AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DE ADSORÇÃO DE CRISTAL VIOLETA PELO COMPÓSITO DE ALGINATO/QUARTZITO (CaAQ)

Manuela Moura Amorim[1], Amanda Vargas dos Passos[1], Joyce de Almeida Carminati[1], Lucas Destefani Paquini[2], Demetrius Profeti[1], Luciene Paula Roberto Profeti[1].

[1]Universidade Federal do Espírito Santo. Alto Universitário s/n – Guararema, 29500-000, Alegre, Espírito Santo, Brasil, manuamorim94@gmail.com, amandavargas516@gmail.com, joyceacarminati@gmail.com, demetrius.profeti@ufes.br, luciene.profeti@ufes.br.
[2]Universidade de São Paulo/, Avenida Trabalhador São Carlense, 400, Parque Arnold Schimidt – 13566-590 - São Carlos-SP, Brasil, lucasdestefanip@hotmail.

Resumo
A remoção de corantes de águas residuais por adsorção tem incentivado a busca por materiais alternativos e de baixo custo. Neste trabalho, avaliou-se o comportamento do compósito de alginato de cálcio e quartzito (CaAQ) na adsorção de cristal violeta (CV), visando atestar a afinidade entre adsorvente e adsorvato e estabelecer as condições iniciais para estudos posteriores. Foram investigados os efeitos do pH, da massa de adsorvente, da concentração inicial e do tempo de contato sobre a remoção e a capacidade de adsorção. A eficiência na remoção variou discretamente entre pH 3 e 10, portanto, o valor de pH selecionado para a condução dos demais experimentos foi 6,0. Em relação as massas de adsorvente investigadas, a de 0,025 g proporcionou 74,08% de remoção e capacidade de adsorção de 61,52 mg g^{-1}, sendo está a massa de adsorvente selecionada para realizar os experimentos subsequentes. Em relação ao estudo de concentração inicial de corante, a concentração de aproximadamente 200 mg L^{-1} foi selecionada por levar à obtenção dos valores de 73,75% de remoção e 58,41 mg g^{-1}, enquanto o estudo do tempo de contato indicou aproximação ao equilíbrio a partir de 120 min. Os resultados evidenciaram o potencial do CaAQ como material adsorvente para a remoção de CV em meio aquoso e auxiliaram no estabelecimento das condições de referência para a continuidade dos estudos.
Palavras-chave: Tratamento de águas. Corante. Resíduo mineral. Biopolímero. Material adsorvente.
Área do Conhecimento: Engenharias. Engenharia Química.

Introdução

A presença de corantes em águas residuais constitui um problema associado a diferentes atividades industriais, uma vez que essas substâncias podem permanecer no ambiente aquático e comprometer a qualidade da água. Entre esses compostos, o corante cristal violeta (CV) merece atenção devido à sua elevada estabilidade química e resistência à biodegradação, características que favorecem sua persistência em ambientes aquáticos (Pandey *et al.*, 2026; Sharma *et al.*, 2026). Além disso, a presença de corantes pode limitar a penetração de luz na água e, consequentemente, interferir nos processos fotossintéticos dos organismos aquáticos (Sharma *et al.*, 2026).

O processo de adsorção pode ser influenciado pelas propriedades do adsorvente, pelas características do adsorvato e pelas condições experimentais empregadas. Entre os fatores avaliados estão o pH da solução, a massa de adsorvente, a concentração inicial e o tempo de contato, os quais podem modificar a eficiência de remoção e a capacidade de adsorção (Onuk; Isik, 2025; Saidi et al., 2025). A avaliação dessas variáveis permite determinar condições experimentais adequadas para o estudo do processo de adsorção.

A busca por materiais adsorventes provenientes de fontes renováveis ou de resíduos industriais tem ampliado as possibilidades de aplicação da adsorção no tratamento de águas. Entre esses materiais, o alginato apresenta grupos funcionais capazes de interagir com espécies químicas em solução e pode ser reticulado na presença de íons Ca^{2+}, formando estruturas tridimensionais estáveis (Georgin *et al.*, 2026). O quartzito, por sua vez, é uma rocha metamórfica rica em sílica e pode ser obtido como resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, apresentando potencial de reaproveitamento na obtenção de materiais adsorventes (Figueiredo; Dotto; Foletto, 2026). A combinação desses componentes originou o compósito CaAQ, investigado neste estudo como material adsorvente para a remoção de CV.

A avaliação dessas condições contribui para a definição dos parâmetros experimentais empregados no estudo do processo de adsorção (Saidi *et al.*, 2025). Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar as condições iniciais de adsorção de CV pelo compósito CaAQ, analisando os efeitos do pH, da massa de adsorvente, da concentração inicial e do tempo de contato sobre a remoção e a capacidade de adsorção.

