

FILTRO MINERAL DE BAIXO CUSTO, PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA, FEITO A PARTIR DO REAPROVEITAMENTO ECOLÓGICO DOS REJEITOS DO GRANITO OCRE DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – PROJETO TAMM

Lucas Cavalcante Silva

Francisco Renato Moreira da Silva (Orientador)

Escola Estadual de Educação Profissional Antônio Rodrigues de Oliveira, Pedra Branca - CE

Resumo - A indústria de rochas ornamentais é responsável pela produção de granitos e mármore, mas nem todo material extraído é utilizado, pois os rejeitos são descartados na natureza por não possuírem valor agregado. Paralelamente ao descarte irregular da indústria, no nordeste do Brasil enfrentamos outra problemática, a da água. A água é essencial para a vida, mas sua potabilidade está em crise global. De acordo com a Organização das Nações Unidas - ONU (2023), um quarto da população global não possui acesso a esse bem fundamental. Diante dessas problemáticas, a pesquisa surge com objetivo de desenvolver um tratamento ecológico por meio de um protótipo de baixo custo, produzido a partir do reaproveitamento dos rejeitos de rochas ornamentais, visando a melhoria do acesso à água potável. Durante a metodologia realizou-se um levantamento sobre as principais amostras descartadas na região onde realizou-se a trituração e as análises necessárias, onde o granito Ocre Itabira obteve os melhores resultados. Com a finalidade de melhorar as taxas de retenção pelo adsorvente, aumentou a superfície de contato por meio de um ataque ácido e validou-se a eficiência por meio do teste de adsorção. Após esse processo, iniciou-se a montagem do filtro, utilizando uma garrafa PET, constituída por camadas, a primeira por um polímero siliconado, a segunda pelo ocre e as posteriores de diferentes tipos de areia e pedra. A partir disso foi realizado o tratamento da água e averiguado sua eficiência através de análises físico-químicas e microbiológicas da água bruta e tratada. Concluiu-se com a elaboração e aplicação do projeto, que ele é uma alternativa viável para a reutilização da água contaminada após o tratamento, sendo capaz de remover as impurezas da água, deixando-a apta para ser consumida. E, para divulgação do projeto, foram realizadas mini oficinas, palestras e outras ações na comunidade e com escola, tendo como objetivo a interação e divulgação da tecnologia desenvolvida.

Palavras-chave: Tratamento; água; rochas ornamentais; adsorção e baixo custo.

1. INTRODUÇÃO

A água representa um recurso fundamental para a subsistência e manutenção da vida dos organismos vivos. Contudo, devido à sua natureza finita, uma gestão inadequada desse recurso afeta diretamente tanto a sua quantidade quanto a sua qualidade, acarretando riscos para as futuras gerações em relação ao acesso à água (Silva e Bezerra, 2022). A crescente ameaça de escassez tem incentivado a implementação de medidas voltadas para uma abordagem sustentável na gestão hídrica, visando à sua preservação, assim como é defendido por Coelho (2022).

A nível mundial, este bem é destacado como meio crucial para o desenvolvimento, principalmente das atividades humanas. A água é fundamental em diversos setores, como a indústria, agricultura, energia, e outras áreas, como meio ambiente, educação e saúde (Jung, 2023). Sua importância transcende os setores sociais e permeia aspectos vitais da sociedade e do ambiente natural. Portanto, a gestão adequada desse recurso torna-se essencial para garantir a sustentabilidade das atividades humanas e a preservação dos ecossistemas (COELHO, 2022).

Conforme citado por Oliveira et al. (2020), a superpopulação, aliada à destruição descontrolada do meio

ambiente, tem sido um dos principais impulsionadores do aumento da desigualdade em diversos aspectos em todo o mundo. Essa desigualdade expõe a sociedade a uma série de fatores prejudiciais, tanto de ordem econômica quanto relacionados à saúde, incluindo a propagação de doenças como cólera, hepatite A, amebíase, leptospirose, entre outras doenças (FERREIRA, 2023). O aumento populacional, combinado com o uso inadequado de recursos essenciais ao desenvolvimento, resulta em uma distribuição e um acesso precários a esses recursos, devido à alta demanda gerada (OLIVEIRA et al., 2020).

A escassez de água é um dos resultados dessa má gestão dos recursos hídricos presentes em nosso planeta. A escassez traz consigo diversas consequências negativas que não afetam somente ao ser humano, como nos processos industriais, ciclos biogeoquímicos naturais do meio ambiente, nas mudanças climáticas, extinção da fauna e da flora, nos setores primário, secundário e terciário, no bem-estar dos seres vivos e na qualidade de vida de toda sociedade. Para Qiu (2023), isso acaba acarretando impactos globais que estão se tornando quase irreversíveis, a quais ao decorrer do tempo, só tendem a aumentar e apresentar uma maior dificuldade para a tomada de decisões a longo prazo.

O Brasil é reconhecido pela abundância de recursos hídricos em seu território, principalmente devido à presença da maior bacia hidrográfica do mundo, a Amazônica, e de dois grandes aquíferos, Alter do Chão e Guarani, além de outros vinte e cinco (DE AMORIM TEIXEIRA, 2023). No entanto, apesar dessa riqueza hídrica, a distribuição desse recurso não é uniforme, o que dificulta o acesso à água potável para uma parcela significativa da população. Por exemplo, a região Norte do país, que abrange cerca de 73% do território nacional e, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), possui a menor densidade populacional, enfrenta desafios que afetam todas as regiões brasileiras, agravando os processos que dificultam o acesso à água de qualidade (MAGNO, 2023).

De maneira oposta à região Norte, o Nordeste brasileiro enfrenta de forma mais intensa e prolongada a escassez de água, especialmente no semiárido, que abrange uma área de 974.752 km². Este compreende os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, uma parte significativa da Paraíba e Pernambuco, oeste de Alagoas, noroeste de Sergipe, sudeste do Piauí, além da região central da Bahia e o norte de Minas Gerais e Espírito Santo (IBGE, 2023).

O semiárido brasileiro é caracterizado por suas condições climáticas, sendo marcado principalmente pelos longos períodos de seca e estiagem. A autora Dos Santos (2023) afirma que devido ao quadro climático, as regiões interioranas enfrentam situações com maior dificuldade ao acesso à água potável.

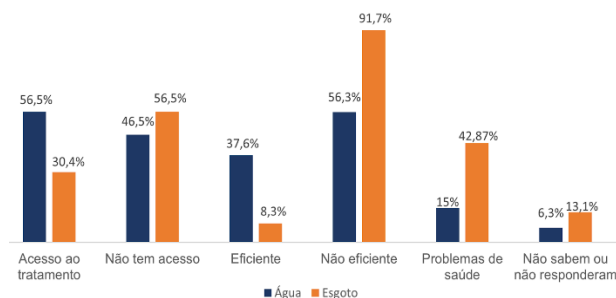
Devido à recorrente escassez de água no Nordeste, tanto a população local quanto o governo tiveram que adotar medidas para reduzir os impactos da seca. Um exemplo disso é a implementação da Lei Federal conhecida como Operação Carro-Pipa, decretada pela Lei Nº 4.442 de 2016, um programa emergencial que distribui água a comunidades afetadas pela seca no Nordeste (Brasil, 2016). Esta iniciativa, apesar de representar um alto custo para o Estado, visa abastecer as localidades afetadas, embora com grandes intervalos, geralmente a cada três dias. No entanto, na maioria das vezes, essa prática não oferece água adequada para o consumo, uma vez que é retirada de mananciais contaminados e poluídos (Pinto, 2024).

No Ceará, nota-se uma intensificação das condições precárias de acesso à água potável, uma vez que o estado é caracterizado como o território mais seco do Nordeste, conforme afirmado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2018). Os solos secos influenciam na captação de água dos mananciais, os quais são absorvidos e armazenados em estruturas geográficas no subsolo, podendo ser posteriormente extraídos por meio de diferentes tipos de poços. No entanto, essa prática requer um investimento elevado e a água obtida é imprópria para consumo devido às elevadas concentrações de magnésio e

cálcio, o que chamamos como água dura (SIQUEIRA et al., 2021).

Paralelamente à escassez de chuvas regulares, a população enfrenta a triste realidade de consumir água que não passa por tratamento adequado, conforme apresentado por Silva e Silva (2022), onde destaca que cerca de 57% têm acesso a algum tipo de tratamento de água. No entanto, em contrapartida, 56% dos entrevistados indicaram que não consideram esse tratamento eficiente, o que evidencia serviços ineficientes na região.

Gráfico 01: Pesquisa percentual sobre o acesso ao tratamento de água no Sertão Central do estado do Ceará.



