ESTUDO DAS CONDIÇÕES INICIAIS DE ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO EM COMPÓSITO OBTIDO DE RESÍDUO DE MÁRMORE E PET

Amanda Vargas dos Passos[1], Joyce de Almeida Carminati[1], Lucas Destefani Paquini[2], Manuela Moura Amorim[1], Ana Clara Ribeiro Aranha[1], 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, amandavargas516@gmail.com, joyceacarminati@gmail.com, manuamorim94@gmail.com, anaclaraaranha@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.com

Resumo
O presente estudo teve como objetivo avaliar a adsorção do corante azul de metileno (AM) utilizando um compósito sintetizado a partir de resíduos de polietileno tereftalato (PET) e de mármore, denominado $CaMg(CO_3)_2$@PET, visando sua aplicação no tratamento de efluentes industriais. Foram realizados ensaios em batelada para analisar a influência do pH inicial, concentração inicial e do tempo de contato. O material apresentou alta estabilidade frente ao pH na faixa de 5,0 a 8,0, enquanto a concentração inicial de AM, variando de 60 a 200 mg L^{-1}, levou a uma capacidade máxima de adsorção de 24,55 mg g^{-1} (200 mg L^{-1}). O estudo do efeito do tempo de contato, utilizando concentração fixa de 100 mg L^{-1} de AM e variando o tempo de 3, 30, 60, 120, 300, 480, 960 e 1440 minutos, indicou taxa rápida de retenção inicial, estabelecendo o tempo operacional de 300 minutos como ideal. Concluiu-se que o compósito possui elevado potencial adsortivo, promovendo uma solução sustentável e eficiente para a remoção de corantes em meio aquoso por meio do reaproveitamento de resíduos.
Palavras-chave: Efluentes têxteis. Resíduos. Remoção.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Química.

Introdução

O avanço contínuo da industrialização tem intensificado a geração de resíduos e efluentes, o que resulta em sérios problemas ambientais. Entre os setores que mais contribuem para esse cenário estão a indústria têxtil, a de rochas ornamentais e o consumo de polímeros sintéticos, como o polietileno tereftalato (PET). A indústria têxtil é reconhecida por seu elevado potencial poluidor, especialmente devido ao uso intensivo de água nos processos de tingimento e estamparia, nos quais cerca de 20% dos corantes empregados acabam sendo perdidos para o meio ambiente (Guaratini; Zanoni, 2000).

Entre esses compostos, o corante azul de metileno (AM), um corante catiônico cuja carga positiva favorece sua interação com materiais que apresentam carga superficial negativa. Essa característica contribui para sua remoção por meio da adsorção (Li *et al.,* 2020; Xing *et al.,* 2025). A presença do AM em recursos hídricos é motivo de preocupação devido aos possíveis efeitos sobre os organismos aquáticos. A exposição ao corante pode interferir em funções metabólicas e respiratórias de espécies como peixes, algas e invertebrados. Além disso, sua permanência no ambiente e a respectiva acumulação nos organismos podem favorecer efeitos que se prolongam ao longo do tempo (Oladoye *et al.,* 2022; Yang *et al.,* 2024). Existem efeitos devido ao contato com o composto para seres humanos, como irritações na pele e nos olhos. Em situações de maior exposição, o AM pode ainda estar relacionado à meta-hemoglobinemia (Jawad *et al.,* 2022; Oladoye *et al.,* 2022; Yang *et al.,* 2024).

A geração de resíduos também é expressiva no setor de rochas ornamentais, especialmente durante as etapas de corte e beneficiamento. Entre os materiais gerados há o resíduo de mármore, cuja produção pode representar cerca de 20% da massa processada. Em escala mundial, essa quantidade corresponde a aproximadamente 5 a 6 milhões de toneladas de resíduos por ano (Hamed; Ahmed; Metwally, 2014). Esse material, quando descartado inadequadamente, causa assoreamento de corpos d'água, dispersão de poeira e degradação paisagística (Martins; Peixoto; Mendes, 2023). Apesar desses impactos, a composição mineral do resíduo de mármore, especialmente pela presença

de carbonatos e óxidos, permite considerar seu aproveitamento em aplicações ambientais. Entre essas possibilidades está sua utilização como matéria-prima para a produção de materiais destinados à adsorção de contaminantes presentes em soluções aquosas.