Metodologia

O quartzito, proveniente de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais em Cachoeiro de Itapemirim (ES), foi lavado, seco e submetido a tratamento alcalino com NaOH 25% (m/V) por 72 h. O compósito CaAQ foi sintetizado pela incorporação de 8,0 g de quartzito tratado a uma solução de 3,20 g de alginato de sódio em 160 mL de água, seguida da adição da suspensão a 800 mL de solução contendo 16,01 g de $CaCl_2$. Após agitação, o material foi filtrado e lavado com água de osmose reversa.

O efeito do pH inicial sobre a adsorção de CV foi avaliado utilizando-se uma massa de 0,050 g do compósito CaAQ em 11 Erlenmeyers, identificados de acordo com o pH inicial da solução, que vaiou entre 2 e 12. Para o ajuste do pH, a quantidade adequada de soluções de HCl e NaOH foi adicionada a água de osmose reversa. A partir de uma solução estoque de CV (2000 mg L^{-1}), foram transferidos 2,5 mL para balões volumétricos de 25 mL, completando-se o volume com água ajustada ao pH correspondente de cada ensaio, obtendo-se soluções de trabalho na concentração de 200 mg L^{-1}. Em seguida, 10 mL de cada solução foram transferidos para os respectivos Erlenmeyers contendo o compósito.

A influência da massa do adsorvente foi avaliada utilizando-se massas de 0,010; 0,025; 0,050; 0,070; 0,100; 0,125; 0,150; 0,175; 0,200 e 0,225 g do compósito CaAQ, em contato com 10 mL de solução de CV a 200 mg L^{-1} e mantendo-se o pH definido a partir dos resultados do ensaio anterior.

A influência da concentração inicial de CV foi avaliada utilizando-se nove concentrações da solução de corante: 66, 132, 198, 264, 330, 396, 462, 528 e 594 mg L^{-1}, mantendo-se constantes as demais condições experimentais, incluindo a massa do adsorvente e o pH definidos a partir dos resultados dos ensaios anteriores.

Nos ensaios de influência do pH, da massa de adsorvente e da concentração inicial, os sistemas foram mantidos a 25 °C, sob agitação constante de 100 rpm, durante 24 h. Após o período de contato, as amostras foram filtradas com auxílio de seringas e as soluções obtidas foram analisadas por espectrofotometria UV-Vis para determinação das concentrações finais de CV.

O efeito do tempo de contato entre o adsorvato e o adsorvente foi avaliado nos tempos de 3, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180 e 300 min, mantendo-se constantes as demais condições experimentais previamente estabelecidas. Os ensaios foram conduzidos a 25 °C, sob agitação constante de 100 rpm, permitindo avaliar a evolução da adsorção em função do tempo e determinar o período necessário para que o sistema atingisse ou se aproximasse do equilíbrio.

A capacidade de adsorção foi calculada conforme a Equação 1:

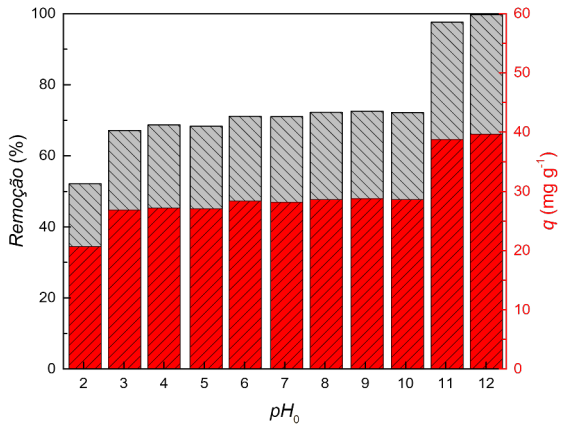
$$q = \frac{(C_i - C_f).V}{m} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Onde q (mg g^{-1}) corresponde à quantidade de corante adsorvida por unidade de massa; C_i e C_f (mg L^{-1}) são as concentrações iniciais e finais em solução, respectivamente; V (L) é o volume de solução e m (g) é a massa de adsorvente.

Resultados

A influência do pH inicial sobre a remoção e a capacidade de adsorção de CV pelo compósito CaAQ, após 24 h de contato, é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Efeito do pH na adsorção de CV pelo compósito CaAQ após 24 h de contato.

