

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICADO À DESFLUORETAÇÃO VIA ADSORÇÃO EM LEITO FIXO DE ALUMINA ATIVADA CONVENCIONAL GRANULAR

João Gabriel Munareto do Amaral - eng.joaogabriel@hotmail.com – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Nátalie de Paula - eng.nataliedepaula@gmail.com - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Angélica Arndt Scalabrin - angelicaascalabrin@gmail.com - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Maria Luiza Machado - marialuizamachado@gmail.com - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Elvis Carissimi - elvis.carissimi@ufsm.br - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)

Resumo: A contaminação de águas subterrâneas por íons fluoreto exige tecnologias eficientes de tratamento, destacando-se a adsorção em leito fixo. Este trabalho avalia o desempenho da alumina ativada granular convencional na desfluoretação contínua, utilizando um Delineamento Composto Central para otimizar as condições operacionais. Ensaios foram conduzidos em uma coluna de borossilicato sob fluxo ascendente com pH 8,0, variando a vazão volumétrica (3 a 9 mL/min) e a concentração inicial do contaminante (5 a 10 mg/L). A dinâmica do processo foi monitorada por cromatografia iônica até a saturação do leito. Os resultados demonstram que ambos os fatores exercem impacto negativo e significativo na capacidade adsortiva. O modelo preditivo, validado estatisticamente, indica que a elevação da vazão reduz o tempo de contato interfacial e provoca a ruptura prematura do leito devido a severas limitações cinéticas intrapartícula. A condição ótima de operação ocorreu nos níveis inferiores (3 mL/min e 5 mg/L), atingindo capacidade máxima de 1,30 mg/g. Conclui-se que a forma granular convencional apresenta restrições difusionais severas para operações de alto fluxo, exigindo a adoção de materiais modificados para viabilizar o dimensionamento eficiente em estações de tratamento reais.

Palavras-chave: Fluoreto; Adsorção; Leito fixo; Alumina ativada; Planejamento experimental.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

EXPERIMENTAL DESIGN APPLIED TO DEFLUORIDATION VIA FIXED-BED ADSORPTION USING CONVENTIONAL GRANULAR ACTIVATED ALUMINA

Abstract: Groundwater contamination by fluoride ions requires efficient treatment technologies, among which fixed-bed adsorption stands out. This study evaluates the performance of conventional granular activated alumina in continuous defluoridation using a Central Composite Design to optimize operational conditions. Assays were conducted in a borosilicate column under an upward flow at pH 8.0, varying the volumetric flow rate (3 to 9 mL/min) and the initial contaminant concentration (5 to 10 mg/L). The dynamic process was monitored by ion chromatography until bed saturation. The results demonstrate that both factors exert a negative and significant impact on adsorptive capacity. The statistically validated predictive model indicates that increasing the flow rate reduces the interfacial contact time and causes premature bed breakthrough due to severe intraparticle kinetic limitations. The optimal operating condition occurred at the lower levels (3 mL/min and 5 mg/L), reaching a maximum capacity of 1.30 mg/g. It is concluded that the conventional granular form presents severe diffusional restrictions for high-flow operations, requiring the adoption of modified materials to enable efficient scaling in real treatment plants.

Keywords: Fluoride; Adsorption; Fixed bed; Activated alumina; Experimental design.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e para a manutenção dos ecossistemas, e sua qualidade é determinante para a saúde humana e ambiental (Edmunds; Smedley, 2013; Fawell, 2013; Laeson; Lu; Huang, 2021). No Brasil, até 2022, 84,9% da população era atendida por redes públicas de abastecimento, enquanto cerca de 30,6 milhões de pessoas dependiam de fontes alternativas, como poços tubulares, para suprir suas necessidades hídricas (IBGE, 2023; SNIS, 2022). Embora essenciais para o abastecimento, essas fontes subterrâneas podem conter contaminantes naturais e antrópicos, incluindo ferro, manganês, arsênio e fluoreto (F^-) (De et al., 2022; Faqui et al., 2024).

O íon F^- atua como um micronutriente importante na prevenção da cárie dentária, mas sua presença em concentrações elevadas na água potável acarreta sérios riscos à saúde, causando anomalias como a fluorose dentária e esquelética (Ahmad Dar; Kurella, 2023; Fawell, 2013; O'Mullane et al., 2016). Por ser inodoro e insípido, o contaminante permanece indetectável em águas subterrâneas não monitoradas, o que dificulta o controle de qualidade. A ampla distribuição ambiental facilita o acúmulo desse íon no solo, no ar, na vegetação e nos organismos vivos (Sivasankar et al., 2023; Wu et al., 2022). Como resposta a esse risco, a Organização Mundial da Saúde (OMS) estabelece um limite de 1,5 mg/L para a água potável, uma vez que concentrações entre 2,0 e 5,0 mg/L são suficientes para induzir o estágio inicial da fluorose dentária (Solanki et al., 2022).

Para mitigar os impactos da contaminação por F^- , diversas tecnologias têm sido desenvolvidas para sua remoção da água, incluindo métodos convencionais, como precipitação

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

química (Chen; Deng; Luo, 2025; Dey *et al.*, 2025; Gao, Zhipeng *et al.*, 2025), coagulação (Deng *et al.*, 2025; Gan *et al.*, 2025; Liang *et al.*, 2025) e filtração por membranas (Arab; Derakhshani; Sayadi, 2024a; Gao, Ming *et al.*, 2025; Wei *et al.*, 2024), além de abordagens inovadoras, como processos eletroquímicos (Thamarai *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024) e adsorção com materiais modificados (da Silva *et al.*, 2024; de Paula *et al.*, 2023; Sanini *et al.*, 2022). Dentre as alternativas viáveis, destaca-se a adsorção devido à sua eficiência, simplicidade operacional e potencial de reaproveitamento dos materiais. Nesse contexto, o uso de sistemas de adsorção em fluxo contínuo, em especial colunas de leito fixo, representa uma estratégia promissora para aplicação em larga escala, permitindo avaliar seu desempenho sob condições próximas à realidade industrial (Al-Raad; Hanafiah, 2021; Arab; Derakhshani; Sayadi, 2024b).