De forma semelhante, o PET representa outro desafio ambiental devido à sua elevada produção e baixa degradabilidade. Embora apresente propriedades desejáveis, como resistência mecânica e baixa permeabilidade a gases, seu descarte incorreto leva ao acúmulo em aterros e ambientes aquáticos, sobretudo nos oceanos, e apesar de ser reciclado, grande parte do material ainda é descartada de forma inadequada, contribuindo para a poluição ambiental (Celestino; Pedrosa; Souza, 2022). Nesse contexto, processos de pirólise catalítica utilizando metais como cálcio e magnésio, têm se mostrado promissores na degradação do PET, transformando-o em carvão e outros subprodutos de interesse (Sá, 2023).

Diante desses desafios, a busca por tecnologias de tratamento de efluentes mais econômicos e de alta eficiência é fundamental. A adsorção ganha destaque nesse contexto por sua simplicidade operacional, elevada eficiência e possibilidade de aplicação em larga escala (Nascimento *et al.,* 2014). Nesse sentido, a pesquisa visa a utilização do PET e RM para a formação de um compósito de $CaMg(CO_3)_2$@PET para a remoção do corante AM em meio aquoso.

Metodologia

A fim de obter o compósito $CaMg(CO_3)_2$@PET, foram empregados resíduo de mármore e PET como matérias-primas. O resíduo mineral foi inicialmente acondicionado em estufa e mantido sob aquecimento até que não fossem observadas novas variações em sua massa. O PET comercial, adquirido em Alegre, Espírito Santo, foi previamente fragmentado em pedaços de aproximadamente 2 × 2 cm. O resíduo de mármore foi proveniente de uma unidade de processamento de rochas ornamentais localizada em Cachoeiro de Itapemirim, ES.

Após o pré-tratamento, os dois materiais foram reunidos em quantidades equivalentes em massa. A mistura resultante foi submetida a 290 °C em mufla, etapa empregada para favorecer a integração e a uniformidade do material. Na sequência, realizou a pirólise em forno, utilizando três condições de temperatura. O aquecimento foi conduzido até 400 °C, 500 °C e 600 °C, empregando, respectivamente, taxas de 3, 5 e 10 °C min^{-1}. Após alcançar cada temperatura estabelecida, o sistema permaneceu nessa condição por 60 min.

O efeito do pH na adsorção foi avaliado utilizando uma massa de 0,05 g do compósito em contato com 10,0 mL de solução do corante AM, em frascos de Erlenmeyers. Para o preparo das soluções, alíquotas de 2,5 mL de uma solução do AM na concentração de 1000 mg L^{-1} foram adicionadas a balões volumétricos de 25 mL e completadas até o menisco com água em 11 diferentes valores de pH, variando de 2 a 12 (ajustados com HCl e NaOH 0,1 mol L^{-1}). Posteriormente, uma alíquota de 10,0 mL de cada solução foi adicionada diretamente ao erlenmeyer contendo a massa do adsorvente. Os sistemas foram mantidos sob agitação orbital de 100 rpm a 25°C por 24 horas.

Para o estudo da concentração inicial, foi utilizada uma massa de 0,05 g de adsorvente em contato com 10,0 mL de solução de AM, em concentrações variando de 60 a 200 mg L^{-1}, mantidos sob as mesmas condições de agitação e temperatura constante 25 °C por 24 horas.

O tempo de equilíbrio foi avaliado em frascos contendo 10,0 mL de solução de AM na concentração de 100 mg g^{-1} e massa otimizada de adsorvente. Os sistemas foram agitados a 100 rpm e 25°C, com alíquotas coletadas nos tempos de 3, 30, 60, 120, 300, 480, 960 e 1440 minutos.

Após os períodos de contato de cada ensaio, as suspensões foram filtradas em filtros de seringa e as concentrações remanescentes de AM foram determinadas por espectrofotometria de absorção UV-Vis (Thermo Fisher Scientific™, GENESYS™ 10S) no comprimento de onda de 664 nm, utilizando uma curva de calibração previamente estabelecida. A concentração remanescente foi determinada por curva de calibração, e a capacidade de adsorção calculada pela Equação 1.

