



REMOÇÃO DE VERMELHO CONGO USANDO Ca/Mg-CARVÃO COMO ADSORVENTE: EFEITO DA CONCENTRAÇÃO INICIAL DE CORANTE E DA DOSAGEM DO MATERIAL

Nathália T. Vieira¹; Amanda V. Passos¹; Lucas D. Paquini¹; Joyce A. Carminati¹; Luciene R. Profeti¹; Demetrius Profeti¹.

¹Universidade Federal do Espírito Santo. Alto Universitário s/n – Guararema, 29500-000, Alegre, Espírito Santo, Brasil, ntavaresv@gmail.com, amandavargas516@gmail.com, lucasdestefanip@hotmail.com, joyceacarminati@gmail.com, luciene.profeti@ufes.br, demetrius.profeti@ufes.br.

Palavras-Chave: Adsorção, Compósito, Contaminantes.

Introdução

O setor industrial têxtil, conhecido por seu elevado potencial poluente, gera efluentes contendo grandes quantidades de corantes tóxicos. Durante o processamento de tingimento de tecidos, as indústrias têxteis utilizam grandes volumes de água para suprir as etapas de produção (Donkadokula *et al.*, 2020; Guaratini; Zanoni, 2000) e como resultado, são gerados efluentes em proporções igualmente grandes. Estima-se que cerca de 20% dos corantes utilizados são perdidos para o ambiente (Donkadokula *et al.*, 2020; Guaratini; Zanoni, 2000). Cerca de 100.000 tipos diferentes de corantes comerciais estão em uso atualmente, com um consumo global estimado entre 700.000 e 1.000.000 de toneladas por ano (Abdelaal; Mohamed, 2013) e a contaminação da água por corantes é iminente e representa risco à saúde humana, fauna e flora (Aravind *et al.*, 2016; Langhals, 2004).

O Vermelho Congo (VC) é um exemplo de corante industrial que causa sérios danos ambientais. Mesmo em baixas concentrações, o VC pode causar distúrbios renais, respiratórios e gastrointestinais (Bengtsson *et al.*, 2009; Bertazzo *et al.*, 2010). Além de sua toxicidade para os seres humanos, o VC pode afetar negativamente a cadeia alimentar ao causar impactos nos corpos d'água, bloqueando a luz solar e interrompendo a fotossíntese das plantas aquáticas (Miao *et al.*, 2021). Assim, é necessário desenvolver tecnologias para o tratamento ou eliminação das substâncias presentes nos efluentes do setor têxtil. Para que essas tecnologias sejam aplicáveis em larga escala, elas devem ser eficientes e ter baixo custo operacional (Donkadokula *et al.*, 2020). A remoção de substâncias tóxicas por adsorção é um método que contempla os requisitos citados necessários de viabilidade econômica e possibilidade de aumento de escala (Nascimento *et al.*, 2014).

Com o objetivo de melhorar a eficiência da adsorção, novos materiais têm sido desenvolvidos como alternativa viável de reutilização de resíduos, a fim de minimizar os impactos causados pelo excesso dos mesmos no ambiente. Além de contribuir para a preservação ambiental, o reaproveitamento de resíduos como matéria-prima para a síntese de novos materiais pode agregar valor à produção. Outro setor industrial gerador de grande quantidade de resíduos é o de mineração, sendo responsável por causar vários problemas ambientais. Por exemplo, a extração de rochas ornamentais produz resíduos ou rejeitos que frequentemente são depositados no meio ambiente, resultando em grande contaminação (Martins; Peixoto; Mendes, 2023). Este resíduo é um sólido finamente dividido que, ao ser misturado com a água utilizada no processo de produção, forma uma lama residual que é

posteriormente depositada em aterros. Estima-se que aproximadamente 20% do peso total dos produtos do beneficiamento de rochas se transformam em resíduos, resultando em uma produção mundial de cerca de 5 a 6 milhões de toneladas por ano (Hamed; Ahmed; Metwally, 2014). Diante destes dados alarmantes, torna-se fundamental a pesquisa na área de novos materiais que visam um controle e aproveitamento deste tipo de resíduo.