Fonte: Silva e Silva (2022)

Em decorrência da atual crise hídrica, a reutilização da água, por meio do tratamento, é de grande importância, considerando a pouca água disponível. O tratamento de água torna-se essencial para remover as impurezas e contaminantes, garantindo que esteja em conformidade com os padrões de potabilidade da água estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

No município de Pedra Branca, localizado no sertão central do estado do Ceará, evidencia-se uma situação hídrica preocupante. Apesar da região contar com diversos mananciais, a maioria está significativamente poluída e contaminada, tornando-a inadequada para consumo humano. O único reservatório que possui condições salubres de abastecer a cidade, conhecido como Trapiá, está operando com apenas cerca de 10% de sua capacidade total e é o único adequado para uso humano. Como resultado, a quantidade mínima de água disponível na cidade é insuficiente para atender às necessidades de toda a população, e sua qualidade é bastante baixa, acarretando prejuízos tanto financeiros quanto para a saúde dos habitantes.

Paralelamente aos problemas ambientais, climáticos e logísticos relacionados à água na cidade de Pedra Branca/CE, há também uma preocupação significativa com o alto índice de rejeitos provenientes das indústrias de rochas ornamentais. Devido ao fato de a cidade ser um polo de processamento desse tipo de matéria-prima, ocorre a geração de resíduos, como rebarbas, que não possuem valor agregado ou aplicação na indústria da construção civil local. Isso resulta no acúmulo de rejeitos em pilhas expostas aos agentes exógenos, como calor, ventos e a chuva, os quais se degradam ao longo do

tempo e alteram os princípios biogeoquímicos do solo, consequentemente desequilibrando todo o ecossistema local.

De acordo com De Queiroz Neto, em seu trabalho intitulado "*Geomorfologia e Pedologia*", publicado em 2000, as rochas ornamentais podem ser definidas como um conjunto de rochas naturais que adquirem características específicas em seus retículos cristalinos, de acordo com o ambiente em que se formam. Elas se dividem em grupos, tais como mármore, granito, quartzito, entre outros. Cada grupo apresenta características únicas em termos de cor, padrão, textura e durabilidade, tornando-as adequadas para diferentes aplicações e preferências estéticas.

As rochas ornamentais ocupam um espaço significativo no mercado, apresentando uma grande produção e valorização da matéria. De acordo com a autora Campos de Oliveira et al. (2024), somente no primeiro semestre de 2024, foram movimentados R\$549 milhões, o que equivale a 915,3 mil toneladas de rochas. Entre os estados brasileiros, o estado do Ceará, juntamente com Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia e Rio Grande do Norte, são responsáveis por cerca de 97,9% de todas as exportações do país.

Em decorrência da grande produção, há uma significativa geração de rejeitos provenientes da indústria de rochas ornamentais. Esses rejeitos possuem formas de reutilização, como na produção de tijolos ou blocos. No entanto, devido aos elevados custos associados à logística de transporte para os centros de processamento, que ainda são escassos no Brasil, as opções de reaproveitamento e reutilização pela indústria civil ou pela indústria de rochas ornamentais acabam não sendo atrativas (DOS SANTOS, et al. 2024).

Em decorrência das limitações e da falta de atratividade econômica relacionada à gestão dos resíduos das rochas ornamentais, tem-se observado o descarte inadequado no meio ambiente, especialmente nos centros de produção, geralmente localizadas em regiões distantes, como o que ocorre no lócus desta pesquisa, a cidade de Pedra Branca. Esse cenário acarreta diversos malefícios, tais como alterações nos parâmetros de acidez do solo resultando em desequilíbrio ambiental na fauna e flora local, além da infertilidade do solo (DOS SANTOS, et al. 2024).

Paralelamente a essas duas problemáticas, o projeto de pesquisa teve como objetivo verificar a viabilidade de utilizar os rejeitos de granito ou mármore descartados na cidade de Pedra Branca, o foco deste estudo, para a produção de um filtro mineral de baixo custo destinado ao tratamento da escassa água disponível na localidade. É importante ressaltar que a população, infelizmente, é predominantemente de baixa renda e depende em grande parte da agricultura, conforme dados do IBGE (2022), sendo o foco do projeto a criação de um produto barato e acessível.

Para isso, foram utilizados como referência estudos já existentes na literatura sobre o processo de adsorção com estruturas minerais, tais como os quartzos (HUL, 2024 e

ZHENG, 2024), zeólitas (BUZUKASHVILI, 2024 e ZHANG, 2024) e argilas organofílicas (ALOMARI, 2024; OUADDARI, 2024; MELO, 2023 e SILVA, 2019). Estando os dois primeiros minerais de formação presentes algumas estruturas pedológicas de rochas ornamentais.

O processo de adsorção dos grupos acima são semelhante ao processo que ocorre nos carvões ativados, sendo que no primeiro - quartzos, zeólitas e argilas - é de natureza inorgânica/mineral, enquanto o segundo - carvão ativado - é oriundo de fonte de carbono.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Desenvolver um tratamento de água ecológico por meio de um protótipo de baixo custo, produzido a partir do reaproveitamento dos rejeitos de rochas ornamentais.

2.2. Objetivos específicos:

- Desenvolver um protótipo de baixo custo que seja eficiente no tratamento da água.
- Reutilizar matéria prima descartada de forma incorreta pela indústria de rochas ornamentais de Pedra Branca/CE, como matriz base do processo de tratamento.
- Realizar as principais caracterizações deste material, a fim de validar sua aplicação.
- Promover testes laboratoriais para averiguar a potabilidade da água submetida ao tratamento, usando referências do padrão de tratamento de água e órgãos vigilantes vigentes.
- Contribuir com a diminuição de casos e patologias relacionadas ao consumo de água não tratada.
- Integrar os alunos da escola e comunidade ao projeto, realizando palestras e mini oficinas no decorrer de cada ano letivo.

3. METODOLOGIA

3.1. Coleta de dados para a escolha da matriz mineral

A metodologia adotada para a escolha da matriz mineral neste estudo deu-se através da coleta de dados e a análise de amostras mais utilizadas no setor de rochas ornamentais presentes na, a cidade de Pedra Branca/CE. A seleção da matriz mineral foi baseada na coleta e análise de amostras das rochas ornamentais mais utilizadas em Pedra Branca/CE. Para isso, foram obtidos dados junto à Secretaria Municipal de Finanças sobre empresas ativas no setor e seus endereços. Identificaram-se três empresas na região, viabilizando o contato e a realização de visitas para a pesquisa de campo.

Durante as visitas, foram analisadas as práticas de descarte e constatada a ausência de reutilização dos rejeitos. Dessa forma, todas as rebarbas geradas pelas indústrias eram descartadas no meio ambiente (Imagem 01), pois não possuíam valor agregado ou uma finalidade para reaproveitamento. É importante destacar que essas práticas trazem diversos impactos negativos, afetando todo o bioma

local. Além disso, foram identificados os principais minerais trabalhados, destacando-se os granitos Itaúnas, São Gabriel, Verde Pérola, Ocre Itabira e o mármore Bege Bahia.

Imagem 01: Descarte dos granitos/mármore em um semestre.



Fonte: Autor (2024)

Durante as visitas de campo, as amostras de rejeitos foram coletadas seguindo protocolos rigorosos de identificação, armazenamento e transporte, assegurando a integridade do material. Posteriormente, foram submetidas a análises físico-químicas e mecânicas em triplicata, incluindo testes de dureza, adsorção, determinação de pH e teor de complexação por titulometria.

Além disso, realizou-se um levantamento bibliográfico para caracterização pedológica e mineralógica das amostras, possibilitando a definição da matriz mineral do filtro. A análise revelou que os granitos Ocre Itabira, Itaúnas e Verde Pérola apresentam quartzo, zeólitas, feldspato e mica, diferenciando-se pela proporção desses minerais e pelas aplicações. O Ocre Itabira é utilizado em ambientes úmidos, bancadas e tampos de mesa, enquanto o Itaúnas, embora também empregado em locais úmidos, é mais voltado para decoração. Já o Verde Pérola é aplicado como revestimento em ambientes internos e externos (MASS, 2008).

O granito São Gabriel, composto por biotita, quartzo e feldspato, destaca-se por sua elevada resistência a impactos, sendo amplamente utilizado em bancadas e fachadas. Por fim, o mármore Bege Bahia, predominantemente constituído por calcita, é empregado em revestimentos e pisos, apresentando características comparáveis às dos granitos (MAAS, 2008).

3.2. Testes físicos e mecânicos

Este estudo realizou dois testes físico-mecânicos principais: dureza e resistência mecânica. Esses ensaios foram selecionados por fornecerem parâmetros essenciais sobre a resistência dos materiais, alinhando-se aos objetivos da pesquisa. Considerando a replicabilidade do produto final pela comunidade local para mitigar impactos ambientais, foi fundamental identificar o material com melhor desempenho no processamento, tanto em ambiente laboratorial quanto em aplicações práticas, garantindo sua viabilidade e eficácia.