A alumina ativada (AA) consolida-se como um dos adsorventes mais empregados na desfluoretação, justificado por sua elevada área superficial específica, estrutura porosa e afinidade iônica (Yu *et al.*, 2023). O mecanismo adsorativo é governado pela troca iônica entre os grupos hidroxila superficiais e o F^- , apresentando desempenho otimizado em meio ácido, com pH inferior a 6,0 (de Paula *et al.*, 2023). Contudo, essa restrição de pH compromete a viabilidade técnica para o tratamento de águas subterrâneas com perfis neutros ou alcalinos. Além de sua baixa capacidade de retenção nestas faixas de pH, a AA convencional exibe restrições cinéticas e dificuldades de regeneração estrutural (Gong *et al.*, 2012; Kumari *et al.*, 2020). Diante desse cenário, o presente trabalho aplica técnicas de planejamento experimental para modelar e otimizar o desempenho de alumina ativada convencional granular em colunas de leito fixo. O objetivo central é maximizar a capacidade de adsorção do sistema, quantificando o impacto direto e as interações operacionais entre a vazão volumétrica de alimentação e a concentração inicial de F^- .

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Condições experimentais

Todos os ensaios e análises foram conduzidos nas instalações do Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA), localizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em Santa Maria/RS. Além disso, o F^- foi determinado por cromatografia iônica (Metrohm 930 Compact IC Flex) utilizando uma coluna Metrosep A Supp 5-150/4.0 e pré-coluna Metrosep A Supp 5 Guard. As amostras foram filtradas em membrana de nylon (0,45 μm). Os padrões foram preparados a partir de solução multi-ânion de 1000 mg L^{-1} (SpecSol).

2.2. Sistema de adsorção em leito fixo

Os experimentos em leito fixo foram realizados com o objetivo de avaliar e comparar o desempenho de diferentes níveis de vazão e concentração inicial de F^- com a alumina ativada granular da marca Celta Brasil, um dos materiais mais utilizados para este fim. Conforme esquematizado na Figura 1, para a condução desses ensaios, utilizou-se 2 g de alumina ativada granular em uma coluna de borossilicato com 14 cm de altura e 1 cm de diâmetro interno, acoplada a uma bomba peristáltica que assegurou o fluxo ascendente da solução, iniciando no “béquer 1”, passando através do material

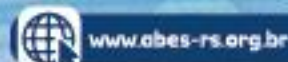
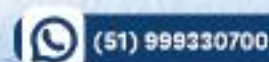
Realização



Correalizadores

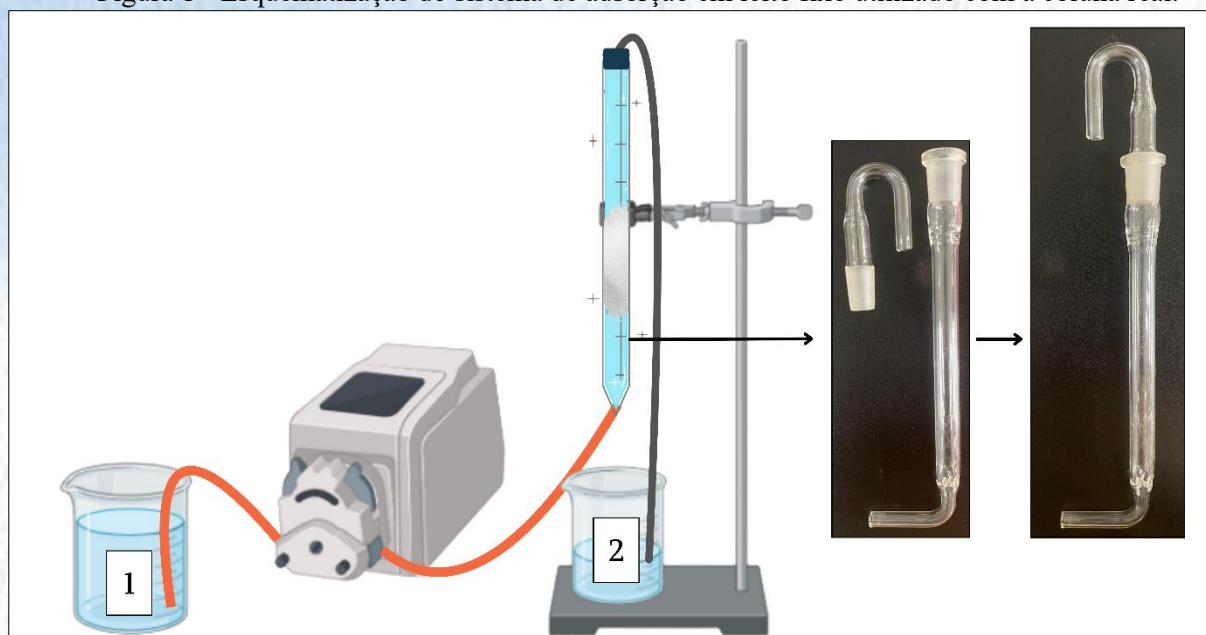


Apoio Institucional



adsorvente, acondicionado entre camadas de esferas e lã de vidro para evitar o arraste do material, e finalizando no “béquer 2”. As amostras do efluente coletadas em intervalos regulares (30 em 30 minutos) até a completa saturação do meio e submetidas à análise por cromatografia iônica

Figura 1 - Esquematização do sistema de adsorção em leito fixo utilizado com a coluna real.