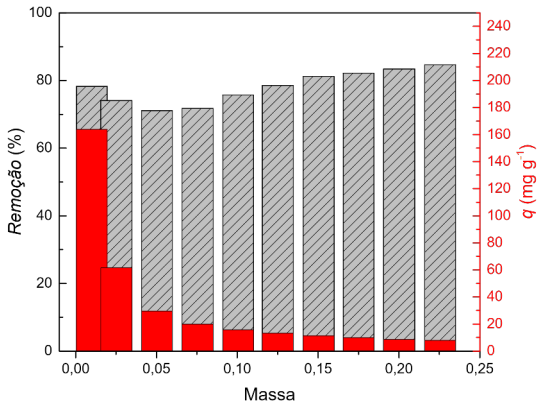


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A remoção variou entre 52,13% e 99,72% ao longo da faixa de pH avaliada. Entre os valores de pH 3 e 10, os resultados de remoção e capacidade de adsorção apresentaram variação discreta, enquanto alterações mais acentuadas foram observadas nos extremos da faixa avaliada. Considerando o comportamento obtido entre pH 3 e 10, o pH 6 foi selecionado para os ensaios subsequentes.

A Figura 2 mostra o efeito da massa de CaAQ sobre a remoção e a capacidade de adsorção de CV. Com o aumento da massa de adsorvente de 0,010 para 0,225 g, a remoção variou de 71,09% a 84,69%, enquanto a capacidade de adsorção apresentou redução de 163,83 para 7,86 mg g^{-1}.

Figura 2 – Desempenho do compósito CaAQ em diferentes massas de adsorvente na remoção de CV.

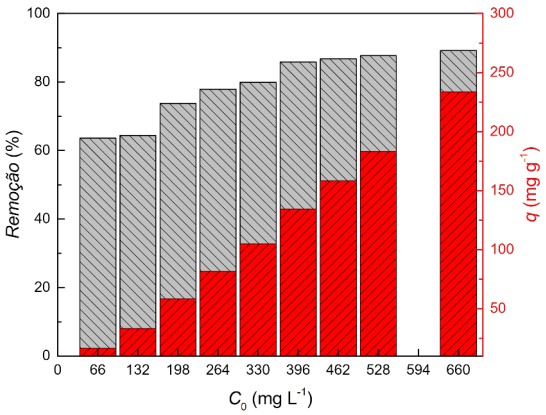


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Entre as condições avaliadas, a massa de 0,025 g apresentou 74,08% de remoção e capacidade de adsorção de 61,52 mg g^{-1}, sendo esta a massa selecionada para os ensaios seguintes por apresentar um balanço entre os dois parâmetros avaliados.

A influência da concentração inicial de CV sobre a remoção e a capacidade de adsorção do compósito CaAQ é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Remoção e capacidade de adsorção de CV pelo compósito CaAQ em diferentes concentrações iniciais.

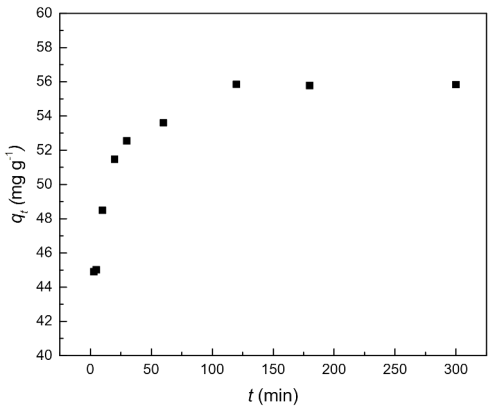


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As concentrações avaliadas variaram de 66 a 594 mg L^{-1}. Observou-se aumento da capacidade de adsorção com o incremento da concentração inicial, enquanto a remoção também apresentou tendência crescente ao longo da faixa estudada. Para a concentração de aproximadamente 200 mg L^{-1}, correspondente experimentalmente a 198 mg L^{-1}, foram obtidos 73,75% de remoção e capacidade de adsorção de 58,41 mg g^{-1}. A concentração de 200 mg L^{-1} foi selecionada para os ensaios subsequentes de avaliação do tempo de contato.

A Figura 4 apresenta a variação da capacidade de adsorção em função do tempo de contato.

Figura 4 – Capacidade de adsorção de CV pelo compósito CaAQ ao longo do tempo de contato.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nos primeiros minutos, verificou-se aumento da capacidade de adsorção, com valores próximos de 44 mg g^{-1} no início do ensaio e de aproximadamente 58 mg g^{-1} após 120 min. A partir desse período, os valores permaneceram praticamente constantes, indicando pouca variação da capacidade de adsorção até 300 min.

Discussão

O comportamento da adsorção de CV pelo compósito CaAQ foi influenciado pelas condições experimentais avaliadas. A variação do pH pode alterar a carga superficial do adsorvente e o estado de protonação dos grupos funcionais presentes no compósito, modificando as interações entre a superfície e as espécies de CV em solução. Como o corante apresenta caráter catiônico, a presença de sítios com carga negativa pode favorecer sua interação com a superfície do adsorvente. Comportamento semelhante foi relatado por Najafi *et al.* (2021) na adsorção de CV por um compósito contendo biopolímeros e sílica, no qual as características superficiais do material foram relacionadas à interação com o corante catiônico. A baixa variação observada entre pH 3 e 10 no presente estudo indica que o processo apresentou comportamento relativamente estável nessa faixa, permitindo a escolha do pH 6 como condição de trabalho, uma vez que esta condição se assemelha ao valor de pH encontrado em efluentes industriais têxteis (Islam; Mostafa, 2020).