Esse resíduo de mármore é um material poroso, o que o torna interessante para uso como adsorventes, uma vez que também possui grupos superficiais carregados e podem atrair espécies químicas dispersas em fluidos, além da porosidade. De acordo com Hamed, Ahmed e Metwally (2014), a adsorção em pó de mármore ocorre mais rapidamente em comparação com o carvão ativado, o que é um requisito crucial para a aplicação desse tipo de tratamento (Hamed; Ahmed; Metwally, 2014). Diversos estudos indicam que a utilização de resíduos de mármore é uma alternativa econômica e eficaz para a remoção de corantes em soluções aquosas (Ahmed; Abdulrazak; Alsaffar, 2022; Wang *et al.*, 2023). Ainda, esse tipo de material pode ser combinado ao carvão ativado, o qual é o adsorvente mais usual, para potencializar a sua eficiência (Özkaraaslan; Çetintaş; Bingöl, 2023).

Outro material de grande importância para a sociedade atual é o polietileno tereftalato (PET), que é um termoplástico conhecido por sua maleabilidade a altas temperaturas, possui boa resistência mecânica e baixa permeabilidade a gases. Essas propriedades tornam o PET ideal para embalagens, no entanto, seu descarte inadequado pode levar ao acúmulo no ambiente, principalmente, nos oceanos (Celestino, Pedrosa, Souza, 2022). Devido à suas características químicas, esse material é um resíduo que poderia ser utilizado como um precursor na síntese de carvão ativado.

Considerando que esses materiais supracitados necessitam de soluções para um descarte adequado, visando seu aproveitamento para evitar o acúmulo no meio ambiente e, ao mesmo tempo, agregar valor à produção, eles podem ser combinados resultando em um composto de Ca/Mg – carvão. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo investigar a síntese e aplicação do composto citado, preparado a partir de resíduos de beneficiamento de mármore e PET para a remoção do corante VC em meio aquoso.

Material e Métodos

O material composto de Ca/Mg-carvão proveniente de resíduos de mármore foi sintetizado utilizando resíduos de PET como precursor do carvão. Para os resíduos de PET foram utilizadas garrafas transparentes e incolores para eliminar fatores interferentes nas características do material e garantir a reprodução do composto. O resíduo de mármore foi obtido da indústria local de beneficiamento de rochas ornamentais, e as garrafas de PET foram adquiridas em comércio local. Os materiais, PET e pó de mármore, foram colocados em uma cápsula de porcelana em proporção 1:1, em massa, e submetidos ao tratamento térmico com fluxo de N₂, sob temperatura de 600°C. Ao final do processo de pirólise, obteve-se um material sólido formado pelo resíduo de mármore recoberto por carvão.

A área superficial foi determinada por fisissorção de N₂, utilizando o método de isoterma de Brunauer, Emmett e Teller (BET) com um analisador de área e porosidade (JWGB Sci. & Tech, modelo Meso112). Foram pesadas 0,2 g no porta-amostras, com

granulometria entre 80–100 mesh. Sendo criado um vácuo no porta-amostras, seguido de um tratamento térmico controlado no equipamento. A análise foi realizada aplicando o método volumétrico estático de dosagem do adsorvato (N_2), com um intervalo de pressão relativa (p/p_0) entre 0-0,99.

Para a análise estrutural do material por difração de raios X, utilizou-se o equipamento difratômetro de raios X da marca Rigaku, modelo Miniflex 600 com radiação $K\alpha$ do cobre ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) e variação do ângulo (2θ) de 5-70°. Os padrões de difração dos materiais foram obtidos, e os picos correspondentes às fases cristalinas foram identificados comparando-os com os bancos de dados disponíveis.

Para a realização do efeito de dosagem do adsorvente, foram preparados sistemas com variação de massa de 0,01-0,225 g de adsorvente, aos quais foram adicionados 10,0 mL de solução de Vermelho Congo (VC) com concentração de 800 mg L^{-1} . Para o experimento de efeito da concentração inicial, foram preparados 9 sistemas adsorvativos utilizando 0,01 g de adsorvente em Erlenmeyers de 125 mL, aos quais foram adicionados 10,0 mL de uma solução de VC com variação de 400-800 mg L^{-1} . Os sistemas foram colocados em uma mesa agitadora orbital Lucadema (luca-223) com agitação (100 rpm) e temperatura (25°C) controlados por 24h.