3.2.1. Teste de dureza

O teste de dureza avalia a resistência de um material a riscos, abrasão e deformação permanente, sendo mensurado pela escala de Mohs (SCHÖN, 2013; ULBRICH, 2023). As amostras foram analisadas no Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), seguindo as normativas da ABNT NBR 13.980/2001 que aborda aspectos de dureza de rochas naturais. Os ensaios foram realizados conforme metodologia de Moreno Ramón e Ibañes Asensio (2018) com ensaios em triplicata.

3.2.2. Teste de resistência mecânica

O teste de resistência mecânica avalia a capacidade de um material suportar cargas externas sem deformação ou ruptura, sendo medido por ensaios de tração, compressão ou flexão (SCHÖN, 2013). Neste estudo, utilizou-se o teste de compressão para determinar a resistência das amostras, servindo como critério para a escolha do material mais adequado ao processamento.

As amostras foram analisadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE) *campus* Quixadá, em ensaios triplicados, conforme a metodologia de Miranda et al. (2021) e as normativas. O teste foi conduzido sobre normativas previstas na ABNT NBR 13.818/2017, que especifica os procedimentos para a realização de ensaios de resistência à compressão em pedras ornamentais, em máquina de ensaio de tração digital, e os resultados, expressos em MPa, foram tabulados para posterior análise.

3.3. Processamento das amostras

O processo de trituração dos rejeitos coletados das indústrias de rochas ornamentais foi essencial para reduzir o tamanho das partículas e facilitar as análises subsequentes. Este procedimento mecânico, relacionado à dureza e à resistência mecânica (SCHÖN, 2013), foi realizado utilizando granitos Ocre Itabira, Itaúnas, São Gabriel, Verde Pérola e mármore Bege Bahia. O processamento laboratorial é realizado com equipamentos hidráulicos e mecânicos, como moinhos, que, embora eficientes, são de alto custo.

Alternativamente, adotaram-se métodos mecânicos manuais, como o uso de almofariz e pistilo, e técnicas braçais, como martelos e marretas, comuns em ambientes com recursos limitados. A combinação dessas metodologias baratas com técnicas laboratoriais foi eficaz para reduzir o tamanho das partículas, embora tenha gerado uma certa irregularidade no tamanho das amostras, demandando a separação granulométrica posterior. O processamento adequado dos materiais não apenas facilita o manuseio, mas também prepara as amostras para análises futuras, como os testes de adsorção.

3.4. Análise granulométrica

Considerando as variações cinéticas de adsorção em função dos tamanhos das partículas (WANG e GUO, 2020), é necessário delimitar o tamanho das amostras para determinar qual faixa granulométrica dos granitos processados apresenta

melhor desempenho na adsorção do efluente, levando em conta, claro, o cruzamento de dados entre as análises de composição pedológica, que é determinante para essa ação química.

A determinação do tamanho das partículas foi realizada por meio de teste granulométrico, que consiste em passar as amostras por uma série de peneiras com aberturas de tamanhos específicos, pesando o material retido em cada fase e registrando a massa (FIGUEIREDO, 2021).

As amostras de granitos e mármore processados foram enviadas para o IFCE *campus* Quixadá, onde o teste foi conduzido segundo a metodologia e normativas da ABNT NBR 7.181/2016. O teste foi realizado com três intervalos de tamanho: pequeno (1 a 50 mm), médio (51 a 100 mm) e grande (101 a 150 mm). Após a separação, as amostras foram armazenadas e encaminhadas para as etapas subsequentes de análise.

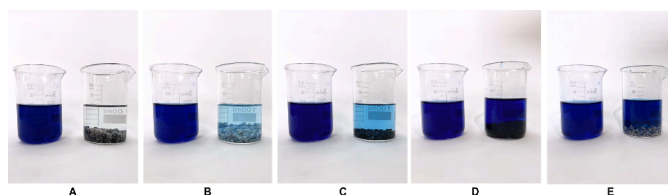
Tendo em vista as características cinéticas que variam de acordo com os diferentes tamanhos das partículas durante os processos de adsorção (WANG e GUO, 2020), torna-se necessário delimitar o tamanho das amostras. Isso visa verificar, dentro das opções de granitos e mármore, após o processamento, qual faixa granulométrica apresenta o melhor desempenho na adsorção do efluente.

3.5. Testes de adsorção qualitativo

A adsorção é um processo no qual os efluentes são transferidos de uma solução para uma superfície sólida e porosa, sendo a substância retida denominada adsorbato e a substância com a capacidade de reter chamada de adsorvente (WANG e GUO, 2020).

Para verificar a ocorrência de retenção, a análise pode ser feita de forma qualitativa ou quantitativa. O teste qualitativo é baseado na observação visual de resultados, enquanto o quantitativo envolve cálculos matemáticos e equações. Os testes qualitativos de adsorção foram realizados com 25g de cada amostra de granito/mármore em recipientes contendo granulometrias variadas das amostras (pequeno, médio e grande). Foram adicionados 50 ml de água destilada e 25 ml de uma solução de azul cresil a 5 mol/L [A escolha do corante deu-se devido à sua alta afinidade com a água e sua baixa degradação ambiental (DA SILVA, 2023)]. Após uma hora, os granitos Ocre Itabira, Itaúnas e São Gabriel demonstraram adsorção, sendo o Ocre Itabira o mais eficiente visualmente, como mostra a imagem 02. Contudo, o processo foi demorado, evidenciando a necessidade de um tratamento químico para otimizar a adsorção do material.

Imagem 02: Teste qualitativo com amostra de granito Ocre (A), Itaúnas (B), São Gabriel (C), Verde Pérola (D) e mármore Bege Bahia (E).



Fonte: Autor (2024)

3.6. Teste de acidez (pH)

Os testes de pH foram realizados para detectar a acidez dos granitos em água, utilizando um pHmetro digital previamente calibrado. Em cada recipiente, contendo diferentes granulometrias (pequena, média e grande), foram adicionados 25g de cada amostra de granito/mármore, seguidos de 50 ml de água destilada. O pH de cada amostra foi medido.

Em seguida, foi adicionada uma solução de corante azul cresil (5 mol/L, pH 6,6) aos recipientes. O pH foi novamente verificado após a diluição e ao final do teste de adsorção qualitativa. Os testes foram realizados em triplicata, e os valores obtidos foram classificados conforme a escala de acidez: ácido (pH menor que 7), básico (pH maior que 7) e neutro (pH igual a 7). O teste de pH é essencial para garantir a obtenção de uma água neutra durante o tratamento.

3.7. Tratamento químico das amostras

Para obter um melhor resultado, com maior taxa de adsorção e, conseqüentemente, maior retenção dos rejeitos em um espaço menor de tempo, foi realizada a corrosão dos poros, visando aumentar sua capacidade de adsorção.

Para isso, seguiram-se referências técnicas sobre o tema, onde se observou a presença de ativação, especialmente a ativação das argilas organofílicas por meio de tratamento químico baseado em ataques alcalinos com derivados orgânicos da amônia, assim determinado nos trabalhos de Alomari (2024) e Melo (2023). Para o quartzo e as zeólitas, a ativação foi realizada por meio de ataques ácidos, conforme defendido por Hul (2024) e Zheng (2024). Tomando como base a composição química das amostras, havendo em suas composições os dois últimos constituintes minerais, optou-se por um tratamento ácido.

O tratamento foi realizado com ácido clorídrico (HCl), comercialmente conhecido como ácido muriático. A escolha desse reagente deveu-se ao seu baixo custo e fácil acesso para a comunidade local.

Para o processo de ativação, usou-se 150 ml de HCl a 0,5 mol/L. Após o preparo da solução, adicionaram-se 10 g de cada amostra de granito/mármore em recipientes separados, contendo granulometrias diferentes (pequena, média e grande). As amostras foram submetidas a agitação por 10 minutos.

Após o processo de ativação, as amostras foram filtradas, lavadas com água e secas em estufa a 100°C por uma hora, seguindo a metodologia de Hul (2024) e Zheng (2024). Após esse período, o teste de adsorção qualitativo foi replicado, e

observou-se uma rápida adsorção do corante. A primeira amostra, Ocre, necessitou de apenas 10 minutos para reter o corante, enquanto a segunda, Itaúnas, precisou de 25 minutos, e a última, o granito São Gabriel, exigiu 30 minutos. No entanto, as amostras de Verde Pérola e Mármore Bege Bahia não apresentaram qualquer reação.

3.8. Teste de adsorção quantitativo

Após a ativação dos poros das amostras de granitos/mármore, realizou-se uma nova análise para medir a taxa de adsorção, utilizando uma técnica quantitativa, ou seja, com base em aspectos numéricos.