A dinâmica de adsorção foi representada por curvas de ruptura, definindo-se o tempo de saturação quando a concentração final fosse equivalente a 90% da concentração inicial, caracterizando uma fase de saturação avançada. A partir dessas curvas, com auxílio do software OriginPro, foram plotadas as curvas relacionando a concentração final sobre a inicial pelo tempo, e calculadas as áreas sobre a curva até a exaustão. Após isso, calcularam-se as massas de soluto retidas em mg, (m_{retida} , Equação 01), a capacidade de adsorção da coluna em mg/g, (q , Equação 02), a carga de adsorbato fornecida em mg (W_{total} , Equação 03) e a eficiência global de remoção em % (E , Equação 04) para as áreas de ruptura e saturação.

$$m_{\text{retida}} = \frac{C_o \cdot Q \cdot A}{1000} \quad (1)$$

$$q = \frac{m_{\text{retida}}}{m_{\text{adsorvente}}} \quad (2)$$

$$W_{\text{total}} = \frac{C_o \cdot Q \cdot t \cdot F}{1000} \quad (3)$$

$$E = \frac{m_{\text{retida}}}{W_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (4)$$

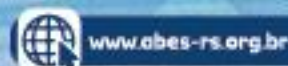
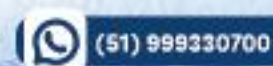
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



Onde: “ C_0 ” é a concentração inicial de adsorbato (mg/L), “ Q ” é a vazão volumétrica (mL/min), “ A ” é a área sob a curva (min), “ $m_{\text{adsorvente}}$ ” é a massa de adsorvente na coluna, “ t ” é o tempo de operação (min) e “ F ” é o fator de ruptura ou exaustão experimental (0,9 para exaustão).

2.3. Planejamento experimental

Para avaliar a vazão da bomba e a concentração inicial de F^- , foi utilizado um planejamento experimental do tipo delineamento composto central (DCC). O sistema operou sob um pH 8, mimetizando as condições de águas subterrâneas naturais da região central do Rio Grande do Sul (Luiz; Silva, 2017). A vazão foi definida em uma faixa de 3 a 9 mL/min e a concentração inicial de F^- entre 5 a 10 mg/L. A Equação 5 representa a definição do número de ensaios (p) através do número de variáveis independentes (k), substituindo na equação o número 2 de variáveis independentes, obtém-se 7 ensaios. A Tabela 1 apresenta a matriz de planejamento experimental codificado do DCC com valores reais.

$$p = 2^k + 3 \quad (5)$$

Tabela 1 - Matriz de planejamento experimental do DCC.

Ensaio	Vazão (X_1 , mL/min)	Concentração inicial de F^- (X_2 , mg/L)
1	-1 (3)	-1 (5)
2	1 (9)	-1 (5)
3	-1 (3)	1 (10)
4	1 (9)	1 (10)
5	0 (6)	0 (7,5)
6	0 (6)	0 (7,5)
7	0 (6)	0 (7,5)

3. RESULTADOS

A dinâmica de adsorção em leito fixo foi avaliada inicialmente pelo formato das curvas de ruptura ilustradas na Figura 2. Observa-se que a relação entre a concentração efluente e afluente (C_e/C_0) atinge valores superiores a 0,4 logo nos primeiros minutos de operação para a maioria dos ensaios. Esse avanço acelerado da zona de transferência de massa evidencia as limitações cinéticas intrínsecas da alumina ativada granular comercial.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700