Para ambos experimentos, as amostras das soluções foram coletadas, separadas por filtração com filtro de seringa e analisadas em um espectrofotômetro de absorção UV-Vis Thermo-Fischer Scientific™ (GENESYS™ 10S) a um comprimento de onda de 500 nm, para a determinação da concentração remanescente através do método de curva de calibração. A capacidade de adsorção foi calculada pela equação 1.

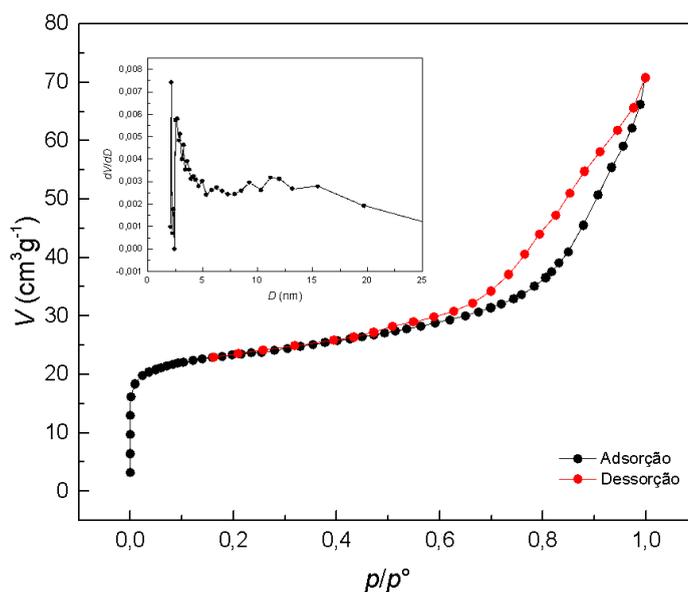
$$q = \frac{(C_0 - C_f) \cdot V}{m} \text{ (eq. 1)}$$

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 e Discussão

Os resultados da análise de BET possibilitou estimar a área superficial do material, a qual foi 74,99 $m^2 g^{-1}$, com diâmetro de poros (mais frequentes) de 2,161 nm para o compósito, como pode-se observar na Figura 1 e Tabela 1.

Figura 1 - Área e Porosidade pelo Método BET: Isotermas de adsorção e dessorção de N_2 e distribuição dos diâmetros de poros (inserção).



Fonte: Os autores (2024).

Tabela 1 - Resultados obtidos com a análise de fisissorção de N₂ (método BET)

Fisissorção de N ₂	
Área superficial BET (m ² g ⁻¹)	74,99
Volume Total de Poros (cm ³ g ⁻¹)	0,103
Diâmetro de Poros Frequente (nm)	2,161
Diâmetro Médio de Poros (nm)	5,486

Fonte: Os autores (2024).

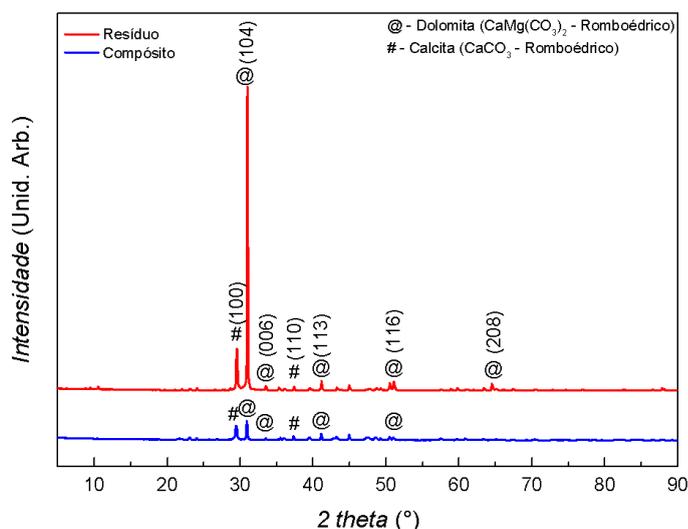
Conforme observado na Tabela 1, o resultado da distribuição do diâmetro interno dos poros do material indicou o valor de 2,161 nm, o qual se enquadra na classificação de mesoporoso (Steele, 1974). Além disso, através do perfil da isoterma de sorção (Figura 1), pode-se classificar como uma isoterma do Tipo IV, a qual é característica de materiais mesoporosos (Lowell *et al.*, 2004). O Tipo IV é distinguida pela presença de um laço da histerese ligado à condensação capilar nos poros, e sua característica é o *plateau* observado em altos valores de P/Po, indicando o preenchimento completo dos poros (Horvath; Kawazoe, 1983). Esse material segue a histerese tipo H3, representando que não possui adsorção limitante em altos valores de P/Po, típicos de agregados não-rígidos de partículas em forma de placa com poros em forma de fenda. O processo de dessorção inclui uma região íngreme, atribuída ao fechamento forçado do *loop* de histerese, conhecido como efeito de resistência à tração (Frenkel, 1946).

