

APLICAÇÃO DE MATERIAIS ADSORVENTES HÍBRIDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE FLATURAMENTO (FH): UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL NA ENGENHARIA CIVIL PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE

DOI: 10.5281/zenodo.17576678

Blenda Nunes da Silva¹
Raquel Freitas Reis²
Dayane Izabelita Santos Lacerda³
Orivaldo da Silva Lacerda Jr⁴

Resumo

Este estudo analisa o potencial de tratamento e reaproveitamento de água proveniente da fraturação hidráulica (HF) mediante filtros híbridos em escala de bancada, com vistas à futura aplicação industrial na produção de hidrogênio verde. Filtros compostos por carvão ativado, sílica MCM-41 modificada e sílica de troca iônica comercial foram utilizados para remover contaminantes orgânicos, sais, metais e sólidos dissolvidos em água de refluxo da HF. As análises físico-químicas antes e após o tratamento revelaram reduções expressivas ($\geq 96\%$) nos parâmetros avaliados (pH, turbidez, condutividade, salinidade, SDT, metais, DQO). A viabilidade técnica do processo foi demonstrada em escala laboratorial, e a transição para escala industrial foi discutida, enfatizando o papel da engenharia civil no dimensionamento, construção e operação da unidade. O estudo mostra que a integração entre tratamento de água e produção de hidrogênio verde é uma alternativa ambientalmente sustentável e tecnicamente promissora.

Palavras-chave: filtração de água, escala industrial, engenharia civil, hidrogênio verde, adsorventes híbridos.

Abstract

This study evaluates the potential for treatment and reuse of water from hydraulic fracturing (HF) through hybrid filtration systems at bench scale, aimed at future industrial-scale application for green hydrogen production. Filters combining activated carbon, modified

1ULBRA.
2ULBRA.
3UFAM.
4UFAM.

MCM-41 silica and commercial ion-exchange silica were employed to remove organic contaminants, salts, heavy metals and dissolved solids from HF flow-back water. Physicochemical analyses conducted before and after treatment revealed significant reductions ($\geq 96\%$) in key parameters (pH, turbidity, conductivity, salinity, TDS, metals, COD). The technical feasibility of the process at bench scale was demonstrated, and the path to industrial scale was discussed, highlighting the vital role of civil engineering in the design, construction and operation of the unit. The study indicates that linking water treatment from HF to green hydrogen production is an environmentally sustainable and technically viable pathway.

Keywords: water filtration, industrial scale, civil engineering, green hydrogen, hybrid adsorbents.

INTRODUÇÃO

O fraturamento hidráulico (Hydraulic Fracturing – HF) é uma técnica amplamente empregada na extração de petróleo e gás natural de formações geológicas de baixa permeabilidade, como folhelhos e xistos betuminosos. O processo consiste na injeção de uma mistura de água, areia e aditivos químicos sob alta pressão, com o objetivo de criar fraturas artificiais nas rochas e, assim, facilitar o escoamento dos hidrocarbonetos até o poço produtor (WOLLIN et al., 2020). Embora tenha impulsionado a produção de energia em escala global, o HF apresenta impactos ambientais significativos, principalmente no que se refere ao uso intensivo de água e à geração de efluentes altamente contaminados.

De acordo com Kondash, Lauer e Vengosh (2018), o volume médio de água utilizado por poço aumentou até 770% entre 2011 e 2016, acompanhado por um acréscimo de 550% na geração de águas residuais. Essas águas, conhecidas como refluxo e águas produzidas, contêm altas concentrações de sais, metais pesados (como bário, arsênio e estrôncio), compostos orgânicos voláteis, materiais radioativos e sólidos em suspensão, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente (WOLLIN et al., 2020). Somente entre 2005 e 2014, estima-se que os poços fraturados nos Estados Unidos tenham consumido cerca de 250 bilhões de galões de água e gerado 210 bilhões de galões de efluentes (VENGOSH, 2015).