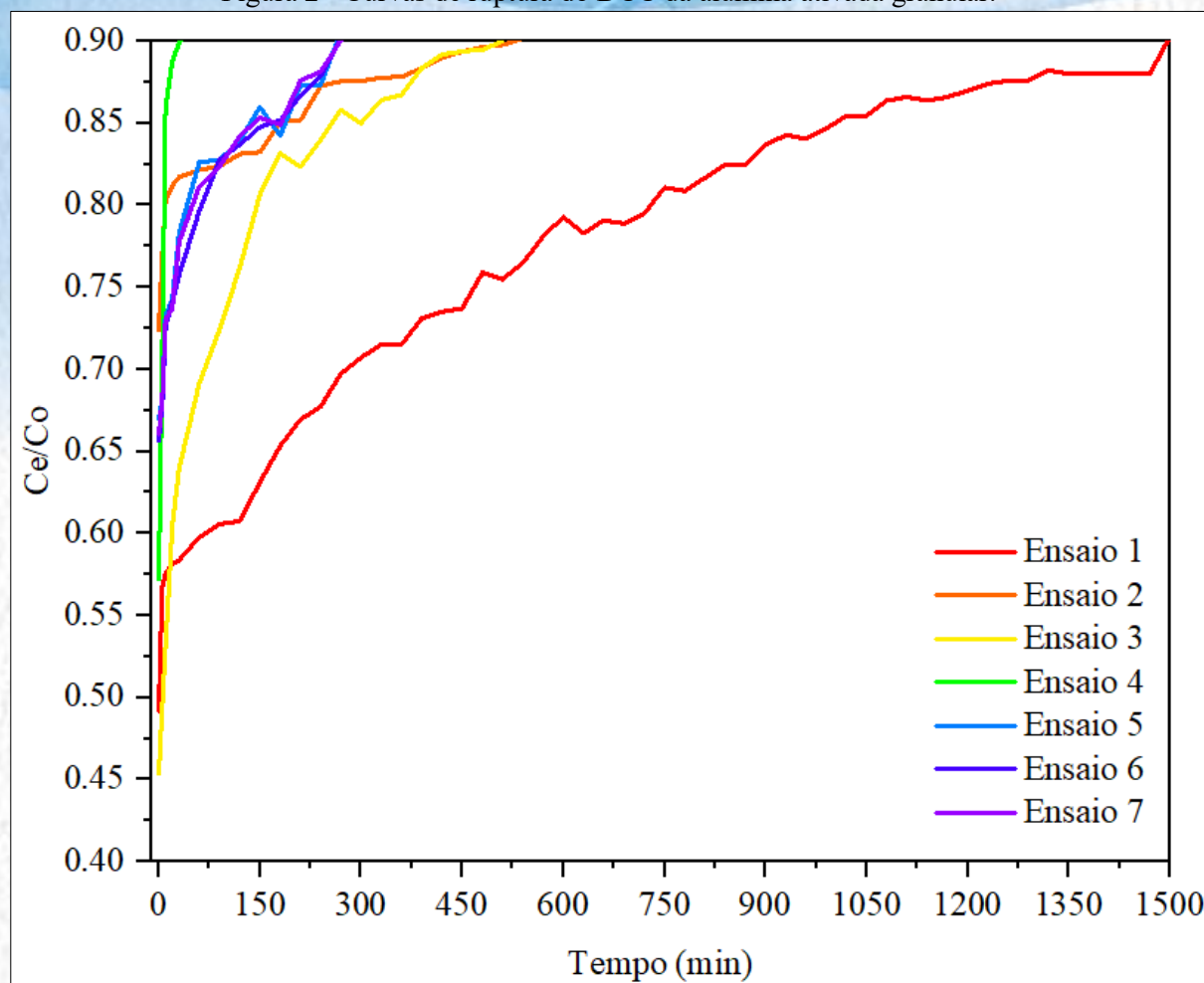


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 2 - Curvas de ruptura do DCC da alumina ativada granular.



A Tabela 2 consolida os parâmetros matemáticos extraídos a partir da integração da área sob as curvas de ruptura mapeadas na Figura 2. Esses dados descrevem a dinâmica do leito fixo sob diferentes condições de vazão volumétrica (X_1) e concentração inicial de F^- (X_2). As medições contínuas do tempo de exaustão e a integração da área sob a curva de ruptura forneceram a base para a quantificação do desempenho do sistema. A aplicação das equações fundamentais de adsorção em fluxo contínuo permitiu determinar a massa de soluto retida (m_{retida}), a capacidade de adsorção da coluna (q), a carga de adsorbato fornecida (W_{total}) e a eficiência global de remoção para cada um dos ensaios propostos (E). Posteriormente, foi realizada a modelagem do sistema a partir da capacidade de adsorção da coluna.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Tabela 2 - Dados experimentais e resultados obtidos através dos cálculos propostos.

Ensaio	X ₁ (mL/min)	X ₂ (mg/L)	t (min)	A (min)	m _{retida} (mg)	q (mg/g)	W _{total} (mg)	E (%)
1	3	5	1497	173,92	2,61	1,30	22,46	11,62
2	9	5	527	20,78	0,94	0,47	23,72	3,94
3	3	10	510	44,60	1,34	0,67	15,30	8,75
4	9	10	32	2,46	0,22	0,11	2,88	7,69
5	6	7,5	290	17,51	0,79	0,39	13,05	6,04
6	6	7,5	296	19,26	0,87	0,43	13,32	6,51
7	6	7,5	299	19,38	0,87	0,44	13,46	6,48

Análise de Variância (ANOVA), apresentada nas Tabelas 3 e 4, atestou a qualidade do modelo preditivo para descrever o fenômeno adsorptivo. A validade estatística da equação linear gerada foi assegurada pelo valor do F calculado para a regressão (9,20), que superou o limite tabelado referencial (5,05). A precisão do ajuste matemático é corroborada pelo coeficiente de determinação (R²) de 90,2%, confirmando que a superfície de resposta gerada traduz de forma fidedigna o comportamento hidrodinâmico do leito de alumina.

Tabela 3 - Matriz ANOVA para os fatores operacionais vazão (X₁) e concentração inicial de F- (X₂).

Fatores	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p
X ₁	0,486611	1	0,486611	17,87361	0,024206
X ₂	0,246140	1	0,246140	9,04092	0,057357
X ₁ X ₂	0,019398	1	0,019398	0,71249	0,460610
Erro	0,081675	3	0,027225	-	-
Total	0,833824	6	-	-	-

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

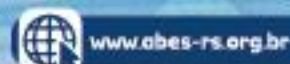
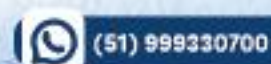


Tabela 4 - Comparação entre F_{cal} e F_{tab} para a validação global das equações preditivas.

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	F_{tab}
Regressão	0,752	3	0,250716333	9,209048056	5,0503
Resíduos	0,082	3	0,027225	-	-
Total	0,834	6	-	-	-

Os parâmetros estatísticos e os coeficientes de regressão detalhados na Tabela 5 demonstram que a vazão da bomba e a concentração inicial de contaminante exercem impacto negativo e estatisticamente significativo ($p < 0,10$) na eficiência operacional da coluna. A Equação 6 obtida através destes valores confirmou essa relação linear decrescente. O termo de interação entre as variáveis independentes não apresentou significância isolada, indicando que o processo é governado pela influência restritiva direta e individual de cada fator limitante. O diagrama de Pareto (Figura 3) ilustra graficamente essa hierarquia de efeitos, destacando a vazão como a variável de maior impacto restritivo no delineamento ($t = -4,22$), seguida pela carga inicial do poluente ($t = -3,00$).