O resultado referente a área superficial BET, apresentou-se satisfatório visto que a área de 74,99 m²g⁻¹ obtida é superior à área de outros compósitos provenientes de resíduos de mármore, como de compósitos de quitosana/pó de mármore reticulados, o qual possui área superficial de 34,3 m² g⁻¹ (Şahbaz; Acikgoz, 2017) e o pó de mármore/mármore modificado por nanopartículas, com área de 52,60 m² g⁻¹ (Ahmed; Abdulrazak; Alsaffar, 2022). A cobertura de carbono proveniente da pirólise é responsável por garantir maior área e, provavelmente, maior disponibilidade de grupos funcionais para a adsorção química. É importante ressaltar que os compósitos que empregam mármore como suporte geralmente

apresentam áreas que dificilmente superam o valor de $100 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Isso ocorre porque a estrutura ordenada da Calcita e Dolomita dificulta a expansão da superfície das regiões mais internas (Huang *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2021).

O difratograma de raios X do compósito é apresentado na Figura 2. Observou-se a presença de 2 grupos inorgânicos e minerais carbonáticos na amostra: Calcita e Dolomita, os quais conferem propriedades alcalinas ao compósito.

Figura 2 - Difratograma de raios X do material compósito de Ca/Mg – carvão, preparado a partir de Polietileno Tereftalato (PET).



Fonte: Os autores (2024).

De acordo com os dados de DRX obtidos para o resíduo mármore, foi possível observar a presença de calcita e dolomita, uma vez que os principais picos de difração localizados em $2\theta = 31,05; 35,32; 41,12; 50,52; 65,14^\circ$, estão relacionados à estrutura do Dolomita (ICCD PDF2 00-036-0426) e localizados em $2\theta = 29,65$ e $36,48^\circ$, relativos à Calcita (ICCD PDF2 01-072-1652). Como esperado, os mesmos picos de difração estão presentes no difratograma de raios X, obtido para o compósito. A estrutura da calcita consiste em camadas alternadas de cátions de cálcio e ânions de carbonato, enquanto que a estrutura cristalina da dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) é um derivado da estrutura cristalina da calcita, possuindo Ca e Mg (Chen *et al.*, 2023). Estes resultados estão coerentes com os descritos nos estudos realizados por Guimarães *et al.* (2020) e Xu *et al.* (2021).

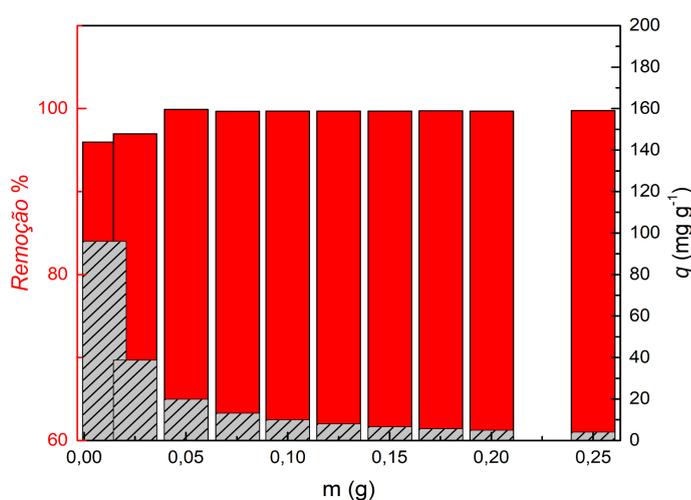
Torna-se importante destacar que não foi possível detectar a presença de picos de difração relacionados à estrutura de carbono no difratograma do compósito. Provavelmente, os picos de alta intensidade referentes às estruturas cristalinas da calcita e da dolomita dificultaram visualização da possível presença picos relacionados às estruturas amorfas como as de carbono. Além disso, outro ponto a ser considerado é que ocorreu a diminuição dos picos cristalinos após o processo de formação do compósito, o que pode indicar uma perda de cristalinidade ou das estruturas de calcita e dolomita, provocada pelo tratamento térmico durante a pirólise do PET. A análise estrutural por difração de raios X (DRX) é uma técnica de análise de interior (*bulk*), onde penetra a amostra e, portanto, não há presença do pico