Os testes foram realizados por meio de espectroscopia de adsorção na região do UV-visível, seguindo a metodologia empregada por Sales (2022) e foram realizadas no laboratório de Química Analítica da Universidade Federal do Ceará (UFC) *campus Pici*.

Foi utilizada uma solução de 100 ppm do corante azul cresil, que foi agitada durante 24 horas com rotação de 100 rpm a 30°C. Em seguida, foram separadas amostras da solução, todas com a mesma quantidade, e o adsorvente foi adicionado a elas, sendo as amostras submetidas a análises na UV-Vis.

Os resultados médios dos testes triplicados das amostras, como concentração (mg/L), absorbância, retenção e massa de adsorvente (mg), foram tabulados.

3.9. Análise de micrografia

Para verificar o tamanho e a presença de poros nas amostras com melhores desempenhos nos testes anteriores, foram realizados testes de micrografia utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (M.E.V). As análises foram feitas nas amostras de granito ocre, antes e após o tratamento químico com HCl, e também nas amostras de carvão ativado produzido a partir da biomassa de Jurema Preta (*Mimosa hostilis*) para fins comparativos. A metodologia seguida foi a de Devavid, Gomes e Machado (2007), conforme descrito na obra "*Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e Preparação de Amostras*".

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Ceará - UFC, onde usou-se amostras de dimensões variando de 51 a 100 mm, conforme as configurações do equipamento descritas por Hul (2024), com tensão de aceleração de 10 kV, distância de trabalho de 10 mm e ampliação de 1.000 vezes.

3.10. Determinação de metais na solução

A composição das rochas ornamentais, especialmente aquelas que contêm biotita e mica, é crucial, pois pode incluir metais como alumínio, magnésio e cálcio, cuja liberação na água pode torná-la imprópria para consumo humano, representando riscos à saúde a médio e longo prazo, conforme apontado por Nelson e Cox (2012).

Para detectar a presença de metais na água, foram empregadas duas técnicas, seguindo a metodologia de Zheng

(2024). A primeira técnica é a titulometria, utilizando ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), indicador eriocromo T e uma solução-tampão de pH específico para cada faixa de complexação, além de titulação com fluoreto de sódio (NaF) para a determinação de alumínio em meio ácido, com pH igual a 3.

A segunda técnica, também conforme Zheng (2024), envolve a degradação térmica das amostras em meio aquoso, em três faixas de pH (ácido, básico e neutro), simulando condições do intemperismo natural. Ambas as abordagens são essenciais para avaliar a qualidade da água e identificar metais prejudiciais à saúde.

No procedimento experimental, foram adicionados 10g de cada amostra de granito/mármore em recipientes com diferentes granulometrias (pequena, média e grande). Em seguida, foi adicionada uma solução de 0,1 M de NaOH para simular o meio alcalino, 0,1 M de H₂SO₄ para o meio ácido e apenas água para o sistema neutro. As amostras foram agitadas a 50 rpm por 30 minutos a 75°C. Após esse tempo, as soluções foram filtradas, e os analitos foram secos e preparados para análise. A determinação dos metais deveria ser realizada por fotometria de chama, como sugerido por Zheng (2024). Contudo, devido à ausência do método, optou-se pela determinação utilizando a técnica titulométrica com EDTA, conforme anteriormente descrito.

Para a determinação íons de magnésio (Mg²⁺), alumínio (Al³⁺) e cálcio (Ca²⁺), utilizou-se para ambas as análises os livros de Harris (2012) e Baccan et al. (2005) e o trabalho de Cantarella et al. (2001).

Ao final das análises triplicadas, foram realizados os cálculos de concentração dos metais nas amostras, cujos resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela legislação brasileira para o consumo de água, conforme disposto no Gabinete Ministerial da Saúde (GM/MS) nº 888 de 2021, bem como com as Portarias do Ministério da Saúde (MS) nº 2.914/2011 e a Portaria de Consolidação nº 05/2017. Os resultados foram tabulados e classificados quanto à presença ou ausência de metais.

O teste térmico realizado possibilitou a obtenção das taxas de degradação das amostras. Durante o processo, entre a secagem e as titulações, foram realizadas as pesagens das amostras, conforme a metodologia de Hul (2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises físicas, mecânicas e físico-químicas das amostras

Com o objetivo de analisar as matrizes minerais presentes no lócus, foram conduzidos testes nos granitos Ocre Itabira, Itaúnas, São Gabriel e Verde Pérola, bem como no mármore Bege Bahia, avaliados individualmente. As análises buscaram determinar o desempenho dessas rochas em relação à dureza, resistência mecânica, separação granulométrica, pH, capacidade de adsorção e liberação de metais em água sob condições típicas e reais. Os resultados obtidos foram

organizados e apresentados na Tabela 01, que inclui, para fins comparativos, os Valores Máximos Permitidos (VMP) dos cátions analisados, conforme as normativas vigentes para a potabilidade da água destinada ao consumo humano.

Tabela 01: Análise das rochas ornamentais.

ANÁLISES FÍSICA, MECÂNICA E FÍSICO-QUÍMICAS DAS ROCHAS ORNAMENTAIS DA CIDADE										
AMOSTRAS	DUREZA	RESISTÊNCIA MECÂNICA	TAMANHO	pH	ADSORÇÃO QUALITATIVO	PRESENCIA DE METAIS Ca^{2+}, Mg^{2+} e Al^{3+}				
						QUANTITATIVO (mg/L do cátion)				
						QUALITATIVO		Ca ²⁺ e Mg ²⁺	VMP	Al ³⁺
Ocre Itabira	6.4 Mohs	135 MPa	Pequeno	7.0	Presente	Ausente	0.0		0.0	
			Médio	7.0	Presente	Ausente	0.0		0.0	
			Grande	7.0	Presente	Ausente	0.0		0.0	
	Itaúnas	6.7 Mohs	152 MPa	Pequeno	6.9	Presente	Ausente	0.0		0.0
				Médio	6.9	Presente	Ausente	0.0		0.0
				Grande	6.9	Presente	Ausente	0.0		0.0
Granito São Gabriel	7.0 Mohs	167 MPa	Pequeno	6.9	Presente	Presente	196.0		0.2	
			Médio	6.9	Presente	Presente	201.5	200	0.2	0.2
			Grande	6.9	Presente	Presente	202.0		0.3	
	Verde Pérola	7.3 Mohs	185 MPa	Pequeno	6.6	Ausente	Presente	0.0		0.1
				Médio	6.6	Ausente	Presente	0.0		0.1
				Grande	6.4	Ausente	Presente	0.0		0.1
Mármore Bege Bahia	7.5 Mohs	200 MPa	Pequeno	6.8	Ausente	Presente	300.0		0.0	
			Médio	7.0	Ausente	Presente	320.0		0.0	
			Grande	6.9	Ausente	Presente	350.0		0.0	

Fonte: Autor (2024)

Nos testes de resistência mecânica e dureza, observou-se uma ampla variação de valores entre as diferentes rochas analisadas. O granito Ocre Itabira, que chamaremos a partir de agora só de ocre, destacou-se por apresentar os menores valores, com dureza de 6,4 Mohs e resistência mecânica de 135 MPa. Outra amostra com desempenho consideravelmente baixo nesses parâmetros foi o granito Itaúnas. Entretanto, para aplicações domésticas, onde não há disponibilidade de maquinário industrial adequado, a escolha de uma matriz que exija menor força no processo de trituração torna-se relevante. Nesse sentido, o granito ocre se mostra mais promissor, pois sua menor resistência mecânica facilita o processamento. Já na indústria, essa característica pode representar uma economia significativa no consumo de energia.

A variação nos valores dos parâmetros mecânicos decorre das diferenças nas proporções dos constituintes químicos de cada amostra (KER et al., 2015), bem como da organização estrutural dos escudos cristalinos e do empacotamento dos cristais que compõem essas rochas. Essas diferenças na disposição dos minerais influenciam as interações de atração e repulsão entre os cristais, resultando em variações na dureza e resistência mecânica das amostras (LEE, 1999). Além disso, a composição mineralógica é um fator determinante, uma vez que, segundo Hul (2024) e Buzukashvili (2024), a presença de quartzo e zeólitas torna as rochas mais quebradiças devido às cavidades microporosas características desses minerais.

Dentre as três matrizes que demonstraram desempenho significativo no processo de retenção do corante, destaca-se a presença de zeólitas, quartzo, feldspato e mica em suas composições (MASS, 2008). Ressalta-se que tanto o quartzo quanto as zeólitas possuem estrutura porosa e capacidade adsorviva, sendo as zeólitas mais porosas e de processamento mais fácil (BUZUKASHVILI, 2024).