$$q = \frac{(C_0 - C_f) * V}{m} \qquad \text{(eq. 1)}$$

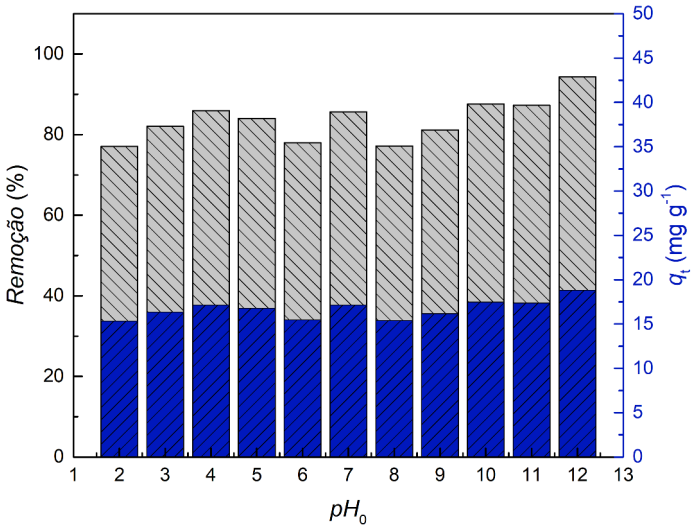
Onde q (mg g^{-1}) corresponde a quantidade de corante adsorvida por unidade de massa; C_0 e C_f (mg L^{-1}) são, respectivamente, as concentrações iniciais e finais em solução; V (L) é o volume de

solução e *m* (g) é a massa de adsorvente.

Resultados

A análise do efeito do pH na adsorção (Figura 1), indicou que a remoção do corante pelo compósito ocorreu de forma satisfatória em todas as condições, alcançando uma faixa de remoção média de 81,20% na faixa de pH 5,0–8,0.

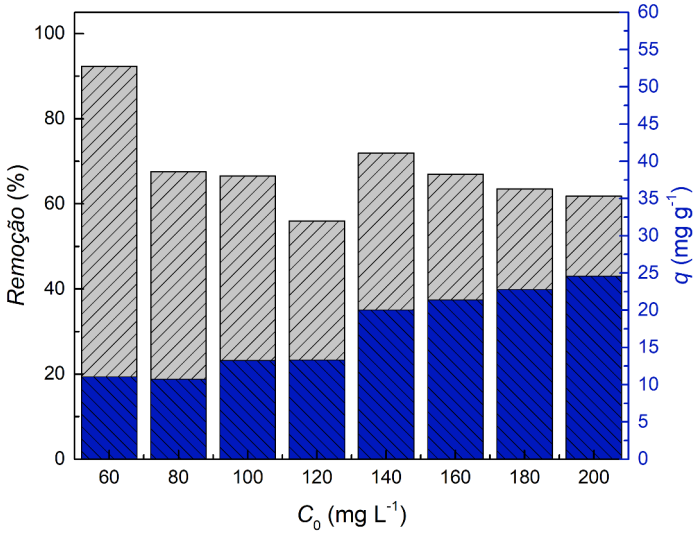
Figura 1 – Efeito do pH do material compósito de $CaMg(CO_3)_2$@PET – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET).



Fonte: Autoria própria (2026).

A Figura 2 mostra o efeito da concentração inicial de AM variando de 60 a 200 mg L^{-1} atingindo capacidade máxima de adsorção de 24,55 mg g^{-1} (200 mg L^{-1}), com aproximadamente 60% de remoção. Já na concentração de 100 mg L^{-1}, a quantidade de corante removida foi de 66,58%. Esta última concentração (100 mg L^{-1}) foi escolhida como condição de trabalho para os demais ensaios, por proporcionar uma remoção intermediária, próxima a 60%, adequada à avaliação do processo de adsorção. Este padrão de remoção adotado nos ensaios garante a viabilidade de obtenção de dados em estudos em que há aumento da temperatura e, possivelmente, da adsorção.

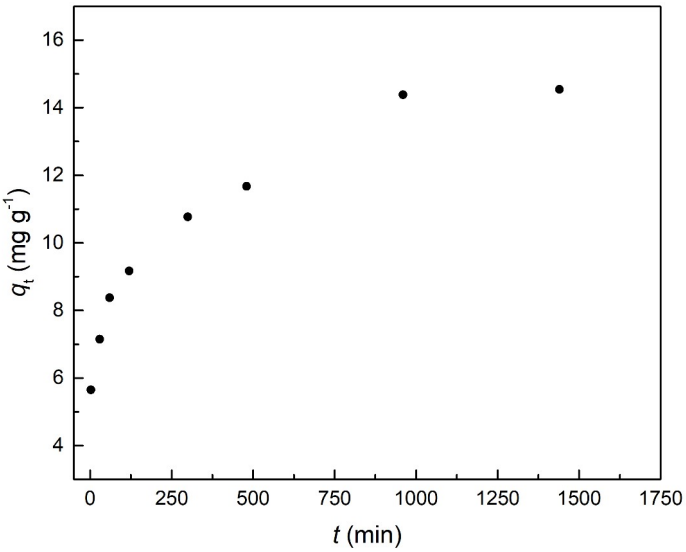
Figura 2 - Efeito da concentração inicial e remoção do azul de metileno pelo material compósito de $CaMg(CO_3)_2$@PET – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET).



Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 3 estão mostrados os dados referentes ao tempo de contato na remoção do AM pelo material $CaMg(CO_3)_2$@PET. É possível observar que o sistema atingiu o equilíbrio em 300 minutos, indicando este como o período necessário para a estabilização do processo.

Figura 3 – Tempo de contato na adsorção de azul de metileno por $CaMg(CO_3)_2$@PET – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET).



Fonte: Autoria própria (2026).

Discussão

Na análise do efeito do pH na adsorção (Figura 1), o compósito apresentou elevada capacidade de retenção em toda a faixa investigada, variando de 77,09%, em pH 2, a 94,30%, em pH 12. Considerando que a distribuição das cargas superficiais do adsorvente depende diretamente do pH, e que este fator influencia também o estado de ionização da molécula em solução aquosa (Ji, 2019), os resultados indicam que a molécula de AM se manteve propícia à adsorção nos diferentes pH, apresentando diferenças nos valores de remoção e capacidade de carregamento. Assim, para os ensaios subsequentes, devido à estabilidade do compósito, adotou-se para os demais experimentos a faixa de pH da solução entre pH 5,0 e 8,0, onde é possível obter remoção média de corante de 81,20%. A faixa de valores de pH mencionada corresponde à faixa na qual se encontra o pH da água de osmose reversa utilizada no preparo das soluções utilizadas na execução deste trabalho. Além disso, também corresponde à faixa de pH de efluentes industriais, em geral (Islam; Mostafa, 2020). Essa característica representa uma expressiva vantagem operacional e econômica, pois elimina a necessidade de adição de reagentes para ajuste prévio de pH no tratamento de efluentes reais (Mall; Srivastava; Agarwal, 2006; Rocha, 2012).

Na Figura 2, o efeito da concentração inicial indicou um aumento progressivo na quantidade de corante adsorvido por unidade de massa, elevando-se de 11,06 mg g^{-1} em 60 mg L^{-1} até atingir 24,55 mg g^{-1} em 200 mg L^{-1}. Em contrapartida, a porcentagem de remoção apresentou tendência decrescente, reduzindo de 92,34% em 60 mg L^{-1} para 61,79% em 200 mg L^{-1}, reflexo da saturação progressiva dos sítios de adsorção disponíveis na massa fixa do compósito. Diante desses resultados, fixou-se a concentração inicial de 100 mg L^{-1} para os ensaios subsequentes, com remoção intermediária próxima a 60%, visto que, quando ocorrer a avaliação do processo de adsorção em diferentes temperaturas, a adsorção tende a aumentar, junto com o percentual de remoção. Essa condição representa um ponto de equilíbrio, garantindo eficiência de remoção de 66,58% associada a uma capacidade de adsorção de 13,25 mg g^{-1}, a qual é considerada satisfatória para a avaliação do tempo de contato, da cinética do processo e do equilíbrio. Os resultados mostram que o compósito $CaMg(CO_3)_2$@PET apresenta potencial como material adsorvente para a remoção de corantes.

O estudo do efeito do tempo de contato na capacidade de adsorção (q_t) do AM pelo compósito está demonstrado na Figura 3. O estudo do tempo de contato permitiu identificar as regiões de rápida adsorção, a fase intermediária e o estado de equilíbrio do sistema. Nos primeiros 120 min, observa-se

uma etapa rápida de adsorção, na qual q_t atinge 9,17 mg g^{-1}. Essa rapidez inicial é favorecida pela grande abundância de sítios ativos desocupados na superfície externa do compósito, aliada à elevada concentração entre a solução e o adsorvente no início do processo. Com o decorrer do tempo, a taxa de transferência de massa desacelera devido ao preenchimento dos sítios superficiais e à necessidade de difusão do corante para os poros internos do material (Nascimento *et al.,* 2014). Em 300 min, o sistema atinge 10,77 mg g^{-1}, representando cerca de 74% da capacidade máxima obtida nos tempos mais longos, que seria 14,54 mg g^{-1} em 1440 min. Por apresentar remoção em um intervalo operacionalmente viável, o tempo de 300 minutos foi definido como o tempo ótimo para a realização dos ensaios subsequentes, caracterizando o equilíbrio termodinâmico do processo. Esse parâmetro é essencial para a compreensão do comportamento cinético da adsorção em determinada concentração inicial (Nascimento *et al.,* 2014), além de fornecer subsídios para os estudos posteriores de equilíbrio, cinética e termodinâmica (Fu; Wang, 2011; Bulut; Aydin, 2006).