amorfo relacionado ao carbono (Valverde *et al.*, 2015). Provavelmente, o método de preparo do compósito levou à formação de uma estrutura de carbono presente exclusivamente no recobrimento do grão de mármore, funcionando como um invólucro de carbono.

O material sintetizado foi investigado quanto à sua capacidade de remoção de azul de metileno de soluções aquosas. Inicialmente, o efeito da dosagem do adsorvente foi avaliado empregando-se 10 mL de solução corante na concentração de 800 mg L^{-1} variando a massa do adsorvente (faixa de 0,01 até 0,225 g) e os resultados desse estudo são demonstrados na Figura 3.

A partir dos resultados experimentais, foi possível observar que ao aumentar a dose do adsorvente houve o aumento na porcentagem de remoção do corante e a capacidade de adsorção do adsorvente. A porcentagem de adsorção é máxima com dose de adsorvente de 0,225 g, ou seja, 99,77% de remoção. Isso ocorre porque o aumento da dose do adsorvente aumenta o número de locais de adsorção disponíveis que favorecem a adsorção do corante (Das; Singh; Garg, 2019; Lafil; Montasser; Hafiane, 2019). Apesar da maior dosagem de adsorvente apresentar a maior % de remoção do corante, a dosagem de 0,01 g de adsorvente demonstrou um maior carregamento, de $95,96 \text{ mg g}^{-1}$ e, por este motivo, será utilizada nos experimentos subsequentes.

Figura 3 – Efeito da dosagem de adsorvente na capacidade de adsorção e remoção do Vermelho Congo pelo material compósito de Ca/Mg – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET) (condições de adsorção: concentração inicial de corante 800 mg L^{-1} ; volume de solução 10 mL; velocidade de agitação 100 rpm; pH = 5,5; temperatura ambiente 25 C° ; tempo de contato 24 h).



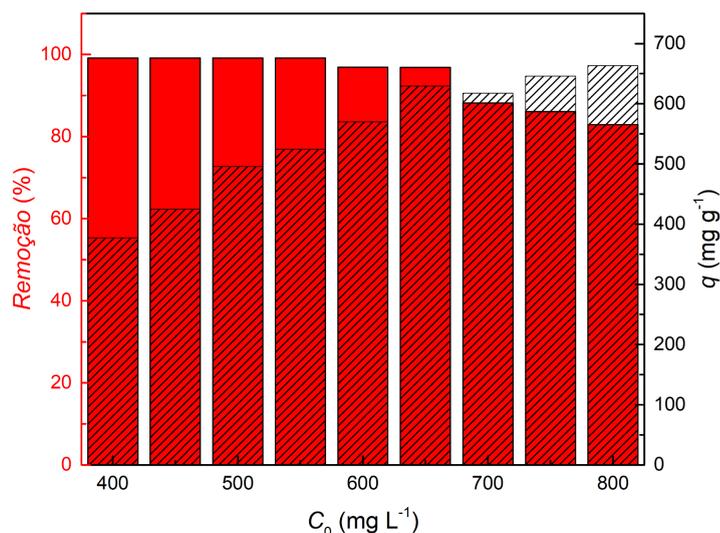
Fonte: Os autores (2024).

Por meio do efeito da concentração inicial (Figura 4), observou-se que a quantidade de corante adsorvida aumentou com o aumento da concentração inicial de 400 mg L^{-1} com o máximo de adsorção ocorrendo em 500 mg L^{-1} , atingindo o equilíbrio de carregamento após o pico. Nesta concentração inicial, a quantidade de corante removido aumentou de 377,64 para

663,36 mg g⁻¹ com o aumento da concentração de corante de 400 para 500 mg L⁻¹, respectivamente. Considerando as porcentagens de remoção, 99,13% do adsorvato foi removido quando a concentração inicial foi 400 mg L⁻¹, enquanto que 82,92% de remoção foi alcançado para a concentração inicial de 800 mg L⁻¹, como mostra a Figura 4.