Tabela 5 - Coeficientes de regressão, erros padrão e análise de significância estatística para os modelos quadráticos de remoção de F^- .

Fator	Coeficiente de regressão	Erro padrão	t(5)	p	Intervalos estimados (90%)	
					Limite inferior (90%)	Limite superior (90%)
Média	0,545004	0,062364	8,73904	0,003155	0,398238	0,691769
X_1	-0,348788	0,082500	-4,22772	0,024206	-0,542940	-0,154635
X_2	-0,248063	0,082500	-3,00681	0,057357	-0,442215	-0,053910
X_1X_2	0,069637	0,082500	0,84409	0,460610	-0,124515	0,263790

$$q \text{ (mg/g)} = 0,54 - 0,35.X_1 + 0,25.X_2 + 0,07.X_1.X_2 \quad (6)$$

Realização



Correalizadores



Apoio Institucional

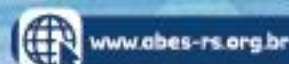
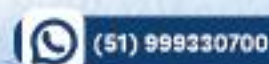
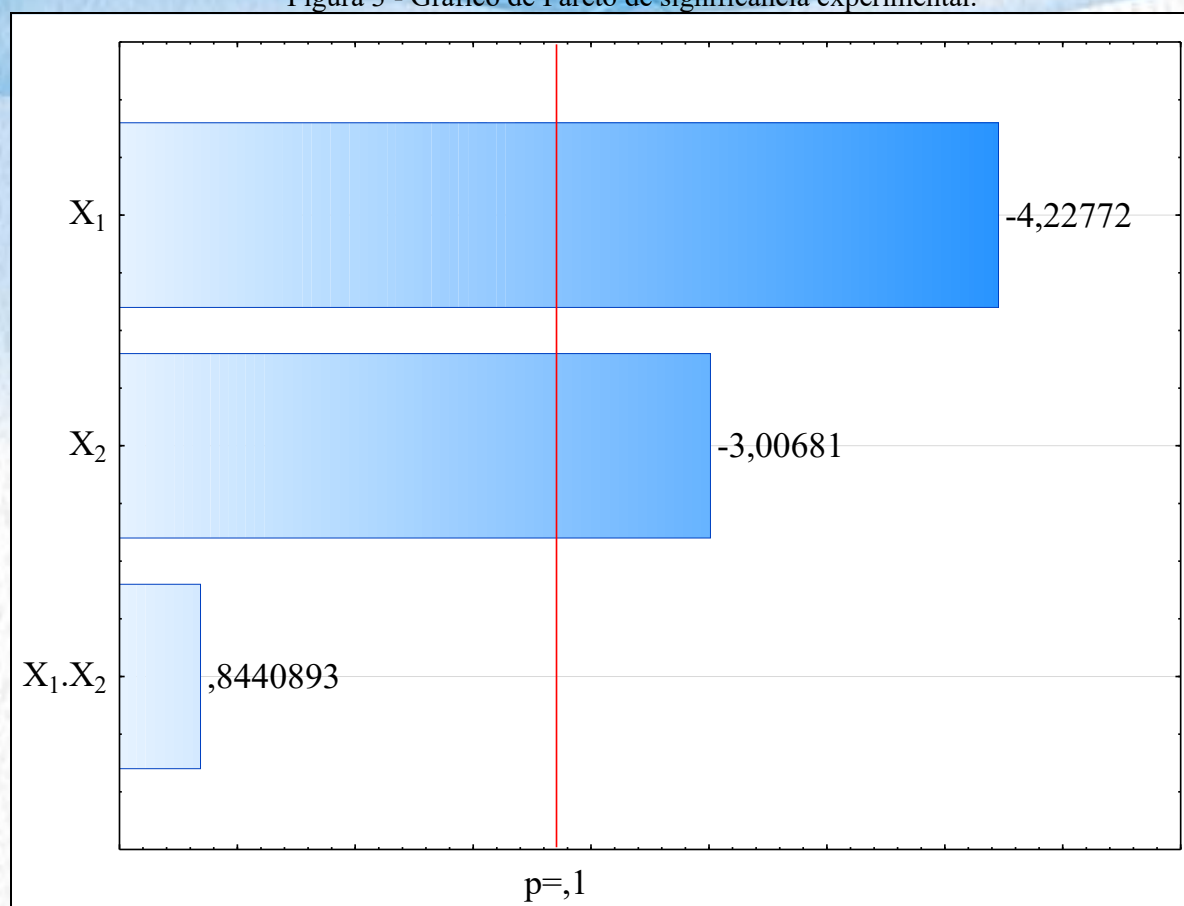


Figura 3 - Gráfico de Pareto de significância experimental.



A análise geométrica das superfícies de resposta e dos gráficos de contorno gerados pelo modelo matemático permite aprofundar a compreensão sobre as regiões de máxima eficiência e a sensibilidade do sistema de leito fixo às alterações nas variáveis independentes. Como o modelo ajustado é predominantemente linear dentro do domínio experimental investigado, as representações tridimensionais se configuram como planos inclinados, cuja inclinação máxima indica a direção do gradiente de otimização do processo de desfluoretação.