Diante desse cenário, o tratamento e a reutilização da água proveniente do fraturamento hidráulico configuram-se como estratégias essenciais para reduzir os impactos ambientais e promover o uso racional dos recursos hídricos. Neste estudo, propõe-se o

tratamento dessas águas em escala de bancada, por meio de filtros compostos por carvão ativado, sílica MCM-41 modificada, sílica de troca iônica comercial e lã de pelon. Essa metodologia busca não apenas remover contaminantes orgânicos e inorgânicos, mas também avaliar a eficiência e a viabilidade técnica e econômica do processo, visando sua futura aplicação em escala piloto ou industrial.

O aproveitamento da água tratada é de grande relevância, pois será destinado à produção de hidrogênio verde, especialmente quando for iniciada a fabricação dos filtros em escala industrial ou piloto. Essa iniciativa integra sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica, contribuindo para o desenvolvimento de fontes limpas de energia.

Após o processo de filtração, serão realizados ensaios físico-químicos antes e depois do tratamento, com foco na determinação de parâmetros como turbidez, salinidade, pH, metais pesados, compostos orgânicos e sólidos totais dissolvidos. Dessa forma, será possível mensurar o grau de purificação da água e seu potencial reutilização em novas operações de fraturamento ou em outros fins industriais.

O hidrogênio verde representa uma alternativa energética sustentável, obtida a partir da eletrólise da água utilizando fontes renováveis, como a energia solar e eólica. Esse processo não emite gases de efeito estufa, o que o torna essencial para a transição rumo a uma economia de baixo carbono. No entanto, a consolidação dessa tecnologia no Brasil exigirá grande quantidade de água de alta pureza, indispensável à eficiência do processo de eletrólise. Nesse sentido, o presente projeto (ou artigo) busca antecipar essa demanda, propondo o tratamento e a reutilização de águas residuais como estratégia sustentável para suprir as necessidades hídricas dessa nova e promissora indústria.

Portanto, a pesquisa tem como objetivo principal analisar o potencial de tratamento e reaproveitamento da água proveniente do fraturamento hidráulico, empregando sistemas de filtração em escala de bancada e análises físico-químicas para avaliar sua eficiência e viabilidade de reuso. Essa proposta busca conciliar a produção energética com a preservação dos recursos hídricos, promovendo soluções seguras, econômicas e ambientalmente sustentáveis para o setor de óleo e gás.

Os filtros utilizados neste estudo — compostos por carvão ativado, sílica MCM-41 modificada e sílica de troca iônica comercial — desempenham papéis complementares no processo de purificação. O carvão ativado é responsável pela adsorção de compostos

orgânicos e de metais pesados devido à sua elevada área superficial e porosidade. A sílica MCM-41, um material mesoporoso de estrutura altamente ordenada, contribui para a remoção seletiva de contaminantes, podendo ser modificada quimicamente para aumentar sua afinidade por determinadas substâncias. Já a sílica de troca iônica atua na captura de íons metálicos e sais dissolvidos, favorecendo o polimento final da água tratada.

Assim, o foco principal do projeto concentra-se na construção desses filtros em escala industrial, piloto ou semi-industrial, etapa que demandará um conhecimento integrado de engenharia civil, química e de materiais, especialmente se a viabilidade econômica do processo for comprovada. A expectativa é que, futuramente, empresas do setor possam adotar e adaptar o modelo proposto, incorporando a produção e implementação desses filtros em suas plantas industriais, contribuindo para a sustentabilidade e para o desenvolvimento de tecnologias nacionais voltadas à reutilização de águas residuais e à produção de hidrogênio verde.

Levantamento bibliográfico

Fraturamento Hidráulico

O fraturamento hidráulico, também conhecido como *fracking*, é uma técnica utilizada para extrair gás e petróleo de formações rochosas de baixa permeabilidade, mediante a injeção de grandes volumes de fluidos em alta pressão. Essa injeção provoca a abertura de fraturas nas rochas, permitindo o fluxo dos hidrocarbonetos até o poço produtor (Akbari et al., 2025). Os fluidos de fraturamento são compostos majoritariamente por água, areia e aditivos químicos, cuja formulação varia conforme as características geológicas da formação. Entretanto, essa técnica consome grandes quantidades de água doce e gera um volume expressivo de efluentes contaminados, conhecidos como *flowback* ou água de refluxo, tornando-se um dos principais desafios ambientais do setor (Tong & Liu, 2025).