O desempenho superior do granito Ocre nos testes adsorvivos, bem como seus menores índices de processamento, deve-se à elevada proporção de zeólitas, seguida por quartzo e demais minerais. Já o granito Itaúnas, embora apresente composição semelhante, possui uma maior concentração de

quartzo e valores similares aos demais constituintes. Por fim, o granito São Gabriel apresenta concentrações decrescentes de mica, feldspato, quartzo e zeólitas (DE QUEIROZ NETO, 2000). Tais concentrações impactam diretamente suas propriedades físico-químicas, mecânicas e também as taxas adsorvivas.

Para iniciar as análises das características físico-químicas, foram realizados testes de granulometria com o objetivo de classificar as amostras em três faixas de tamanho, conforme apresentado anteriormente, tendo como finalidade a compreensão cinética de adsorção para cada faixa de tamanho

A determinação da acidez das amostras foi realizada por meio da medição do pH, avaliando o potencial de correção do meio por cada amostra. Na metodologia aplicada, introduziu-se uma solução de corante de alta resistência, o azul de cresil, em meio aquoso com pH inicial de 6,6 e após verificou a capacidade de retenção, por meio do ajuste do pH. Verificou-se que o cre apresentou um alto potencial de retenção do corante, promovendo a neutralização do meio em todas as granulometrias analisadas. A obtenção de um pH final igual a 7 indica uma acidez ideal para o tratamento de água, em conformidade com a legislação vigente (BRASIL, 2021).

Os testes de acidez evidenciaram a ação adsorviva das amostras que contêm quartzo e zeólitas, resultando em um pH mais próximo da neutralidade. No entanto, esse efeito não foi observado no granito Verde Pérola, devido à ausência desses constituintes. Por outro lado, o mármore Bege Bahia, mesmo não contendo quartzo e zeólitas, apresentou alterações na acidez do meio, atingindo valores próximos da neutralidade.

Esse fenômeno foi posteriormente explicado pelos testes titulométricos, que indicaram a liberação de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), cátions alcalinos que interagem no meio por meio de reações de neutralização, elevando o pH para valores próximos de 7 (LEE, 1999). O mesmo comportamento foi observado no granito São Gabriel, que, apesar de possuir baixas quantidades de quartzo e zeólitas, libera quantidades moderadas destes cátions básicos na água, contribuindo para a elevação do pH e aproximando-o do valor ideal.

Com base nos resultados do teste de acidez, o granito Ocre Itabira destacou-se novamente como a opção mais viável para aplicação em processos de filtragem de água, devido à sua capacidade de adsorção e ajuste do pH para a neutralidade. Em contrapartida, o mármore Bege Bahia e o granito Verde Pérola demonstraram-se ineficazes para esse fim, uma vez que não apresentaram desempenho significativo para adsorção e na correção da acidez do meio.

Durante o teste qualitativo de adsorção, realizado com um tempo de contato inicial de uma hora, observou-se uma retenção efetiva do corante em três amostras: Itaúnas, São Gabriel e Ocre Itabira. Esse comportamento já era previsto ao se analisar a composição mineralógica das amostras. Dentre elas, o granito Ocre Itabira apresentou a maior capacidade de

retenção do corante, seguido pelo Itaúnas e, por último, o São Gabriel, que demonstrou um desempenho inferior.

Novamente, o granito Ocre Itabira destacou-se como a alternativa mais promissora entre as rochas analisadas. Seus resultados nos testes de acidez (pH) e adsorção qualitativa indicam características de um material adsorvente eficiente. Além disso, sua menor dureza e resistência mecânica favorecem a aplicação em processos domésticos, pois facilitam seu processamento. Outro fator determinante para a escolha do Ocre Itabira foi a ausência de liberação de metais potencialmente prejudiciais à saúde, característica observada no granito São Gabriel. Assim, o granito Ocre Itabira foi selecionado para a confecção do filtro de baixo custo, por apresentar o melhor desempenho nos parâmetros avaliados.

4.2 Tratamento químico na amostra.

Após a análise dos resultados qualitativos de adsorção, os fenômenos observados em três amostras – granitos Ocre Itabira, Itaúnas e São Gabriel – ficaram evidentes. No entanto, nos testes iniciais, o processo de adsorção ocorreu de forma relativamente lenta, levando aproximadamente uma hora para atingir um resultado significativo, enquanto, conforme apontado por Nascimento et al. (2014), para o processo ser eficiente deve ocorrer em minutos. Dessa forma, buscou-se melhorar a eficiência do material por meio de tratamentos químicos.

Durante o tratamento químico, observou-se a formação de bolhas na superfície das amostras, que persistiram ao longo do período de agitação, reduzindo gradativamente conforme o processo avançava. Notou-se que, em grânulos menores, a formação das bolhas ocorria de maneira mais rápida, evidenciando uma cinética de reação mais acelerada.

O gás liberado durante o tratamento apresentava características físico-químicas compatíveis com o dióxido de carbono (CO₂). Além disso, partículas menores que 0,01 mm foram depositadas no fundo do frasco, resultado do desprendimento de fragmentos das amostras devido ao ataque ácido.

Após a conclusão do ataque ácido, os testes de adsorção qualitativa foram refeitos, e constatou-se uma melhoria significativa na cinética de retenção do corante azul cresil. O granito Ocre Itabira reteve completamente o corante em apenas 10 minutos, enquanto o granito Itaúnas necessitou de 25 minutos e o São Gabriel, 30 minutos. Esses resultados indicam que o tratamento químico contribuiu para a otimização do desempenho adsorativo das amostras analisadas.

4.3 Testes quantitativos de adsorção.

Foram realizadas análises espectroscópicas na região do UV-visível utilizando espectrofotometria UV-Vis, nas quais todas as amostras de rochas – granito Ocre Itabira, Itaúnas, São Gabriel, Verde Pérola e mármore Bege Bahia – foram submetidas a uma avaliação quantitativa. No entanto, nesta etapa da pesquisa, optou-se por considerar apenas o granito

Ocre Itabira, devido à sua elevada eficiência no processo de adsorção em ambos os testes, tanto antes quanto após o tratamento químico. Os resultados obtidos foram tabulados e apresentados na Tabela 02.

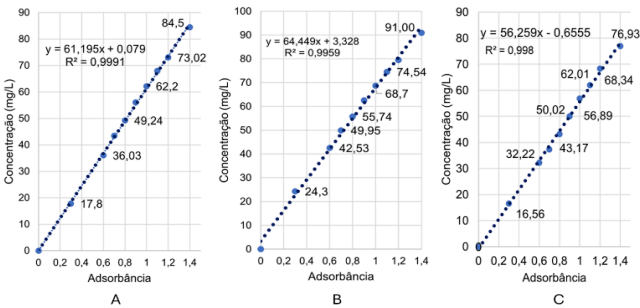
Tabela 02: Resultados da análise com Uv-vis do granito Ocre.

AMOSTRA	TAMANHO	CONCENTRAÇÃO (mg/L)	ABSORBÂNCIA	RETENÇÃO (%)	MASSA DE ADSORVENTE (mg)
	Pequeno	0,0050	1,3520	14,00	5,070
		0,0100	1,2010	23,60	20,53
		0,0150	1,1410	28,23	27,40
		0,0200	1,0102	46,23	40,30
		0,0250	0,9030	53,91	46,09
		0,0300	0,7590	59,70	53,70
		0,0350	0,6570	72,60	71,77
		0,0400	0,5671	79,47	76,40
		0,0450	0,0794	94,93	86,00
		0,0050	1,3500	10,13	9,00
Ocre Itabira	Médio	0,0100	1,2000	20,30	25,46
		0,0150	1,1400	24,30	31,30
		0,0200	1,0110	42,53	44,26
		0,0250	0,9020	49,95	50,05
		0,0300	0,7582	55,74	57,47
		0,0350	0,6561	68,70	75,70
		0,0400	0,5660	74,54	79,70
		0,0450	0,0790	91,00	89,87
		0,0050	1,3516	23,07	19,31
		0,0100	1,2007	31,66	32,22
	Grande	0,0150	1,1409	35,06	37,38
		0,0200	1,0101	42,51	43,17
		0,0250	0,9025	56,83	51,37
		0,0300	0,7585	62,62	57,49
		0,0350	0,6568	67,78	64,94
		0,0400	0,5661	78,41	68,34
		0,0450	0,0794	80,69	76,93

Fonte: Autor (2024)

Com base nos resultados dos testes, foram elaborados gráficos representando as taxas de adsorção do granito Ocre Itabira em diferentes condições: sem tratamento químico (Gráfico A), após o tratamento químico (Gráfico B) e, para fins comparativos, uma amostra comercial amplamente utilizada em processos de adsorção, o carvão ativado proveniente da biomassa da jurema preta (*Mimosa hostilis*) (Gráfico C).