Os valores de q (mg g⁻¹) e taxa de remoção (%) obtidos neste trabalho podem ser considerados altos, comparativamente aos estudos realizados por Bagheri; Mohammadi; Azhar (2024) e Qu et al. (2024), em que possuem taxa de remoção com faixa, respectivamente, de 25-200 mg g⁻¹ e 10-40 mg g⁻¹ de vermelho congo. Nessa perspectiva, pode-se afirmar que o compósito de Ca/Mg – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET) é um bom material adsorvente, conseguindo remover concentrações de corante elevadas com pouca massa do compósito.

Figura 4 – Efeito da concentração inicial e remoção do Vermelho Congo pelo material compósito de Ca/Mg – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET) (condições de adsorção: concentração com variação de 400-800 mg L⁻¹; volume de solução 10 mL; velocidade de agitação 100 rpm; pH = 5,5; temperatura ambiente 25 C°; tempo de contato 24 h).



Fonte: Os autores (2024).

Conclusões

Neste estudo, o compósito Ca/Mg – carvão, preparado a partir de polietileno tereftalato (PET) e resíduo de mármore, foi usado como adsorvente para o corante Vermelho Congo. Os resultados obtidos pelo método BET mostraram que a área superficial do material é adequada para um material adsorvente (74,99 m²g⁻¹) e o diâmetro de poros é compatível com material mesoporoso (2,161 nm). O difratograma de raios X, evidenciou 2 espécies inorgânicas e minerais carbonáticos correspondente à presença de Calcita e Dolomita no compósito, o que confere um caráter alcalino ao material, o qual pode potencializar a sua eficiência na remoção de espécies químicas.



Os resultados da aplicação do material na adsorção de vermelho congo mostraram que o material possui boa capacidade de remoção e o processo é influenciado por fatores como a dosagem de adsorvente e concentração inicial do corante.

Agradecimentos

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

Referências

- Abdelaal, M. Y.; Mohamed, R. M. Novel Pd/TiO₂ nanocomposite prepared by modified sol-gel method for photocatalytic degradation of methylene blue dye under visible light irradiation. **Journal of Alloys and Compounds**, 576, 201–207, 2013.
- Aguiar, F. N. De.; Oliveira, E. B. De; Vieira, E. A.; Tenório, J. A. S.; Oliveira, J. R. De. Caracterização de resíduos industriais visando a seu aproveitamento na fabricação de aço. **Rem: Revista Escola de Minas**, 65(3), 319–326, 2012.
- Ahmed, F. S.; Abdulrazak, A. A.; Alsaffar, M. A. Modelling and optimization of methylene blue adsorption from wastewater utilizing magnetic marble dust adsorbent: A response surface methodology approach. **Materials Today: Proceedings**, 60, 1676–1688, 2022.
- Aravind, P.; Selvaraj, H.; Ferro, S.; Sundaram, M. An integrated (electro- and bio-oxidation) approach for remediation of industrial wastewater containing azo-dyes: Understanding the degradation mechanism and toxicity assessment. **Journal of Hazardous Materials**, 318, 203–215, 2016.
- Bengtsson, Å.; Shchukarev, A.; Persson, P.; Sjöberg, S.. A solubility and surface complexation study of a non-stoichiometric hydroxyapatite. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 73(2), 257–267, 2009.
- Bertazzo, S.; Zambuzzi, W. F.; Campos, D. D. P.; Ogeda, T. L.; Ferreira, C. V.; Bertran, C. A. Hydroxyapatite surface solubility and effect on cell adhesion. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, 78(2), 177–184, 2010.
- 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**, 18, 4, 2022.
- Chen, C.; Zhong, H.; Wang, X.; Ning, M.; Wang, X.; Ge, Y.; Wang, H.; Tang, R.; Hou, M. Thermodynamic and Kinetic Studies of Dolomite Formation: A Review. **Minerals**, 13, 12, 1479, 2023.
- Das, S.; Singh, S.; Garg, S. Evaluation of Wheat Bran as a Biosorbent for Potential Mitigation of Dye Pollution in Industrial Waste Waters. **Oriental Journal Of Chemistry**, 35(5), 1565–1573, 2019.
- Donkadokula, N. Y.; Kola, A. K.; Naz, I.; Saroj, D. A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, 19(3), 543–560, 2020.
- Frenkel, J. **Kinetic Theory of Liquids**. Oxford University Press: Oxford, 1946.
- Guaratini, C. C. I.; Zanon, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, 23(1), 71–78, 2000.
- Guimarães, T.; Paquini, L. D.; Ferraz, B. R. L.; Profeti, L. P. R.; Profeti, D. Efficient removal of Cu(II) and Cr(III) contaminants from aqueous solutions using marble waste powder. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 8(4), 103972, 2020.
- 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**, 20(4), 2370–2377, 2014.
- Horváth, G.; Kawazoe, K. Method for the calculation of effective pore size distribution in molecular sieve carbon. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, 16(6), 470–475, 1983.
- Huang, Y. Liu, M.; Chen, S.; Jasmi, I. I.; Tang, Y.; Lin, S. Enhanced adsorption and slow release of phosphate by dolomite-alginate composite beads as potential fertilizer. **Water Environment Research**, 91(8), 797–804, 2019.
- Lafi, R.; Montasser, I.; Hafiane, A. Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration. **Adsorption Science & Technology**, 37(1–2), 160–181, 2019.