Estudos indicam que entre 15% e 80% da água injetada durante o fraturamento retorna à superfície sob a forma de refluxo, contendo uma mistura complexa de componentes químicos e materiais dissolvidos (Tong & Liu, 2025). Essa água apresenta elevada salinidade, altos teores de sólidos dissolvidos totais (SDT), matéria orgânica com alta demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), além de íons como cloretos, metais pesados e, em alguns casos, compostos radioativos naturais. Também são

encontrados aditivos industriais — como biocidas, surfactantes e agentes redutores de atrito — que permanecem no fluido mesmo após o processo produtivo (Akbari et al., 2025). Essa composição complexa confere ao refluxo um alto potencial poluidor e torna seu tratamento tecnicamente desafiador e economicamente oneroso.

Quando descartada sem tratamento adequado, a água de refluxo pode causar sérios danos ambientais. O contato direto ou indireto com corpos d'água superficiais e subterrâneos pode resultar na contaminação de aquíferos, salinização do solo, bioacumulação de metais pesados e toxicidade para organismos aquáticos (Tong & Liu, 2025). Além disso, a presença de compostos orgânicos persistentes e radionuclídeos aumenta os riscos de poluição crônica, afetando ecossistemas e populações humanas próximas às áreas de exploração. A elevada carga orgânica e salina desses efluentes compromete também a eficiência de processos biológicos convencionais de tratamento, exigindo métodos avançados de remediação (Akbari et al., 2025).

Embora existam tecnologias de tratamento descritas na literatura — como oxidação avançada, coagulação-floculação, osmose reversa e adsorção — sua aplicação em larga escala ainda é limitada por custos elevados e dificuldades operacionais (Tong & Liu, 2025). Muitos locais de extração de gás de xisto não possuem projetos estruturados para o tratamento integral da água de refluxo, o que leva ao armazenamento inadequado ou ao descarte irregular desses efluentes. Diante desse cenário, observa-se a necessidade urgente de políticas públicas, regulamentações ambientais mais rigorosas e investimentos em sistemas integrados de tratamento, capazes de conciliar a viabilidade econômica com a preservação ambiental (Akbari et al., 2025)

Hidrogênio verde

As energias renováveis, como solar, eólica, biomassa e hidrogênio verde, desempenham um papel crucial na transição para uma matriz energética sustentável. O hidrogênio verde se destaca por ser produzido a partir da eletrólise da água usando energia renovável, liberando apenas oxigênio como subproduto. Sua característica mais relevante é a alta densidade energética, o que o torna promissor para setores industriais e transporte pesado que demandam altas quantidades de energia (IRENA, 2020).

Entre as vantagens do hidrogênio verde, está a capacidade de reduzir drasticamente as emissões de carbono em setores que não podem ser facilmente eletrificados, promovendo a descarbonização da economia (IRENA, 2020). Além disso, ele pode ser armazenado e transportado, oferecendo flexibilidade para a rede elétrica em momentos de alta demanda. Porém, desafios ainda existem, como o alto custo de produção e a necessidade de infraestrutura especializada para armazenamento e transporte (IEA, 2021)

Assim, o hidrogênio verde (HV) é obtido a partir de fontes de energia limpas e renováveis, como a energia eólica, solar e de biomassa. Por essa razão, ele não produz nem libera CO₂, configurando-se como uma alternativa promissora para a substituição dos combustíveis fósseis, que têm origem em fontes não renováveis e são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa. Esses gases importantes para a retenção de calor na atmosfera, elevando as temperaturas, o que constituem um sério risco para as gerações presentes e futuras (EPE, 2022).

