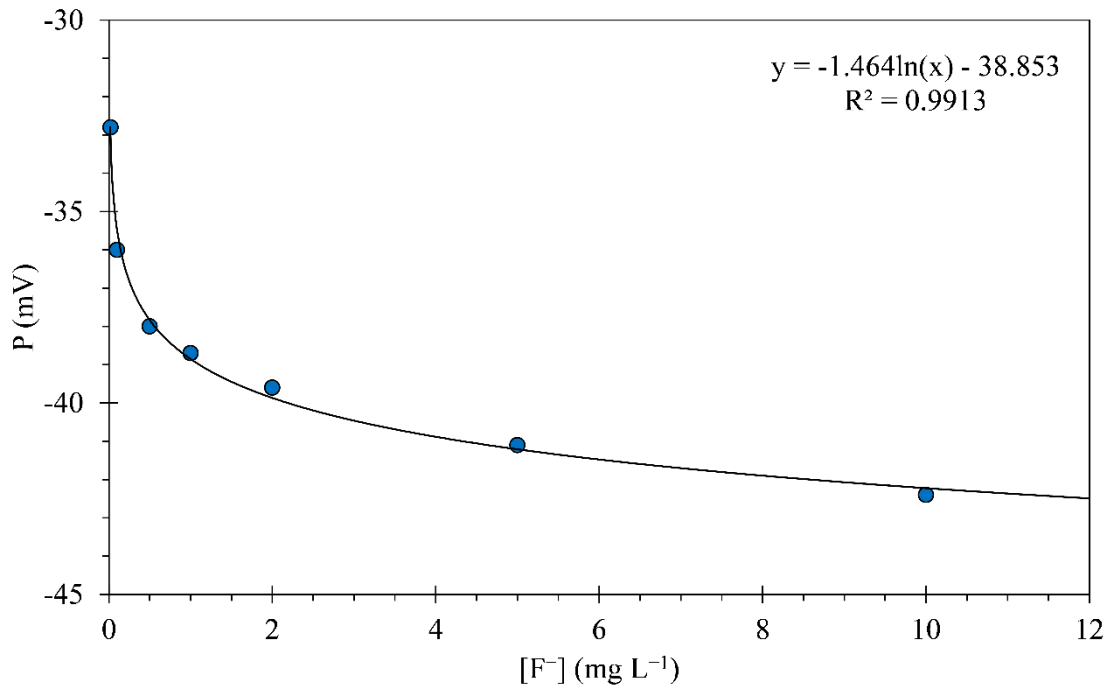
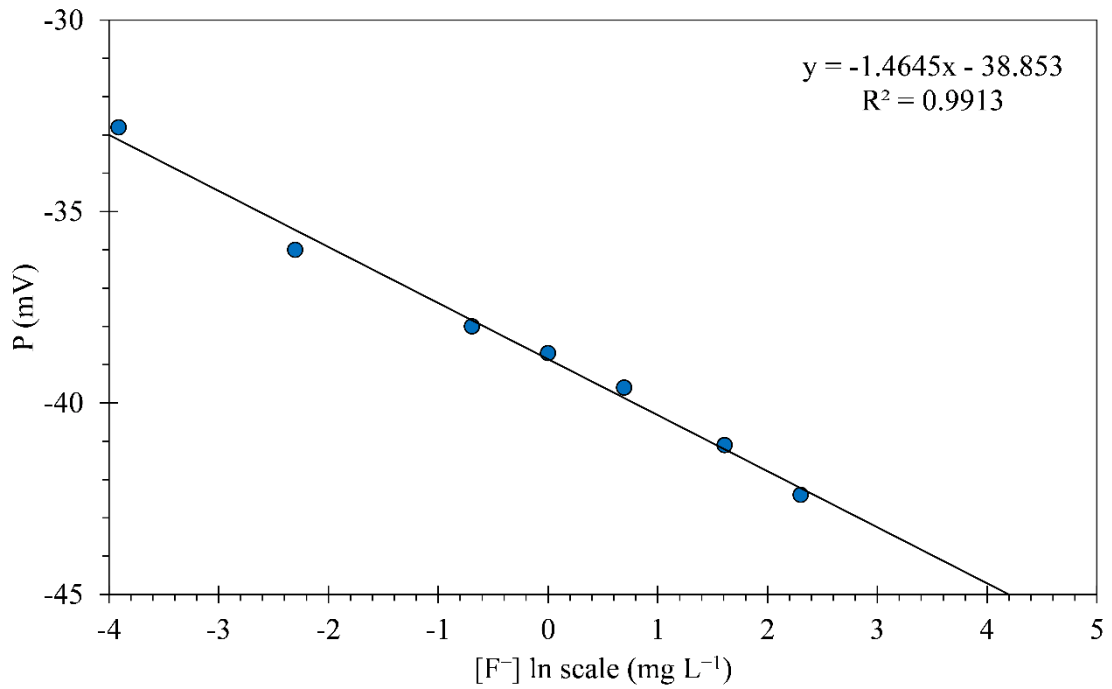