Langhals, H. Color Chemistry. Synthesis, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments. 3rd revised edition. By Heinrich Zollinger. **Angewandte Chemie International Edition**, 43(40), 5291–5292, 2004.

Lowell, S.; Shields, J. E.; Thomas, M. A.; Thommes, M. **Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density**. Dordrecht: Springer Netherlands, 16, 2004.

Martins, L. M.; Peixoto, R. A. F.; Mendes, J. C. Quartzite tailings in civil construction materials: a systematic review. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 2023.

Miao, J.; Zhao, X.; Zhang, Y.; Liu, Z. Feasible synthesis of hierarchical porous MgAl-borate LDHs functionalized Fe₃O₄@SiO₂ magnetic microspheres with excellent adsorption performance toward congo red and Cr(VI) pollutants. **Journal of Alloys and Compounds**, 861, 157974, 2021.

Nascimento, R. F.; Lima, A. C. A. De.; Vidal, C. B.; Melo, D. De. Q.; Raulino, G. S. C. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

Özkaraaslan, H.; Çetintaş, S.; Bingöl, D. A novel composite derived from carbonized hawthorn waste pulp/marble waste powder by ball milling: preparation, characterization, and usability as bifunctional adsorbent. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 13(5), 3765–3784, 2023.

Qu, Y.; Ma, H.; Liu, J.; Luo, Y.; Yue, Y.; Wang, J.; Cheng, Y. Study of adsorption of Congo red on ferric oxide@straw magnetic composites. **Journal of Physics: Conference Series**, 2713(1), 012016, 2024.

Ramos, V. C.; Rivera-Utrilla, J.; Ruiz-Sánchez, A.; López-Ramón, M. V.; Sánchez-Polo, M. Marble Waste Sludges as Effective Nanomaterials for Cu (II) Adsorption in Aqueous Media. **Nanomaterials**, 11(9), 2305, 2021.

Şahbaz, D. A.; Acikgoz, C. Cross-linked chitosan/marble powder composites for the adsorption of Dimozol Blue. **Water Science and Technology**, 76(10), 2776–2784, 2017.

Steele, W. A. **The Interaction of Gases with Solid Surfaces**, 5, Oxford: Pergamon Press, 1974.

Valverde, J. M.; Perejon, A.; Medina, S.; Perez-Maqueda, L. A. Thermal decomposition of dolomite under CO₂: insights from TGA and in situ XRD analysis. **Physical Chemistry Chemical Physics**, 17(44), 30162–30176, 2015.

Wang, T.; Qiu, X.; Yang, W.; Ma, C. Study on properties and mechanism of alkali-activated geopolymer cementitious materials of marble waste powder. **Developments in the Built Environment**, 16, 100249, 2023.

Xu, J.; Lu, D.; Zhang, S.; Xu, Z.; Hooton, R. D. Reaction mechanism of dolomite powder in Portland-dolomite cement. **Construction and Building Materials**, 270, 121375, 2021.