Gráfico 02: Adsorção quantitativa do granito Ocre Itabira sem tratamento químico (A) com tratamento químico (B) adsorção comparativa com amostra presente no mercado (C).



Fonte: Autor (2024)

Nos gráficos apresentados acima, encontram-se os valores e resultados do teste de adsorção quantitativo, a qual observa-se a relação entre adsorbância e concentração, evidenciando uma tendência linear de adsorção. Os gráficos foram traçados com base nos estudos do Princípio da Isoterma de Langmuir.

A partir da análise dos gráficos, percebe-se que o granito Ocre Itabira apresentou um excelente potencial na etapa adsorativa, com um grande percentual de retenção. Outra análise feita, é que a partir do processo de ativação da amostra, há um aumento considerável na taxa de retenção do corante de

alta resistência, indicando a eficiência do tratamento químico e o aumento dos poros da matriz.

No gráfico A, referente ao granito Ocre sem tratamento, foram obtidos os valores do eixo y, correspondendo a equação $y = 61,195x + 0,079$, que ajudará a calcular valores de adsorção futuros e o coeficiente de regressão linear (R^2), igual a 0,9991, que confere a confiabilidade dos dados. Já no gráfico B, estão os dados relacionados ao granito com ataque ácido, traçado com os mesmos aspectos citados anteriormente. A partir de sua análise, foi feita equação de formação da linha de adsorção, $y = 64,449x + 3,328$ e regressão linear (R^2) equivalente a 0,9959.

Para fins comparativos, também inseriu-se nos testes uma amostra de carvão ativado para comparar a taxa de adsorção com a amostra testada neste estudo. Dessa maneira, percebe-se que o carvão, durante o teste quantitativo, apesar de ser uma matriz muito utilizada, apresentou adsorção inferior as amostras de granito Ocre, com e sem tratamento.

4.4. Micrografia realizada em Microscópio Eletrônico de varredura.

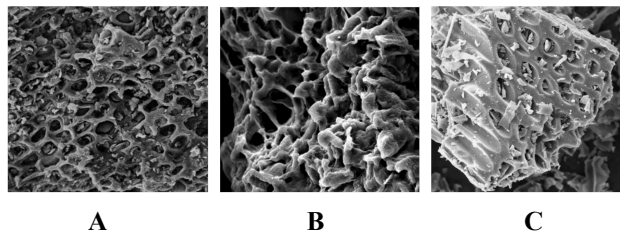
A realização de testes de micrografia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi essencial para a caracterização morfológica das amostras de granito ocre e termos comparativos com o carvão ativado. Seguindo a metodologia descrita por Devavid, Gomes e Machado (2007) e as configurações estabelecidas por Hul (2024), as análises foram conduzidas com o objetivo de examinar o tamanho e a presença de poros nas amostras.

Os resultados indicaram que o granito ocre, tanto antes quanto após o tratamento químico com HCl, apresentou uma superfície porosa. No entanto, após o tratamento, os poros tornaram-se mais amplos e interconectados, sugerindo uma potencial melhora na eficiência adsorptiva do material. Em contrapartida, o carvão ativado, embora naturalmente poroso, exibiu poros parcialmente obstruídos, o que pode limitar sua capacidade de adsorção.

Essas observações evidenciam que o tratamento químico pode ser uma estratégia eficaz para otimizar as propriedades adsorptivas de materiais como o granito. Já o carvão ativado pode demandar procedimentos adicionais de limpeza e reativação dos poros para maximizar sua eficiência em processos de purificação e remoção de contaminantes.

Em síntese, a análise por MEV forneceu informações relevantes sobre a morfologia e porosidade das amostras, ressaltando a importância de tratamentos adequados na otimização das propriedades adsorptivas dos materiais estudados. Esses achados têm implicações significativas para diversas aplicações, incluindo tratamento de água, purificação do ar e remediação ambiental.

Imagem 03: Micrografia do ocre antes do tratamento (A), após o tratamento (B) e do carvão ativado (C).



Fonte: Autor (2024)

4.4 Montagem do filtro mineral

Após os testes físico, mecânicos e físico-químicos das amostras minerais disponíveis, notou-se que o granito Ocre Itabira se apresentava como melhor opção tanto pelas características direcionadas através dos testes laboratoriais, como por ser a opção de mais fácil processamento pela sociedade, desta forma tornou-se ele a opção utilizada.

Para produzir o primeiro protótipo do filtro usou-se materiais acessíveis e de baixo custo, como garrafas de Polietileno tereftalato, às PET e polímero siliconado, o qual foram montadas todas as etapas do filtro. O protótipo consiste em 4 (Quatro) camadas, sendo elas:

A primeira camada, é o polímero siliconado, ocupando 0,6%¹ da massa total. É responsável pela filtração final da água e vedação do filtro, além de possuir capacidade pelo tratamento anti-microbiológico da água devido às propriedades que impedem a fixação de ácaros e bactérias. O poliéster resiste a fungos e bolor, além de possuir melhor enchimento do que o algodão.

A Segunda camada é o granito Ocre Itabira em seu tamanho médio – Não se usou o granito em seu tamanho pequeno, mesmo apresentando retenção superior ao tamanho médio, pois, durante as etapas de teste notou-se que eventualmente os grânulos conseguiam passar pela fibra siliconada e a longo médio, longo prazo contribuirá para diminuir a eficiência do tratamento –, o qual ocupa 11,6%¹ da massa total. O granito é o adsorvente- responsável pela correção de diversos aspectos físico-químicos durante o seu processo de tratamento, como a correção de pH, sólidos totais, cloretos e a amônia. Se fazendo assim indispensável para a correção dos parâmetros da água.

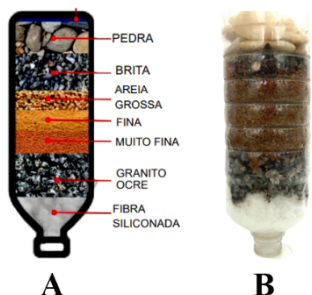
A terceira camada é constituída pelas areias: muito fina, fina, grossa e muito grossa, preenchendo 43,2%¹ do volume no recipiente. Sua distribuição se dá pela areia mais fina à mais grossa, atuando de modo que impeça a passagem de partículas contaminantes contidas na água, além de ser responsável pela limpeza inicial da mesma.

Por último, temos a camada de pedras, ocupando 44,4%¹ da capacidade do filtro, que vão desde pedras pequenas a pedras maiores. As pedras têm como função dificultar a passagem da água para a retirada de objetos maiores que

¹ - Valores percentuais referente a proporção do filtro, foram elaborados com base nas massas das partes constituintes do mesmo.

venham a dificultar o processo de tratamento de água. Na figura 01 (A) encontra-se o esquema estrutural do protótipo e na Figura (B) o protótipo inicial.

Figura 01: Filtro de baixo custo feito com granito Ocre.



Fonte: Autor (2024)

Durante a testagem do filtro, ficou evidente a necessidade de utilizar areias e pedras previamente lavadas, uma vez que, sem esse procedimento, a qualidade da água tratada seria comprometida pela presença de impurezas. Essa limitação tornou-se clara nos testes iniciais, nos quais a água percolada pelo filtro não apresentava as características desejadas de pureza. No entanto, após a lavagem da areia, observou-se uma melhora significativa na eficiência do sistema, resultando em uma água visivelmente limpa.

Dessa forma, a otimização do processo foi alcançada por meio da utilização de areias e pedras previamente higienizadas, preferencialmente provenientes de regiões próximas a rios, onde materiais sedimentares apresentam características favoráveis para a filtragem.

4.5. Montagem do filtro mineral industrial

Após a montagem dos primeiros protótipos e a validação de seu funcionamento, foram exploradas estratégias para viabilizar a aplicação prática da tecnologia, assegurando sua aceitação, facilidade de instalação e funcionalidade. Nesse contexto, por meio da engenharia reversa, foi desenvolvido um filtro adaptável para uso em empresas, escolas e residências, podendo ser facilmente integrado à rede hidráulica.

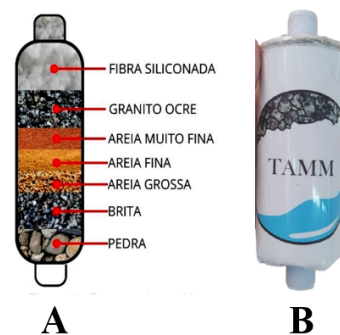
A fabricação desse filtro teve como principal foco sua utilização em bebedouros ou para redes hidráulicas. O projeto baseou-se no reaproveitamento da estrutura de um filtro proveniente de um bebedouro inutilizado, promovendo uma abordagem sustentável e de baixo custo. O protótipo foi projetado de forma ascendente de fluxo de água, ou seja, em direção oposta à força gravitacional. Essa configuração visa otimizar a eficiência do processo de adsorção e garantir maior tempo de contato entre a água e o meio filtrante.