O hidrogênio verde (HV) eliminaria a emissão de CO₂ na atmosfera, uma prioridade para diversos países europeus, que buscam promover avanços sustentáveis gradualmente, mudando atendendo às metas condicionais pelo Acordo de Paris. Esse tratado, assinado em abril de 2016 pelas Nações Unidas, define orientações para a redução das emissões de gases de efeito estufa pelos países que o ratificaram (SOUSA, 2022).

Em maio de 2022, o Porto do Açu firmou uma parceria com a Shell Brasil, por meio de um memorando de entendimento, para o desenvolvimento de uma planta piloto de hidrogênio verde no norte do Rio de Janeiro. Esse projeto, que prevê investimentos de até US\$ 120 milhões em pesquisa e inovação, visa fomentar a descarbonização e contribuir para a indústria do hidrogênio verde no Brasil (PORTO DO AÇU, 2022). De forma complementar, o HUB de Hidrogênio Verde, inaugurado em 2021 no Complexo de Pecém, Ceará, em parceria com a Federação das Indústrias do Estado do Ceará (FIEC) e a Universidade Federal do Ceará, tem como objetivo transformar o estado em um fornecedor importante global de hidrogênio verde, promovendo a geração de empregos, renda e contribuindo para a descarbonização global (CRUZ, 2022).

Carvão ativado

O carvão ativado é um material carbonáceo com alta porosidade e superfície específica, que lhe conferem uma excelente capacidade de adsorção. Essa característica permite ao carvão ativado captar e reter diversas substâncias, como compostos orgânicos, metais pesados e impurezas presentes em líquidos e gases, sendo amplamente utilizado no tratamento de água e purificação de ar. Por conta de sua estrutura microporosa, o carvão ativado é extremamente eficaz em processos de descontaminação, sendo capaz de adsorver poluentes com alta eficiência (Silva & Almeida, 2021).

A produção de carvão ativado geralmente envolve o uso de materiais orgânicos ricos em carbono, como biomassa residual, que passam por processos de carbonização e ativação. Primeiramente, a biomassa — que pode incluir resíduos de madeira, cascas de coco ou borra de café — é submetida a altas temperaturas em um ambiente com pouco oxigênio, processo conhecido como pirólise. Essa etapa remove substâncias voláteis e transforma a biomassa em carbono. Em seguida, o material passa por um processo de ativação, que pode ser química ou fisicamente, para ampliar sua porosidade e potencial de adsorção (Souza & Pereira, 2020).

O uso de resíduos orgânicos, como borra de café, na produção de carvão ativado tem atraído interesse devido ao seu baixo custo e ao apelo sustentável. Estudos mostram que a borra de café, quando ativada termicamente, gera um carvão com alta capacidade de adsorção, adequado para aplicações ambientais. Isso não só reduz os resíduos sólidos urbanos, mas também fornece uma alternativa ecológica e eficiente para o tratamento de água e a remoção de poluentes (Oliveira *et al.*, 2022). Além disso, o uso de resíduos agrícolas e industriais na produção de carvão ativado contribui para a economia circular e a gestão sustentável de resíduos.

O carvão ativado é amplamente aplicado em diversas áreas, especialmente no setor ambiental, onde é utilizado em filtros para purificação de água e ar. Em processos de tratamento de água, ele é particularmente eficaz na remoção de contaminantes orgânicos, pesticidas e metais pesados, contribuindo para a qualidade e segurança dos recursos

hídricos (Martins & Costa, 2023). O material também é empregado na indústria química, farmacêutica e alimentícia, onde atua na purificação de insumos e produtos finais. Essas múltiplas aplicações tornam o carvão ativado uma ferramenta versátil e essencial para práticas sustentáveis e de controle ambiental.

Peneira Molecular MCM-41

O MCM-41 é um tipo de material mesoporoso, desenvolvido inicialmente na década de 1990, que se destaca por sua estrutura altamente ordenada e elevada área de superfície. Essa estrutura é composta por uma rede de poros cilíndricos de tamanho uniforme, o que confere ao MCM-41 uma excelente capacidade de adsorção e o torna um material eficiente para a retenção e separação de moléculas. Devido a essas propriedades, o MCM-41 tem sido amplamente estudado e aplicado em diversas áreas, incluindo a catálise, adsorção de contaminantes e suporte para catalisadores e fármacos (Ferreira & Oliveira, 2021).