Conclusão

O material exibe estabilidade e eficiência ao longo de uma ampla faixa de pH (2,0 a 12,0), o que elimina a necessidade de ajustes químicos prévios e simplifica a aplicação prática. A avaliação da concentração inicial confirmou a forte influência do gradiente de massa sobre o processo, permitindo atingir uma capacidade de adsorção de até 24,55 mg g^{-1} em 200 mg L^{-1} e justificando a escolha da concentração de 100 mg L^{-1} para os ensaios subsequentes por harmonizar uma satisfatória capacidade de carregamento de 13,25 mg g^{-1}, com razoável eficiência de remoção (66,58%). Por fim, o estudo do tempo de contato revelou uma taxa de retenção rápida na etapa inicial, estabelecendo o tempo operacional fixado em 300 minutos como a condição ideal para garantir razoável capacidade de adsorção dentro de um intervalo viável para a continuidade dos estudos de cinética, de equilíbrio e de termodinâmica do processo. O presente estudo demonstrou que o compósito sintetizado a partir de resíduos de PET e mármore apresenta potencial como adsorvente para a remoção do corante azul de metileno em meio aquoso. Este trabalho reforça a viabilidade do aproveitamento de resíduos industriais e urbanos na produção de materiais adsorventes eficientes, oferecendo uma alternativa econômica e ambientalmente responsável para o tratamento de efluentes têxteis.

Referências

BULUT, Y.; AYDIN, H. A kinetics and thermodynamics study of methylene blue adsorption on wheat shells. **Desalination**, v. 194, n. 1–3, p. 259–267, 2006.

CELESTINO, J. D. E. S.; PEDROSA, A. M. G.; SOUZA, M. J. B. Pirólise catalítica do polietileno de alta densidade (PEAD) utilizando catalisadores zeolíticos do tipo ferrierita contendo óxido de lantânio. **Scientia Plena**, v. 18, n. 4, 2022.

DONKADOKULA, Naresh Yadav *et al*. A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, n. 3, p. 543–560, 2020.

FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. **Journal Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, n. 1, p. 71–78, 2000.
HAMED, M. M.; AHMED, I. M.; METWALLY, S. S. Adsorptive removal of methylene blue as organic pollutant by marble dust as eco-friendly sorbent. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, n. 4, p. 2370–2377, 2014.

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

JAWAD, Ali H. *et al.* Mesoporous activated carbon from mangosteen (Garcinia mangostana) peels by H3PO4 assisted microwave: Optimization, characterization, and adsorption mechanism for methylene blue dye removal. **Diamond and Related Materials**, v. 129, p. 109389, 2022.

JI, B. Removal of methylene blue from aqueous solutions using biochar derived from a fallen leaf by slow pyrolysis: behavior and mechanism. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 3, 103036, 2019.

LI, Zichao *et al.* Adsorption of congo red and methylene blue dyes on an ashitaba waste and a walnut shell-based activated carbon from aqueous solutions: Experiments, characterization and physical interpretations. **Chemical Engineering Journal**, v. 388, p. 124263, 2020.

MALL, I. D.; SRIVASTAVA, V.C.; AGARWAL, N. K. Removal of Orange-G and Methyl Violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash—kinetic study and equilibrium isotherm analyses. **Dyes and Pigments**, v. 69, n. 3, p. 210–223, 2006.

MARTINS, L. M.; PEIXOTO, R. A. F.; MENDES, J. C. Quartzite tailings in civil construction materials: a systematic review. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 6, p. 1807-1824, 2023.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. **Fortaleza: Imprensa Universitária**, 2014.

OLADOYE, P.O. *et al*. Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. **Results in Engineering**, v. 16, p. 100678, 2022.

ROCHA, O. R. S. Avaliação do processo adsortivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química Nova**, v. 35, p. 1369–1374, 2012.

SÁ, M. S. **Conversão térmica e catalítica do polietileno tereftalato para obtenção de hidrocarbonetos e insumos químicos sustentáveis.** Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe, 2023.

XING, Xiaowei *et al.* Adsorption of methylene blue dye on feather keratin/silk fibroin porous aerogels. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 166, p. 105298, 2025.

YANG, Pengfei *et al.* Effective removal of methylene blue and crystal violet by low-cost biomass derived from eucalyptus: Characterization, experiments, and mechanism investigation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 33, p. 103459, 2024.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), à Capes, ao CNPq e à Fapes.