A interpretação destes parâmetros, associada aos gráficos de contorno e superfície (Figuras 4 e 5), revela uma dependência do processo de descontaminação em relação ao tempo de contato interfacial. O incremento da vazão volumétrica reduz o tempo de residência da fase líquida no interior da coluna. Sob elevada velocidade intersticial, os íons F^- enfrentam severas restrições cinéticas para transpor a resistência difusional da camada limite e acessar os macroporos da alumina ativada granular, o que provoca a ruptura prematura da coluna. O Ensaio 4 documentou o cenário hidrodinâmico mais crítico (vazão de 9 mL/min e concentração de 10 mg/L), exaurindo a coluna em

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



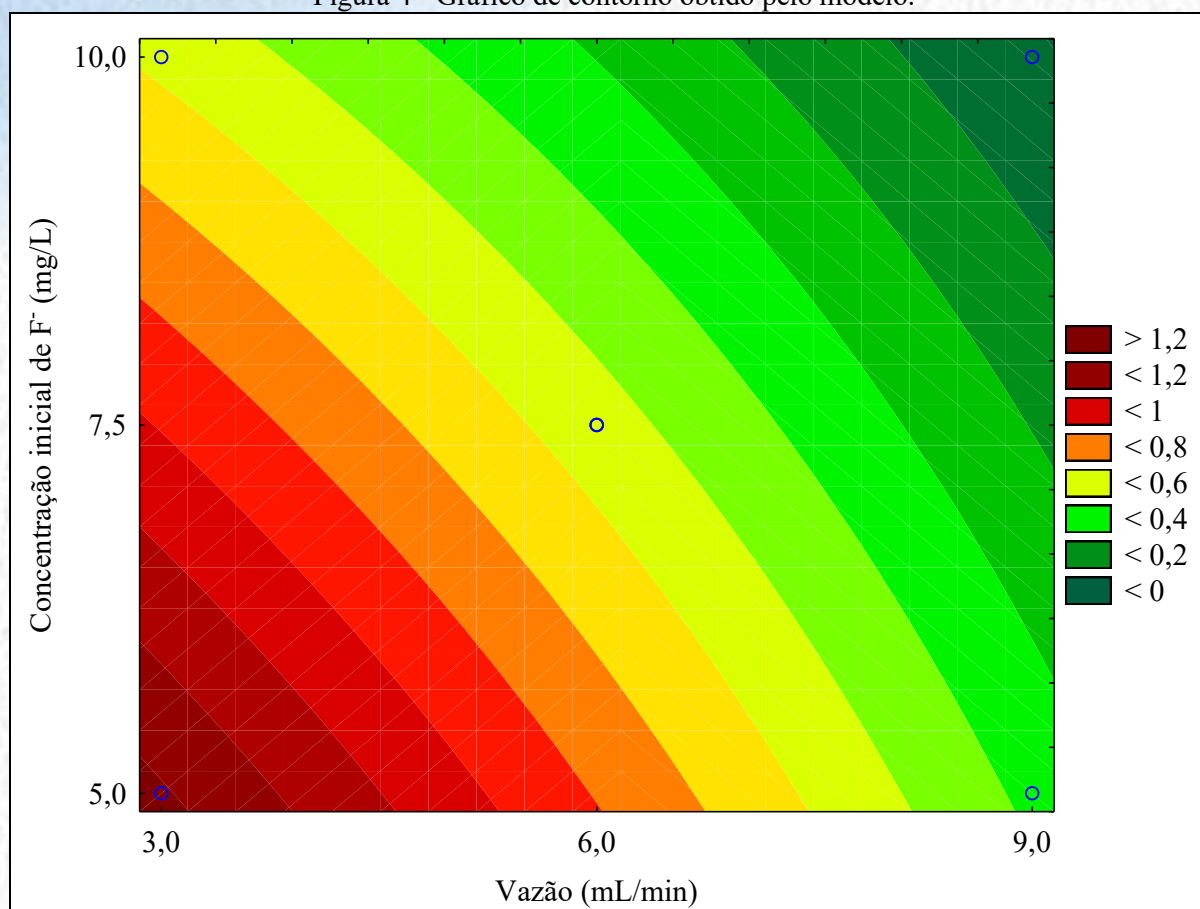
abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

apenas 32 minutos operacionais e registrando a menor capacidade adsortiva do estudo (0,11 mg/g). Para maximizar o desempenho, as condições ótimas registraram-se na manutenção dos níveis inferiores em ambos os fatores testados (Ensaio 1, com 3 mL/min e 5 mg/L), prolongando a vida útil do leito para 1497 minutos e alcançando a maior estabilidade de operação documentada na matriz experimental (1,30 mg/g).

Figura 4 - Gráfico de contorno obtido pelo modelo.



Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



PUCCRS



(51) 999330700

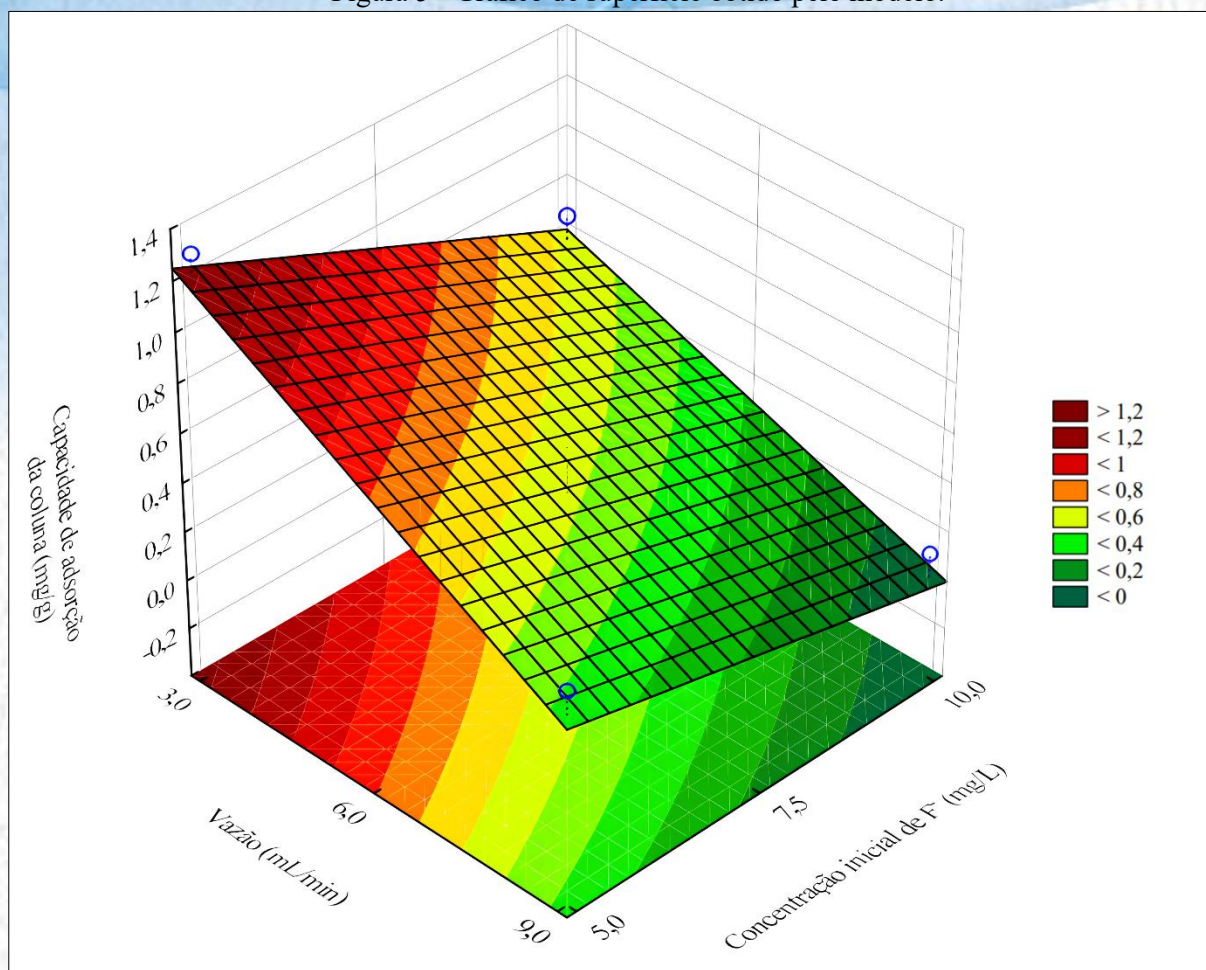


abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Figura 5 - Gráfico de superfície obtido pelo modelo.



4. CONCLUSÃO

O delineamento experimental evidenciou que a eficiência da desfluoretação contínua é severamente restringida pela hidrodinâmica do sistema. Os dados indicam que a alumina ativada granular convencional apresenta fortes limitações para atuar como o adsorvente ideal em operações de leito fixo, uma vez que a sua elevada resistência à difusão intrapartícula impõe a necessidade de tempos de contato excessivamente prolongados. A exigência de operar sob baixas vazões para contornar essa barreira cinética compromete a viabilidade do processo em escala real, cenário no qual o tratamento ágil de grandes volumes de água é um requisito fundamental.

Para solucionar essa problemática, a adoção de materiais adsorventes modificados desponta como a via tecnológica mais indicada. A aplicação de tratamentos superficiais ou a alteração

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

estrutural do material, atua diretamente na melhoria da cinética de adsorção. Essas intervenções aceleram a transferência de massa e maximizam o aproveitamento dos sítios ativos, permitindo que a coluna retenha o contaminante de maneira eficiente mesmo com tempos de contato reduzidos. Essa abordagem confere maior resiliência ao leito fixo e viabiliza a transição da tecnologia para o dimensionamento de estações de tratamento industriais.

REFERÊNCIAS

AHMAD DAR, Firdous; KURELLA, Swamy. Fluoride in drinking water: An in-depth analysis of its prevalence, health effects, advances in detection and treatment. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 2023.

AL-RAAD, Abbas A.; HANAFIAH, Marlia M. Removal of inorganic pollutants using electrocoagulation technology: A review of emerging applications and mechanisms. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], vol. 300, p. 113696, 2021.

ARAB, Negar; DERAKHSHANI, Reza; SAYADI, Mohammad Hossein. Approaches for the Efficient Removal of Fluoride from Groundwater: A Comprehensive Review. **Toxics**, [s. l.], vol. 12, nº 5, p. 306, 2024a.

ARAB, Negar; DERAKHSHANI, Reza; SAYADI, Mohammad Hossein. Approaches for the Efficient Removal of Fluoride from Groundwater: A Comprehensive Review. **Toxics**, [s. l.], vol. 12, nº 5, p. 306, 2024b.

BRASIL. Inspeção Sanitária em Abastecimento de Água. **Ministério da Saúde**: Brasília, DF, p. 1–86, 2006.

CHEN, Qingchuan; DENG, Jian; LUO, Guangsheng. Highly selective removal of fluorine from wastewater containing phosphorus and fluorine in a microreaction system. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], vol. 358, p. 130255, 2025.

DA SILVA, Layanne Rodrigues *et al.* Application of Photo-Fenton oxidative process followed by adsorption in dairy effluents treatment. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], vol. 68, p. 106365, 2024.