Em relação à massa de adsorvente, o aumento da quantidade de CaAQ promoveu redução da capacidade de adsorção por unidade de massa. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da quantidade de sítios disponíveis em relação à concentração fixa de CV, fazendo com que parte desses sítios permaneça sem ocupação. Assim, embora o aumento da massa possa favorecer a remoção do corante, a capacidade de adsorção expressa por unidade de massa do adsorvente tende a diminuir. Comportamento semelhante foi observado por Saidi *et al.* (2025) na adsorção de CV utilizando diatomita, em que o aumento da dosagem do adsorvente elevou a remoção do corante, enquanto a capacidade de adsorção diminuiu.

O aumento da concentração inicial de CV favoreceu a capacidade de adsorção do CaAQ, uma vez que a maior disponibilidade de moléculas do corante pode favorecer o contato e a transferência dessas moléculas da solução para a superfície do adsorvente. Comportamento semelhante foi observado por Alorabi *et al.* (2021), que verificaram aumento da capacidade de adsorção de CV com o incremento da concentração inicial do corante. Em relação ao tempo de contato, a capacidade de adsorção apresentou maior variação nos estágios iniciais do processo, seguida por uma tendência de estabilização, indicando a aproximação do sistema ao equilíbrio. Alorabi *et al.* (2021) também observaram rápida adsorção inicial de CV, seguida pela aproximação ao equilíbrio em aproximadamente 120 min. A pequena variação observada após 120 min no presente estudo indica a aproximação do sistema ao equilíbrio, permitindo a adoção desse período como tempo de contato nos ensaios posteriores.

Conclusão

Neste trabalho, foram avaliadas diferentes condições iniciais para a adsorção de CV pelo compósito CaAQ. O material apresentou comportamento relativamente estável entre pH 3 e 10, sendo o pH 6 selecionado para a continuidade dos estudos. A massa de 0,025 g proporcionou remoção (74,08%) e capacidade de adsorção (61,52 mg g^{-1}), enquanto o aumento da concentração inicial do corante favoreceu a capacidade de adsorção do compósito. No experimento de tempo de contato, observou-se maior adsorção nos estágios iniciais e posterior estabilização, com aproximação ao equilíbrio a partir de 120 min. Os resultados obtidos demonstram o potencial do CaAQ como material adsorvente para a remoção de CV em meio aquoso e fornecem condições de referência para a continuidade dos estudos de adsorção.

Referências

ALORABI, A. Q. *et al.* Natural clay as a low-cost adsorbent for crystal violet dye removal and antimicrobial activity. **Nanomaterials**, v. 11, n. 11, 2789, 2021.

FIGUEIREDO, P. S.; DOTTO, G. L.; FOLETTO, E. L. Applicability of granite and quartzite residues in the development of porous adsorbents for effective organic pollutant removal. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 33, p. 9609–9625, 2026.

GEORGIN, J. *et al.* Alginate-calcium composites: advances in design, functional properties, and applications in biomedicine and environmental remediation. **Carbohydrate Research**, v. 565, 109932, 2026.

ISLAM, M. R.; MOSTAFA, M. G. Characterization of textile dyeing effluent and its treatment using polyaluminum chloride. **Applied Water Science**, v. 10, n. 5, 119, 2020.

NAJAFI, H.; ASASIAN-KOLUR, N.; SHARIFIAN, S. Adsorption of chromium (VI) and crystal violet onto granular biopolymer-silica pillared clay composites from aqueous solutions. **Journal of Molecular Liquids**, v. 344, 117822, 2021.

ONUK, E. B.; ISIK, B. Adsorptive removal of toxic methylene blue and crystal violet dyes from aqueous solutions using *Prunus spinosa*: isotherm, kinetic, thermodynamic, and error analysis. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, p. 19805–19822, 2025.

PANDEY, S. *et al.* Assessing water matrix influence and toxicity reduction of crystal violet and reactive black 5 dyes after cold plasma-driven degradation. **Scientific Reports**, v. 16, 20598, 2026.

SAIDI, M. *et al.* Kinetics thermodynamics and adsorption study of raw treated diatomite as a sustainable adsorbent for crystal violet dye. **Scientific Reports**, v. 15, 21991, 2025.

SHARMA, B. *et al.* Cerium and samarium doped TiO_2 for degradation of crystal violet dye in wastewater by photo-degradation method. **Scientific Reports**, v. 16, 12387, 2026.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), à CAPES, ao CNPq e à FAPES. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001.