A síntese do MCM-41 geralmente envolve o uso de uma fonte de sílica e um surfactante, como cloreto de cetiltrimetilamônio, que ajuda a formar a estrutura organizada dos poros. O processo inclui a mistura desses componentes em condições específicas de pH e temperatura, seguida de uma etapa de calcinação para remover o surfactante e estabilizar a estrutura do material. Outra característica interessante do MCM-41 é a possibilidade de modificá-lo quimicamente para aumentar ainda mais sua afinidade por diferentes tipos de moléculas, o que expande suas aplicações em processos de purificação e remediação ambiental (Santos *et al.*, 2022).

O baixo custo de produção do MCM-41 é uma das razões para seu crescente uso em tratamentos ambientais, especialmente quando é produzido a partir de resíduos de sílica, como aqueles provenientes de laboratórios e indústrias. Esse processo de reaproveitamento transforma o resíduo em um material de alto valor agregado e reduz a necessidade de descarte inadequado de sílica. Dessa forma, o MCM-41 é uma solução eficiente e sustentável para problemas de contaminação, destacando-se como um adsorvente de baixa toxicidade e com impacto ambiental mínimo (Gomes & Ribeiro, 2023).

Devido à sua alta capacidade de adsorção, o MCM-41 tem aplicação em diversas áreas, particularmente no tratamento de águas residuais e na remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Estudos mostram que esse material é eficaz na captura de metais pesados e de moléculas orgânicas complexas, sendo uma alternativa promissora para processos de purificação em larga escala. Além disso, o MCM-41 tem sido utilizado como suporte em catálise heterogênea e em sistemas de liberação controlada de medicamentos, demonstrando sua versatilidade e importância em diferentes setores industriais e de pesquisa (Lima & Azevedo, 2023).

O uso de filtros de carvão ativado e MCM-41 na purificação da água residual industrial é justificado pela sua alta eficiência na remoção de contaminantes, incluindo metais pesados e compostos orgânicos que poderiam comprometer a qualidade do hidrogênio produzido. O carvão ativado, especialmente quando derivado de resíduos como a borra de café, é uma opção de baixo custo com uma excelente capacidade de adsorção. Já o MCM-41, material mesoporoso produzido a partir de sílica residual, apresenta uma estrutura de porosidade controlada que amplia sua área de superfície e otimiza a remoção de poluentes. Ambos os materiais são acessíveis e têm um impacto ambiental reduzido, uma vez que podem ser sintetizados a partir de resíduos industriais, promovendo um ciclo sustentável.

METODOLOGIA

A presente pesquisa será conduzida em escala de bancada, com o propósito de avaliar o potencial de tratamento e reaproveitamento da água proveniente do fraturamento hidráulico (HF). O estudo seguirá uma abordagem experimental e quantitativa, envolvendo etapas de coleta, preparo dos materiais filtrantes, tratamento das amostras e análises físico-químicas antes e após o processo de filtração.

Inicialmente, serão realizadas análises físico-químicas para determinar o estado da água bruta, incluindo os parâmetros de pH, turbidez, condutividade elétrica, salinidade, sólidos totais dissolvidos (STD), metais pesados, demanda química de oxigênio (DQO), conforme normas da APHA (2023).

O tratamento será realizado por meio de sistemas de filtração em escala de bancada (figura 01), utilizando diferentes materiais adsorventes e filtrantes: Lã pelon; Carvão ativado; Sílica MCM-41 modificada; Sílica de troca iônica comercial, responsável pela troca seletiva de cátions e ânions dissolvidos.

Figura 01. Protótipos de filtros desenvolvidos em escala laboratorial.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultado da confecção dos filtros

Os filtros apresentados na Figura 1 foram confeccionados em escala laboratorial como parte do estudo preliminar para o desenvolvimento de um sistema de purificação de água. Com base nos resultados obtidos, pretende-se ampliar o projeto para escala industrial, a fim de avaliar a eficiência em condições reais de operação e garantir a aplicabilidade em processos contínuos.