DE, Ayan *et al.* Distribution, prevalence and health risk assessment of fluoride and arsenic in groundwater from lower Gangetic plain in West Bengal, India. **Groundwater for Sustainable Development**, [s. l.], vol. 16, p. 100722, 2022.

DE PAULA, Nátalie *et al.* Application of ozone to enhance the defluoridation property of activated alumina: A novel approach. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], vol. 11, nº 5, p. 110384, 2023.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

DENG, Ziniu *et al.* Effects of Chelators on Fluoride Removal by AlCl_3 and Al_{13} Coagulation: Performance and Mechanism. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], vol. 59, nº 6, p. 3297–3308, 2025.

DEY, Subhashish *et al.* Eliminations of sulphur and fluoride from contaminated water by the applications of various types of biosorbents materials. **Water-Energy Nexus**, [s. l.], vol. 8, p. 73–92, 2025.

EDMUNDS, W. Mike; SMEDLEY, Pauline L. Fluoride in Natural Waters. *In*: ESSENTIALS OF MEDICAL GEOLOGY. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 311–336.

FAQUI, Demis Pessatto *et al.* Water quality and sustainable solutions for drinking water supply in the Taquari-Antas watershed, RS, Brazil. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], vol. 19, p. 1–12, 2024.

FAWELL, John. Fluoride in Drinking-water. **Water Intelligence Online**, [s. l.], vol. 12, 2013.

GAN, Yonghai *et al.* Simultaneous deep purification of fluoride and trivalent arsenic by a bimetallic composite xerogel coagulant. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], vol. 362, p. 131779, 2025.

GAO, Ming *et al.* Elucidating the efficacious capacitive deionization defluorination behaviors of heteroatom-doped hierarchical porous carbon nanofibers membrane. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], vol. 359, p. 130803, 2025.

GAO, Zhipeng *et al.* Removal and recovery of fluoride from wastewater via mixed calcium salts by fluidized bed induced crystallization technology. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], vol. 362, p. 131773, 2025.

GONG, Wen-Xin *et al.* Adsorption of fluoride onto different types of aluminas. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 189–190, p. 126–133, 2012.

IBGE. **Censo demográfico 2022**. Rio de Janeiro: [s. d.], 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. .

KUMARI, Usha *et al.* Calcium and zirconium modified acid activated alumina for adsorptive removal of fluoride: Performance evaluation, kinetics, isotherm, characterization and industrial wastewater treatment. **Advanced Powder Technology**, [s. l.], vol. 31, nº 5, p. 2045–2060, 2020.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

LACSON, Carl Francis Z.; LU, Ming Chun; HUANG, Yao Hui. **Fluoride-containing water: A global perspective and a pursuit to sustainable water defluoridation management -An overview.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2021.

LIANG, Yiyang *et al.* Broad-spectrum capture of hundreds of per- and polyfluoroalkyl substances from fluorochemical wastewater. **Nature Communications**, [s. l.], vol. 16, nº 1, p. 1972, 2025.

LUIZ, Thiago Boeno Patricio; SILVA, José Luiz Silvério da. CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS HIDROGEOQUÍMICOS EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SISTEMA AQUÍFERO SANTA MARIA, NA REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Ciência e Natura**, [s. l.], vol. 39, nº 2, p. 308, 2017.

O'MULLANE, D M *et al.* Fluoride and Oral Health. **Community dental health**, [s. l.], vol. 33, nº 2, p. 69–99, 2016.

SANINI, Bruna *et al.* Impregnation of activated alumina with CeO₂ for water defluoridation. **Materials Chemistry and Physics**, [s. l.], vol. 291, p. 126648, 2022.

SIVASANKAR, V. *et al.* Plaster board waste (PBW) – A potential fluoride leaching source in soil/water environments and, fluoride immobilization studies using soils. **Environmental Research**, [s. l.], vol. 218, p. 115005, 2023.

SNIS. **Diagnóstico Anual de Água e Esgoto.** [S. l.], 2022. Disponível em:
<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf>. .

SOLANKI, Yogendra Singh *et al.* **Fluoride occurrences, health problems, detection, and remediation methods for drinking water: A comprehensive review.** [S. l.]: Elsevier B.V., 2022.

THAMARAI, P. *et al.* Effective removal of fluoride ions from contaminated water using electrochemical techniques: A critical review on recent developments and environmental perspective. **Journal of Hazardous Materials Advances**, [s. l.], vol. 16, p. 100483, 2024.

WEI, Jian *et al.* Nanoconfinement regulation of La-Mg LDH/Ti₃C₂TX (T = O, OH) for effective removal of fluoride: Membrane fabrication and mechanism revelation. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 493, p. 152779, 2024.

WU, Shouyan *et al.* **Challenges of fluoride pollution in environment: Mechanisms and pathological significance of toxicity – A review.** [S. l.]: Elsevier Ltd, 2022.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br



13º Simpósio
Internacional de
Qualidade Ambiental

Tecnologias Ambientais e Inovação

23, 24 e 25 de setembro de 2026

XU, Zikang *et al.* Unveiling the kinetic predominance of fluoride electrosorption at S-modified defect-rich interface: Microscale disordered reconstruction induced accessible synergistic platform.

Chemical Engineering Journal, [s. l.], vol. 502, p. 157964, 2024.

YU, Chenglong *et al.* Fluoride removal performance of highly porous activated alumina. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, [s. l.], vol. 106, n° 2, p. 471–479, 2023.

Realização



Apoio Institucional



REBOB
Rede Brasileira de
Resíduos e Resíduos

Correalizadores



PUCRS



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br