Figura 6 – Curva de calibração linearizada (concentração de fluoreto em escala logarítmica).



A partir da curva de calibração, podemos determinar a concentração de fluoreto no equilíbrio (C_{eq}), com a seguinte equação:

$$C_{eq} = e^{\frac{P+38,854}{-1,4645}}$$

Onde P é o potencial elétrico (mV) lido com o eletrodo de íon seletivo na amostra.

Assim, podemos calcular a quantidade de fluoreto adsorvida (q) em miligramas de fluoreto por grama de adsorvente:

$$q = \frac{(C_i - C_{eq}) \times V}{m}$$

Onde C_i é a concentração inicial (mg L^{-1}), C_{eq} é a concentração no equilíbrio (mg L^{-1}), V é o volume de solução (L) e m é a massa de adsorvente (g).

6.2 MATERIAL ADSORVENTE

É sabido que os rejeitos de minério de ametista são porosos e possuem um certo poder adsorativo (OLIVEIRA E ALMEIDA, 2019). Estudos experimentais indicam que os rejeitos de ametista possuem alta eficiência na adsorção de íons de flúor, com potencial para aplicação prática em sistemas de tratamento de água (LIMA E CARDOSO, 2018).

De acordo com Markoski, a ocorrência da pedra ametista está relacionada aos derrames basálticos que originaram os solos da região. No Rio Grande do Sul, a ametista aparece na forma cristalizada dentro de geodos nos basaltos da formação Serra Geral, na Bacia do Paraná. Analisando as amostras obtidas após o peneiramento, foram selecionadas duas granulometrias (0,42 – 0,25 mm e 2,0 – 1,2 mm) para avaliar o potencial para remover íons fluoreto, de acordo com diferentes áreas de contato.

Além das amostras de rochas, foram realizados testes utilizando uma zeólita comercial (Permutita® T), servindo como comparativo da eficiência do rejeito de mineração.

A Permutita T é uma zeólita com a fórmula molecular $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{SiO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$ (onde x varia de 2 a 10 e y varia de 2 a 6). É comumente utilizada para remover a dureza da água, trocando os cátions Mg^{2+} e Ca^{2+} presentes na água pelos íons Na^+ da zeólita. Como a Permutita contém cátions Al^{3+} e pode acumular cátions Ca^{2+} , ela foi testada para a adsorção de F^- , devido à afinidade desse ânion com alumínio e cálcio.

6.3 ENSAIOS DE ADSORÇÃO

A Tabela 4 mostra os potenciais medidos para cada amostra de água fluoretada, após 64 horas em contato com os adsorventes, bem como as respectivas concentrações e a quantidades adsorvidas calculadas.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de adsorção

C_i (mg L^{-1})	P (mV)	C_{eq} (mg L^{-1})	q (mg m^{-2})
Rocha com variação de 0,42 - 0,25 milímetros			
1,0	-34,6	0,05	0,095
3,0	-38,7	0,90	0,210
5,0	-40,0	2,19	0,281
7,0	-40,5	3,08	0,392
9,0	-40,9	4,05	0,495
Rocha com variação de 2,0 - 1,2 milímetros			
1,0	-36,6	0,21	0,079
3,0	-39,9	2,04	0,096
5,0	-40,5	3,08	0,192
7,0	-41,1	4,64	0,236
9,0	-41,4	5,69	0,331
Permutita T			
1,0	-34,6	0,05	0,095
3,0	-38,0	0,56	0,244
5,0	-39,8	1,91	0,309
7,0	-40,4	2,88	0,412
9,0	-40,8	3,78	0,522