O método de purificação empregado neste filtro assemelha-se ao utilizado em estações de tratamento de água, diferenciando-se, principalmente, pela ausência da etapa de cloração. A combinação da pressão da rede hidráulica com a força gravitacional promove a retenção de resíduos sólidos nas

camadas iniciais do filtro, garantindo que apenas a fração líquida entre em contato com o meio filtrante à base de granito Ocre. Essa configuração otimiza o processo de adsorção, permitindo um tratamento eficiente em um período reduzido.

A Figura 02 (A) apresenta o esquema estrutural do filtro industrial, enquanto a Figura 02 (B) exhibe a estrutura física do protótipo desenvolvido.

Figura 02: Esquema do filtro industrial (A) filtro montado (B).



Fonte: Autor (2024)

4.5.1. Montagem do filtro de torneiras

Com o desenvolvimento dos filtros, buscou-se uma alternativa de tratamento de água que fosse ao mesmo tempo aplicável e viável. Para isso, foi utilizada uma torneira antiga e sem funcionalidade, na qual, por meio dos princípios da engenharia reversa, compreendeu-se seu funcionamento e integrou-se o filtro industrial em sua parte interna. Essa modificação possibilitou um perfeito funcionamento do dispositivo, garantindo a purificação da água de forma rápida e prática.

A estrutura da torneira modificada permite duas formas distintas de uso: por meio de uma válvula, é possível obter água diretamente da rede de abastecimento, sem tratamento; já a outra opção direciona essa mesma água para o sistema interno de filtragem, onde ocorre a correção dos parâmetros físico-químicos e biológicos, garantindo a adequação aos padrões de qualidade exigidos.

Imagem 04: Torneira usando o granito Ocre Itabira instalada.



Fonte: Autor (2024)

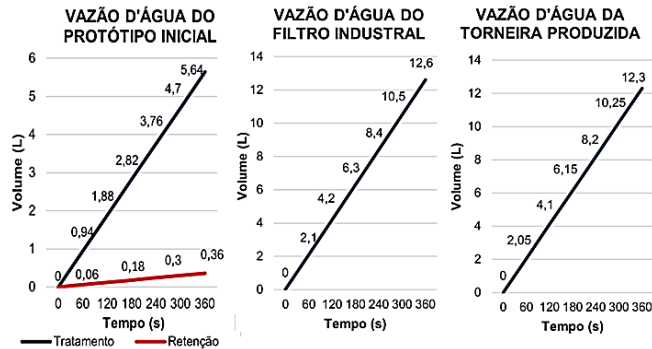
4.6. Análise da vazão dos filtros mineral

Após a fabricação dos filtros, foi realizado um teste para determinar a vazão de água, ou seja, o tempo necessário para

que o filtro trate uma determinada quantidade de água. Esse teste foi conduzido utilizando uma garrafa PET de 1 litro como base. Os resultados da vazão para o protótipo inicial da pesquisa foram analisados e registrados no Gráfico 03 (A).

Para a versão industrial e a torneira, que utilizam o mesmo princípio de funcionamento, também foi determinada a vazão de água em relação ao tempo de tratamento. Verificou-se que a vazão de água foi de 2,1 litros em 60 segundos sob uma pressão de 4 atm para o primeiro e de 2 L ao mesmo tempo para a torneira, conforme mostrado no Gráfico 03 (B).

Gráfico 03: Vazão dos protótipos.



Fonte: Autor (2024)

Nas duas formas de filtragem, nota-se um volume de água tratado por minuto considerável, mas sendo o industrial/torneira mais eficiente em termos de volume por minuto, o que não invalida o primeiro, pois, o filtro industrial é indicado para tratar a água de redes tubulares e bebedouros, sendo recomendado especialmente para águas mais pesadas. Ao contrário do filtro ecológico, são mais indicados para tratar águas mais simples, como água de chuva e de carros-pipa, ou seja, cada produto possui uma aplicação específica.

4.7. Análise físico-química da água tratada

Foram analisadas amostras de água coletadas de uma caixa d'água abastecida periodicamente por carros-pipa, uma realidade comum em Pedra Branca/CE devido à intensa crise hídrica, tornando essa condição uma vulnerabilidade para os moradores. A amostra bruta foi obtida de um reservatório localizado no bairro Santa Terezinha, escolhido por se tratar de uma área de baixo poder aquisitivo, onde há grande demanda de consumo pela comunidade local. Infelizmente, essa dependência da água proveniente de carros-pipa pode expor os moradores a riscos associados à qualidade da água.

Para a realização dos testes físico-químicos, foram retirados 100 mL de água bruta, seguindo as técnicas e metodologias estabelecidas pelo Manual Prático de Análise de Água da Fundação Nacional da Saúde – FUNASA (2013). Os ensaios foram conduzidos conforme os padrões de potabilidade determinados pela Portaria do Ministério da Saúde (GM/MS) nº 888 de 2021, posteriormente consolidada pela Portaria Nº 5/2017, que estabelece os Valores Máximos

Permitidos (VMP) para cada componente presente na água destinada ao consumo humano.

Tabela 03: Análises das amostras antes e após o tratamento.

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA BRUTA E TRATADA				
PARÂMETROS	ÁGUA BRUTA	ÁGUA TRATADA	VMP MS*	UNIDADES
Cor aparente	15	3	15	Pt/L (Hansen)
Condutibilidade	1.500	400	1.000	µS/cm
pH	6,0	7,0	6 a 9	Unidade de pH
Sólidos totais	100	20,0	100	NTU
Dureza total	350	30,0	500	mg L ⁻¹
Cloretos	250	120,0	250	mg L ⁻¹ Cl ⁻¹
Fluoretos	1	0,5	1	mg L ⁻¹ F ⁻¹
Oxigênio dissolvido	0,8	3	2 a 5	mg L ⁻¹ O ₂
Amônia	2,5	0,2	1,5	mg L ⁻¹ N-NH ₃

Fonte: Autor (2024)

As análises mostraram a eficiência do processo de tratamento, sendo realizada pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará *campus* Quixadá.

4.8. Análise biológica da água tratada

Segundo Provenzi (2005), água potável é aquela que possui condições adequadas para consumo, conforme parâmetros físico-químicos e biológicos. Para realizar este teste, foram separados 100 mL de água bruta do reservatório mencionado anteriormente, assim como o mesmo volume de amostra tratada pelo protótipo do Projeto TAMM . Essas amostras foram analisadas conforme os métodos descritos na literatura "*Qualidade microbiológica da água para consumo humano em instituição de ensino de Maringá- PR*", de Yamaguchi, M. R., et al (2013), Portaria do Ministério da Saúde (GM/MS) nº 888 de 2021 e a Portaria de Consolidação nº 05/2017. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 05.

Tabela 04: Análises biológicas das amostras antes e após o tratamento.

ANÁLISES BIOLÓGICAS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA BRUTA E TRATADA		
Organismos	Água bruta	Água tratada
Bactérias heterotróficas	Presente	Ausente
Cnidário (<i>Hydra spp.</i>)	Presente	Ausente
Coliformes fecais	Presente	Ausente
Coliformes totais	Presente	Ausente
Larva de mosquito	Presente	Ausente

Fonte: Autor (2024)

4.9. Divulgação científica

Foram conduzidas oficinas e palestras com o intuito de promover a divulgação e disseminação do conhecimento científico, além de estimular a interação e o interesse dos alunos pela pesquisa e suas aplicações práticas. Durante essas atividades, os participantes tiveram a oportunidade de construir um protótipo do filtro e realizar análises físico-químicas da água, tanto laboratoriais quanto alternativas, como a determinação do pH utilizando extrato de repolho roxo. Ao término das oficinas, os alunos compartilharam suas percepções e aprendizados, proporcionando contribuições valiosas para a evolução do projeto.

Imagem 05: Oficina realizada com os alunos.



Fonte: Autor (2024)

5. CONCLUSÃO

Concluiu-se com a elaboração do projeto, que o mesmo é viável para a continuação do estudo e pesquisa para um futuro levantamento bibliográfico buscando formas de adicionar outros tratamentos, como o tratamento utilizando sais de prata no que compete a um tratamento biológico, voltado para meios industriais. Além disso, o tratamento com luz ultravioleta (UV) surge como uma alternativa promissora para futuros estudos a fim de potencializar a eficiência do sistema.

Deste modo, o filtro, juntamente com seus produtos finais, é perceptível que se apresentou com uma alternativa prática e viável para a reutilização de águas poluídas e contaminadas, visto que o mesmo é eficiente na retirada de efluentes e correção dos padrões físico-químicos, conforme apresentados pelos testes realizados.