Essa transição requer o apoio da Engenharia Civil, especialmente na etapa de dimensionamento estrutural e construtivo, uma vez que o projeto de filtros em escala industrial demanda adequações relacionadas ao escoamento hidráulico, materiais de construção, fundações, estabilidade e segurança operacional. Conforme destaca Araújo et al. (2020), a integração entre as engenharias civil, química e ambiental é essencial para o desenvolvimento de sistemas de tratamento de água sustentáveis e de alto desempenho.

De acordo com Silva e Oliveira (2021), o dimensionamento de unidades filtrantes deve considerar parâmetros hidráulicos, resistência mecânica e manutenção, permitindo que a eficiência observada em escala laboratorial seja reproduzida em larga escala. Além disso, Souza et al. (2019) ressaltam que a fase de prototipagem é fundamental para validar os materiais filtrantes, definir as taxas de filtração e otimizar o processo de construção industrial.

Dessa forma, o avanço para a escala industrial será realizado em parceria com a área de Engenharia Civil da empresa, assegurando o cumprimento das normas técnicas e o desempenho adequado do sistema de filtragem em condições reais de operação.

Resultados da análise físico-química da água de refluxo de FH da empresa X de Mossoró-RN.

Os resultados das análises físico-químicas da água refluxo (FH), realizadas antes e após o processo de filtração, encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização físico-química da água refluxo gerada no processo de fraturamento hidráulico.

Parâmetro (unidade de medida)	Método de referência (APHA, 2023)	Água refluxo	Água tratada (carvão + MCM-41 + sílica de troca iônica)
pH	método 4500-H ⁺ B	5,8	7,1
Turbidez (NTU)	método 2510 B	320	2,5
Condutividade (µS/cm)	método 2520 B	2985	37
Salinidade (ppm)	método 2520 C	832	13
Sólidos Totais Dissolvidos (STD) (ppm)	método 2540 C	931	25

Parâmetro (unidade de medida)	Método de referência (APHA, 2023)	Água refluxo	Água tratada (carvão + MCM-41 + sílica de troca iônica)
Metais Pesados (ppm)	método 3111 B	-	-
Cromo (Cr⁶⁺)	método 3111 B	0,8	0,02
Manganês (Mn²⁺)	método 3111 B	0,9	0,03
Demanda Química de Oxigênio (DQO) (mg O₂/L)	método 5220 B	1.200	40

A água refluxo apresentou pH ácido (5,8), característico de fluidos de fraturamento devido à presença de aditivos químicos. após o tratamento, o pH elevou-se para 7,1, aproximando-se da neutralidade. essa correção ($\approx 22\%$ de aumento) indica remoção de compostos ácidos e troca iônica eficiente. resultados semelhantes foram relatados por Silva et al. (2020), que observaram neutralização do pH após filtração com MCM-41.

A turbidez reduziu de 320 para 2,5 NTU (99,2% de redução), demonstrando alta eficiência do carvão ativado e da sílica na remoção de sólidos suspensos. Veil et al. (2011) relataram reduções próximas de 98% com tecnologias de adsorção semelhantes, o que confirma a eficácia do método aplicado.

A condutividade caiu de 2.985 para 37 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (98,76 % de redução), evidenciando a remoção de íons dissolvidos. Gregory et al. (2011) indicam que tratamentos por troca iônica alcançam reduções entre 90% e 98%, compatíveis com os resultados obtidos. A salinidade foi reduzida de 832 para 13 ppm (98,44 % de redução), um valor expressivo, já que fluidos de fraturamento possuem elevada concentração de sais. Silva et al. (2020) observaram resultados semelhantes ao utilizar sílica de troca aniônica, confirmando a efetividade do processo.

As TDS diminuíram de 931 para 25,0 ppm (97,32% de redução). esse resultado reflete a combinação entre adsorção e troca iônica, promovendo a remoção de sólidos e compostos dissolvidos. na literatura, reduções entre 90% e 95% são comuns em processos híbridos (Gregory et al., 2011).