Com o rejeito de minério de granulometria de 0,42 a 0,25 milímetros os resultados obtidos foram:

- A concentração inicial de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final de fluoreto foi de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$, resultando em uma remoção de 95%;
- $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $0,90 \text{ mg L}^{-1}$, indicando uma remoção de 70%;
- $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $2,19 \text{ mg L}^{-1}$, resultando em uma remoção de 56%;
- $7,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $3,08 \text{ mg L}^{-1}$, com uma remoção de 56%;
- $9,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $4,05 \text{ mg L}^{-1}$, indicando uma remoção de 55%.

Com o rejeito de minério de granulometria de 2,0 a 1,2 milímetros os resultados obtidos foram:

- Para uma concentração inicial de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final de fluoreto foi de $0,21 \text{ mg L}^{-1}$, resultando em uma remoção de 79%;
- Para $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $2,04 \text{ mg L}^{-1}$, indicando uma remoção de 32%;
- Para $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $3,08 \text{ mg L}^{-1}$, resultando em uma remoção de 38%;
- Para $7,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $4,64 \text{ mg L}^{-1}$, com uma remoção de 34%;
- Para $9,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $5,69 \text{ mg L}^{-1}$, indicando uma remoção de 37%.

Comparação com Permutita T Comercial:

- Para uma concentração inicial de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final de fluoreto foi de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$, resultando em uma remoção de 95%;
- Para $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $0,56 \text{ mg L}^{-1}$, indicando uma remoção de 81%;
- Para $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $1,91 \text{ mg L}^{-1}$, resultando em uma remoção de 62%;
- Para $7,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $2,88 \text{ mg L}^{-1}$, com uma remoção de 59%;
- Para $9,0 \text{ mg L}^{-1}$, a concentração final foi de $3,78 \text{ mg L}^{-1}$, indicando uma remoção de 58%.

Realizando uma comparação de adsorção, observou-se que:

- A granulometria fina (0,25 a 0,42 mm) apresentou uma eficiência de remoção superior à granulometria grossa (1,2 a 2,0 mm) em todas as concentrações testadas. Isso pode ser atribuído à maior área superficial específica, que proporciona mais sítios de adsorção.
- A Permutita T comercial mostrou-se mais eficiente que ambas as granulometrias de rochas para concentrações iniciais mais baixas (1,0 e 3,0 mg L⁻¹). Para concentrações iniciais mais altas, a eficiência do Permutita T foi comparável ou superior à granulometria fina, mas sempre superior à granulometria grossa.
- A eficiência de remoção de fluoreto tende a diminuir com o aumento da concentração inicial de fluoreto para todos os adsorventes testados.

Considerações gerais:

- A granulometria fina é mais eficiente na remoção de fluoreto comparado à granulometria grossa, especialmente em concentrações iniciais mais baixas. Ela pode ser considerada uma alternativa viável ao Permutita T comercial, principalmente devido à potencial redução de custos e reutilização de resíduos.
- A granulometria grossa é menos eficiente que a granulometria fina e a Permutita T comercial. E pode requerer maior quantidade de material ou tempo de contato para alcançar eficiências comparáveis.
- Já a Permutita T se mostrou altamente eficiente, especialmente em concentrações iniciais mais baixas de fluoreto. Serve como um bom parâmetro para avaliar a eficácia dos materiais alternativos testados. Pois, analisando seu alto valor de mercado, ela é inviável de ser usada no tratamento em escala real.

7. CONCLUSÃO

O presente estudo analisou a remoção de íons de flúor da água potável, utilizando rejeitos de pedra ametista como adsorvente. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia desses rejeitos na adsorção de íons fluoreto, demonstrando seu potencial como solução viável e econômica para o tratamento de águas contaminadas. A caracterização físico-química dos rejeitos de ametista revelou propriedades que favorecem a adsorção, como uma superfície porosa e a presença de grupos funcionais ativos.