Ao que corresponde o tratamento, os seus custos foram minimizados em razão do reaproveitamento de materiais para a construção do filtro e a utilização dos mesmos serem bastante acessíveis, já que o único material comprado, o polímero siliconado, custa, em média, R\$ 0,01 a cada grama.

Ao finalizar a presente pesquisa nota-se grande potencial de adsorção com o granito Itaúnas, podendo ser realizados estudos mais aprofundados acerca desta matriz mineral, bem como elaborar pesquisas na correção da liberação de íons do granito São Gabriel, aproveitando desta forma a sua capacidade retentora.

Além dos estudos atrelados aos granitos Itaúnas e São Gabriel, se faz necessário em futuras pesquisas realizar testes cinéticos e termodinâmicos de forma a compreender melhor o processo de adsorção identificado neste grupo mineral dos granitos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOMARI, Asma Dhahawi Ahmad. Chemically modified clay for adsorption of contaminants: *trends, advantages and limitations-a concise review*. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, p. 1-24, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7.181:2016. **Metodologia para análise granulométrica de solos e minerais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13.818:2017. **Ensaio de resistência à compressão em rochas ornamentais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

Brasil. Fundação Nacional de Saúde. Manual prático de análise de água / **Fundação Nacional de Saúde** – 4. ed. – Brasília: Funasa, 2013. 150 p.

BRASIL. Lei nº 4.442, de 11 de julho de 2016. **Dispõe sobre a Operação Carro-Pipa**. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em: <<https://www.gov.br/planejamento/pt-br/acao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/cmmap/politicas/2023/avaliacoes-conduzidas-pelo-cmag/operacao-carro-pipa>>. Acesso. 20 abr. 2024.

BRASIL, Ministério da saúde, Brasília, Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Disponível: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html.

Brasil. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021.

BUZUKASHVILI, Sofi et al. Uma visão geral dos zeólitos sintetizados a partir de cinzas volantes de carvão e seu potencial para extração de metais pesados de águas residuais industriais. ↑ *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 1, pág. 130-152, 2024.

CAMPOS DE OLIVEIRA, Daina Bourguignon et al. DEVELOPMENT OF LEAD CRYSTAL GLASSES USING ORNAMENTAL STONE WASTE. *Environmental & Social Management Journal/Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 3, 2024.

COELHO, Camila Riquete. **Gestão de Recursos Hídricos: percepção ambiental e gestão participativa do comitê de Bacia Hidrográfica do Médio Paraíba do Sul**. 2022.

DA SILVA, Francielly Lopes; BEZERRA, Ana Keuly Luz. Recursos hídricos: um estudo jurisprudencial sobre a aplicação dos princípios do direito ambiental pelo Supremo Tribunal Federal. *Direito e Desenvolvimento*, v. 13, n. 2, p. 220-237, 2022.

DE ÁGUA, Manual Prático de Análise. Fundação Nacional de Saúde. **Vigilância Ambiental em Saúde**. Brasília, 2013.

DE AMORIM TEIXEIRA, Alexandrel. **XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**. 2023.

DE QUEIROZ NETO, José Pereira. Geomorfologia e pedologia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 1, n. 1, 2000.

DEVID, J.; GOMES, R.; MACHADO, T. Adsorção de íons metálicos: um estudo sobre as interações em superfícies adsorventes. *Revista Brasileira de Química Ambiental*, v. 10, n. 2, p. 25-35, 2007.

DOS SANTOS, Cochiran Pereira; DE OLIVEIRA, Herbet Alves; DE JESUS SANTOS, Adriana. Estudo da viabilidade da adição de

resíduo de corte de granito na produção industrial de artefatos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 29, p. 1-10, 2024.

DOS SANTOS, Kezia Andrade. POLÍTICAS PÚBLICAS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: *do combate à convivência com a seca*. **Geo UERJ**, n. 42, p. 66666, 2023.

FERREIRA, Gleyciane et al. Project microbiological quality of water in the school environment as a subsidy for health education activities: *Projeto qualidade microbiológica da água no ambiente escolar como subsídio para atividades de educação em saúde*. **Concilium**, v. 23, n. 5, p. 442-455, 2023.

FIGUEIREDO, A. C. Testes Granulométricos: Importância e Aplicações. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – **Universidade Federal do Ceará**, Fortaleza, 2021.

HUL, Gabriela et al. Insights into polystyrene nanoplastics adsorption mechanisms onto quartz sand used in drinking water treatment plants. **Science of the Total Environment**, v. 908, p. 168076, 2024.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Densidade demográfica brasileira por região**. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/brasil/caracteristicas-demograficas/distribuicao-da-populacao/21793-densidade-demografica-2022>>, 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Organização do território brasileiro: semiárido do Brasil**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15974-semiarido-brasileiro.html>>, 2023.

KER, A.; SILVA, M. B.; LEE, S. J. Efeito do tamanho iônico e da carga em processos de adsorção: *uma revisão crítica*. **Journal of Environmental Chemistry**, v. 35, n. 3, p. 102-110, 2015.

LEE, J. D. **Química Inorgânica Não Tão Concisa**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MAAS, Elayne Cristina Andrade de Sousa et al. **Caracterização geo-tecnológica de maciços graníticos da região nordeste do Estado do Amazonas com aplicação às rochas ornamentais**. 2008.

MAGNO, Edson Carlos Furtado. A Hidrografia no Brasil nos últimos 200 anos. **Revista do Clube Naval**, v. 1, n. 405, p. 62-67, 2023.

MELO, Marlon Lima de. Síntese de argila organofílica para sorção de carbamazepina visando a remediação de águas contaminadas por fármacos. Trabalho de Conclusão de Curso. **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**. 2023.

MIRANDA, Ellen Cristina Barbosa et al. Os indicadores de ecoeficiência de concretos contendo adições minerais The eco-efficiency indicators of concretes containing mineral admixtures. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 1, n. 01, p. 112-129, 2021.

MORENO RAMÓN, Héctor; IBÁÑEZ ASENSIO, Sara. La Escala de Mohs: **Dureza de los Minerales**. 2018.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. ADSORÇÃO: *aspectos teóricos e aplicações ambientais*. **Fortaleza: Imprensa Universitária**, 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>.

OLIVEIRA, Jaime Lopes da Mota et al. Os desafios do saneamento como promoção da saúde da população brasileira. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 4-5, 2020.

OUADDARI, Hanae et al. Removal of Methylene Blue by adsorption onto natural and purified clays: *Kinetic and thermodynamic study*. **Chemical Physics Impact**, v. 8, p. 100405, 2024.

QIU, Jiali. Drought impacts on hydrology and water quality under climate change. **Science of The Total Environment**, v. 858, p. 159854, 2023.

Química analítica quantitativa elementar / Nivaldo Bacchan, ... (et al.). -- São Paulo : *Edgard Blücher* ; Campinas : Universidade Estadual de Campinas, 1979, Bibliografia. 1. **Química analítica quantitativa I**, Bacchan, Nivaldo, 1946.

SALES, Matheus Pereira. **Síntese e caracterização de suspensões coloidais de nanopartículas de CuO para fabricação de sensores eletroquímicos para micropoluentes em água**. 2022.

SCHÖN, H. **Processamento Mineral: Técnicas e Aplicações**. Berlim: Springer, 2013.

SEÇÃO, I. **PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO Nº 5**.

SILVA, F. R. M. da; SILVA, R. S. da SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA E REUTILIZAÇÃO DOS EFLUENTES CONTAMINADOS Anais do **Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia**. 2022.

Silva, J. Avaliação da capacidade de adsorção da argila organofílica. **Cerâmica**, v. 65, n. 379, p. 123-135, 2019.

SIQUEIRA, Rafael Gomes et al. USO DE SENSORES PROXIMAIS NA AVALIAÇÃO DE SEDIMENTOS DE REPRESA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM VIÇOSA-MG. **Geo UERJ**, n. 39, p. 42429, 2021.

Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : **Embrapa**, 2018.

ULBRICH, H. et al. **Geologia básica para engenheiros**. 2023.

WANG, Y.; GUO, X. Adsorção de Metais em Solos Contaminados. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 15, p. 9201-9210, 2020.

YAMAGUCHI, Mirian Ueda et al. Qualidade microbiológica da água para consumo humano em instituição de ensino de Maringá-PR. **O mundo da saúde**, v. 37, n. 3, p. 312-320, 2013.

ZHANG, Xuejian et al. **The adsorption performance, thermodynamic and kinetic model of high crystallinity Na-p zeolites prepared from oil shale ash for the waste water treatment**. 2024.

ZHENG, Jie et al. **Interface adsorption mechanism of 5-nonyl salicylaldehyde oxime on malachite surface and its flotation separation performance with calcite and quartz**. **Separation and Purification Technology**, v. 332, p. 125758, 2024.