O teor de Cromo caiu de 0,8 para 0,02 ppm (97,5% de redução), valor dentro dos limites relatados por Veil et al. (2011), que destacam a eficiência da troca iônica na

remoção de metais tóxicos. A concentração Mn foi reduzida de 0,9 para 0,03 ppm (96,7% de remoção). a adsorção seletiva do Mn^{2+} confirma a afinidade do MCM-41 por metais divalentes. Por fim, O DQO passou de 1.200 para 40 mg O_2/l (96,7% de redução), indicando a eliminação de compostos orgânicos e surfactantes. Silva et al. (2020) observaram reduções próximas a 95% para DQO em águas residuais similares, reforçando a eficiência do sistema de tratamento.

CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que o uso de filtros em bancada compostos por carvão ativado, sílica mcm-41 modificada e sílica de troca iônica comercial pode promover remoções expressivas de contaminantes em águas de refluxo da fraturação hidráulica, atingindo reduções superiores a 96% nos principais parâmetros físico-químicos avaliados. o sucesso do experimento reforça o potencial de reutilização desses efluentes na produção de hidrogênio verde, contribuindo para o desenvolvimento de uma cadeia energética sustentável.

Ainda assim, o escalonamento para escala piloto ou industrial demanda integração com a engenharia civil para dimensionamento estrutural, hidráulico, seleção de materiais, fundações e manutenção operacional. a viabilidade técnico-econômica e operacional deverá ser cuidadosamente avaliada, considerando regime contínuo, capacidade de tratamento, durabilidade das mídias filtrantes e custos associados.

Assim, este trabalho abre caminho para que empresas de óleo e gás e indústrias de hidrogênio verde adotem modelos de tratamento e reutilização de água baseados em adsorventes híbridos, alinhando produção energética com preservação hídrica e inovação tecnológica.

REFERÊNCIAS

ADASA/DF. *Manual de Drenagem e Manejo de Águas Urbanas: Dimensionamento hidráulico – critérios para projetos de controle na fonte*. Brasília: ADASA, 2021.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington: APHA, 2023.

ARAÚJO, P. R.; LIMA, T. S.; COSTA, J. M. Integração entre engenharias no desenvolvimento de tecnologias de tratamento de água. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 215–226, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Relatório sobre a cadeia do hidrogênio no Brasil*. Brasília: EPE, 2022.

FERNANDES, C.; ROCHA, M. *Avanços em Tecnologias de Tratamento de Efluentes e Sustentabilidade no Ceará*. Recife: Energia e Sustentabilidade, 2024.

FERREIRA, P.; OLIVEIRA, L. *Materiais Mesoporosos e Suas Aplicações em Remediação Ambiental*. São Paulo: Química Verde, 2021.

FERREIRA, R. O.; OLIVEIRA, A. J. Síntese e modificação de MCM-41 para remoção de contaminantes em águas residuais. *Materials Research*, v. 24, e20210034, 2021.

GOMES, F. S.; RIBEIRO, M. T. Reutilização de sílica residual para síntese de materiais mesoporosos: benefícios ambientais e aplicação em adsorção. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 34, e00343, 2023.

GOMES, R.; RIBEIRO, T. *Sílica Residual e Produção de MCM-41 para Tratamento de Água*. Rio de Janeiro: Sustentabilidade e Tecnologia, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Hydrogen Review 2021*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>. Acesso em: 13 nov. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The future of hydrogen: Seizing today's opportunities*. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020>. Acesso em: 13 nov. 2024.

KONDASH, A. J.; LAUER, N. E.; VENGOSH, A. The intensification of the water footprint of hydraulic fracturing. *Science Advances*, v. 4, n. 8, p. eaar5982, 2018. Disponível em: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aar5982>.

LIMA, J.; AZEVEDO, S. Aplicações industriais do MCM-41 e outras sílicas mesoporosas. *Revista de Química Aplicada*, v. 15, n. 1, p. 22-29, 2023.