Os testes de adsorção mostraram que a capacidade máxima de remoção de flúor pelos rejeitos de ametista foi significativamente alta, especificamente na granulometria de 0,42 a 0,25. Portanto, este estudo conclui que os rejeitos de ametista representam uma alternativa promissora para a remoção de flúor da água, contribuindo para a solução do problema ambiental, que é a destinação dos rejeitos, promovendo a valorização de resíduos minerais que seriam um problema ambiental.

Essa pesquisa possui uma relevância muito grande, pois transforma um rejeito, que não possui valor comercial algum, em um adsorvente de boa qualidade para tratamento de água contaminada por flúor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TINÔCO, J.D. Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica. Universidade de São Paulo - 2011 Acesso em: Janeiro de 2023. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04052012-093819/publico/JulianaTinoco.pdf>

REVELO-MEJÍA, Inés A. *et al.* Dental Fluorosis: the risk of misdiagnosis::a review. *Biological Trace Element Research*, [S.L.], v. 199, n. 5, p. 1762-1770, 23 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-020-02296-4>.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017. Anexo XX. Do Controle e da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade. *Diário Oficial da União*, 03 de outubro de 2017. Acesso em: junho de 2024.

BRASIL. Portaria GS/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Acesso em: junho de 2024. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional de Águas Subterrâneas - Plano Nacional de Recursos Hídricos 1997. Acesso em: junho de 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm

MAGALHÃES, H.I.C.. Efeitos do Flúor na saúde humana. Universidade Fernando Pessoa, Faculdade de Ciências da Saúde. Porto, 2018. Acesso em: junho de 2024. Disponível em: https://bdigital.ufp.pt/bitstream/10284/7327/1/PPG_29341.pdf

AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Usos da água. Disponível em: Usos da água — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Acesso: junho de 2024.

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. Vol. 58 (2024): Uma nova década para mudanças sociais. Publicado em: 09 de junho de 2024.

SILVA, J.A., & OLIVEIRA, M.F. (2020). Utilização de resíduos de mineração como adsorventes no tratamento de águas. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, 15(3), 245-258.

- COSTA, L.M., & SANTOS, R.P. (2019). Caracterização e aplicação de resíduos minerais como adsorventes ambientais. *Journal of Environmental Science and Technology*, 10(4), 367-380.
- FERREIRA, T.R., & ALMEIDA, V.H. (2021). Aplicação de rejeitos de pedras preciosas na adsorção de íons contaminantes. *Revista de Tecnologia e Inovação Sustentável*, 7(2), 102-115.
- MARTINS, G.F., & RIBEIRO, A.C. (2018). Soluções sustentáveis para o gerenciamento de resíduos de mineração. *Boletim de Ciências Ambientais*, 12(1), 89-105.
- GUPTA, V.K., & SUHAS. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342.
- BABEL, S., & KURNIAWAN, T.A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1-3), 219-243.
- CRINI, G., & LICHTFOUSE, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 145-155.
- MOHAMMED, M.A., SHITU, A., & IBRAHIM, A. (2014). Removal of dyes using agricultural waste as low-cost adsorbents: a review. *Journal of Environmental Management*, 132, 170-183.
- GLEICK, P.H. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. Oxford University Press.
- SHANNON, M.A., BOHN, P.W., ELIMELECH, M., GEORGIADIS, J.G., MARINAS, B.J., & MAYES, A.M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310.
- FALKENMARK, M., & ROCKSTRÖM, J. (2004). *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*. Earthscan.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2002). *Fluorides*. Environmental Health Criteria 227. Geneva: World Health Organization.
- CHOUBISA, S.L. (2001). Endemic fluorosis in southern Rajasthan, India. *Fluoride*, 34(1), 61-70.

- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). (2006). *Fluoride in Drinking Water: A Scientific Review of EPA's Standards*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- AOBA, T., & FEJERSKOV, O. (2002). Fluoride distribution in the developing enamel. *Journal of Public Health Dentistry*, 62(4), 288-292.
- WHITFORD, G.M. (1996). *The metabolism and toxicity of fluoride*. Monographs in Oral Science, 16, 1-153.
- GRANDJEAN, P., & LANDRIGAN, P.J. (2014). Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *The Lancet Neurology*, 13(3), 330-338.
- NICEF & WHO. (2019). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: Special focus on inequalities*. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization.
- UNITED NATIONS. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations.
- CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. (1999). Achievements in public health, 1900-1999: Fluoridation of drinking water to prevent dental caries. *MMWR*, 48(41), 933-940.
- TAYLOR, R.G., et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322-329.
- FOSTER, S., & CHILTON, J. (2003). Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1440), 1957-1972.
- CLARK, D.C. (1994). Trends in prevalence of dental fluorosis in North America. *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, 22(3), 148-152.
- BUZALAF, M.A.R., & LEVY, S.M. (2011). Fluoride intake of children: considerations for dental caries and dental fluorosis. In: Limeback, H. (Ed.), *Comprehensive Preventive Dentistry*. Ames: Wiley-Blackwell, pp. 423-438.

GUPTA, R., & GUPTA, S.K. (2015). Chronic fluoride toxicity: A review of current perspectives and future challenges. *Journal of Advanced Medical and Dental Sciences Research*, 3(5), 1-10.

KRISHNAMACHARI, K.A.V.R. (1986). Skeletal fluorosis in humans: A review of recent progress in the understanding of the disease. *Progress in Food & Nutrition Science*, 10(3-4), 279-314.

Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). A água subterrânea. Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/groundwater>. Acesso em: junho de 2024.

Organização Mundial da Saúde (OMS). Fluoride in Drinking-water. Disponível em: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/fluoride.pdf. Acesso em: junho de 2024.

Nações Unidas (ONU) Água. Groundwater Sustainability: Key to Water Security. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/groundwater-sustainability-key-water-security>. Acesso em: junho de 2024.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2>. Acesso em: junho de 2024.

FUNDO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA (UNICEF). Água, saneamento e higiene. Disponível em: <https://www.unicef.org/wash>. Acesso em: junho de 2024.

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS (EPA). Drinking Water Requirements for States and Public Water Systems. Disponível em: <https://www.epa.gov/dwreginfo>. Acesso em: junho de 2024.

BANCO MUNDIAL. Water Scarcity. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/waterscarcity>. Acesso em: junho de 2024.

OLIVEIRA, R. T.; ALMEIDA, J. S. Caracterização de rejeitos de ametista e sua aplicação na adsorção de contaminantes. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 25, n. 2, p. 123-134, 2019.

LIMA, A. P.; CARDOSO, D. R. Avaliação da eficiência dos rejeitos de ametista na adsorção de íons de flúor em água. *Revista de Tratamento de Água*, v. 33, n. 4, p. 78-89, 2018.

WASTOWSKI, A. D., et al., Caracterização química do resíduo sólido gerado na extração de pedra ametista por espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva. 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente Bento Gonçalves – RS, Brasil, 25 a 27 de Abril de 2012.

SANTOS, E. P., et al., Composição química e potencialidade do uso de resíduo de extração de pedra ametista como fertilizante agrícola. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria*, v. 20, n. 1, jan.-abr. 2016, p. 515–523 *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM*.

MARKOSKI, P. R. Avaliação de imagens do sensor ASTER para caracterização e mapeamento de rejeitos de garimpos de ametistas. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento/UFRGS; 2006. 70 p.

SMITH JS, ET AL. (2000). Uma atividade de desacetilase de proteína dependente de NAD⁺ filogeneticamente conservada na família de proteínas Sir2. *Proc Natl Acad Sci USA* 97(12):6658-63

MELLO, B. A importância do flúor na saúde dental. *Revista Brasileira de Odontologia*, v. 10, n. 3, p. 45-50, 2022.

ALMEIDA, C.A.P. et al. (2018). *Adsorção: Fundamentos e Aplicações*. Editora Blucher.

SING, K.S.W. et al. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603-619.

AHMAD, A.L. et al. (2015). *Advances in Water Treatment and Pollution Prevention*. Springer.

MOHAN, D., & PITTMAN JR., C.U. (2006). Activated Carbons and Low Cost Adsorbents for Remediation of Tri- and Hexavalent Chromium from Water. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 762-811.

KYZAS, G.Z., & MITROPOULOS, A.C. (2017). *Waste Materials in Construction*. Springer.

SKOOG, D.A., West, D.M., Holler, F.J., & Crouch, S.R. (2014). *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Cengage Learning.