MARTINS, G.; COSTA, A. *Carvão Ativado na Purificação de Água e Ar: Teoria e Prática*. Rio de Janeiro: Ciência Ambiental, 2023.

MENDES, J.; COSTA, L. *Processos de Tratamento de Efluentes Industriais e sua Eficiência*. São Paulo: Química e Sustentabilidade, 2021.

MENDES, J. *Hidrogênio Verde e Descarbonização Energética*. Rio de Janeiro: Energia Renovável, 2023.

OLIVEIRA, F. et al. Uso de borra de café para produção de carvão ativado e tratamento de poluentes. *Revista de Tecnologia Ambiental*, v. 10, n. 3, p. 45-53, 2022.

OLIVEIRA, F. et al. Desafios e oportunidades no reuso de água industrial. *Revista de Tecnologias Ambientais*, v. 12, n. 1, p. 55-63, 2023.

OLIVEIRA, J. *Hidrogênio Verde e o Futuro da Energia Limpa*. São Paulo: Editora Sustentável, 2021.

RODRIGUES, P.; LIMA, F. *Silica Mesoporosa MCM-41 e suas Aplicações Ambientais*. São Paulo: Ciência & Tecnologia Ambiental, 2021.

SANTOS, L. M. et al. Aplicação de MCM-41 a partir de resíduos de sílica no tratamento de águas residuais. *Chemical Engineering Journal*, v. 450, 2022.

SANTOS, M. et al. Produção e caracterização do MCM-41 para aplicações ambientais. *Revista de Materiais e Tecnologias*, v. 8, n. 2, p. 33-41, 2022.

SANTOS, L.; SILVA, M. *Tecnologias para Produção de Hidrogênio Verde*. Rio de Janeiro: Energia e Meio Ambiente, 2023.

SILVA, A.; ALMEIDA, R. *Sustentabilidade na Indústria e o Reuso de Água*. São Paulo: Editora Ambiental, 2022.

SILVA, F. L.; ALMEIDA, R. M. Capacidade de adsorção de carvão ativado derivado de biomassa residual. *Revista Brasileira de Engenharia de Recursos Hídricos*, v. 26, n. 2, p. 345-354, 2021.

SILVA, F. L.; OLIVEIRA, R. M. Dimensionamento e construção de filtros industriais: aspectos estruturais e hidráulicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 4, p. 789–798, 2021.

SILVA, R.; ALMEIDA, T. *Adsorção e Aplicações do Carvão Ativado no Tratamento de Água*. São Paulo: Editora Ambiental, 2021.

SILVA, R.; ALMEIDA, T. *Gestão de Água Residual na Indústria e Impactos Ambientais no Ceará*. Fortaleza: Editora Sustentável, 2022.

SOUZA, L.; PEREIRA, M. *Produção de Carvão Ativado a Partir de Biomassa Residual*. Curitiba: Editora Sustentável, 2020.

SOUZA, M. *Carvão Ativado de Biomassa: Propriedades e Aplicações no Tratamento de Água*. Curitiba: Editora Sustentável, 2022.

SOUZA, V. C.; PEREIRA, A. N.; BARROS, E. C. Prototipagem e escalonamento de sistemas de filtração de água: da bancada à indústria. *Journal of Environmental*

Technology, v. 11, n. 2, p. 132–141, 2019.

SOUZA, V. C.; PEREIRA, A. N. Produção sustentável de carvão ativado a partir de borra de café e aplicação em tratamento de água. *Journal of Environmental Technology*, v. 11, n. 2, p. 132–141, 2020.

VENGOSH, A. Quanta água o fracking realmente consome nos EUA? *Duke Today*, 2015. Disponível em: <https://today.duke.edu/2015/09/frackfoot>.

WOLLIN, K. M. et al. Avaliação crítica dos riscos à saúde humana devido ao fraturamento hidráulico na produção de gás natural e petróleo. *Archives of Toxicology*, v. 94, n. 4, p. 967–1016, 2020. DOI: 10.1007/s00204-020-02758-7.