

Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais como adsorventes e fotocatalisadores de contaminantes ambientais.

Neves, V. L. O.^{1*}, Souza, T. G.¹, Moura, M. N.², Ferreira, S. A. D.³, Freitas, M. B. J. G.³, Lelis, M. F. F.³

¹ Programa Institucional de Iniciação Científica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

³ Departamento de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

* e-mail: victorol.neves@gmail.com

Resumo

A extração e o beneficiamento de rochas ornamentais, como mármore e granito, geram uma quantidade significativa de resíduos, representando um problema ambiental e de saúde pública. O Brasil se destaca como o quarto maior produtor mundial de rochas ornamentais, mas o descarte inadequado de resíduos gerados no processo representa um desafio ambiental significativo. Por outro lado, no setor têxtil, o descarte de efluentes contendo corantes também é uma questão preocupante devido à sua difícil degradação e potencial impacto na vida aquática. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do resíduo gerado no beneficiamento de mármore e granito na síntese de ferritas e sua aplicação como adsorventes e fotocatalisadores na remoção de corantes têxteis em meio aquosos. As amostras de resíduos passaram por caracterizações químicas e físicas, e foram utilizadas na síntese de ferritas. Em seguida, os testes de adsorção e fotodegradação foram realizados. Na fotodegradação a metodologia utilizada foi o processo oxidativo avançado do tipo Fenton e foto-Fenton. Os resultados mostraram que a fração magnética do resíduo (GRM) apresentou melhor desempenho tanto na adsorção quanto na degradação do corante. Os fotocatalisadores sintetizados a partir dos resíduos apresentaram uma eficiência de 90,01% (FGRA), 95,81% (FGRR) e 96,07% (FGRM) de descoloração do corante em 120 minutos, utilizando o processo foto-Fenton. A pesquisa confirma que os resíduos de mármore e granito podem ser reutilizados com sucesso na produção de fotocatalisadores no tratamento de efluentes contendo corantes, representando uma alternativa sustentável, de baixo custo e com grande potencial de aplicação ambiental e industrial, contribuindo para a promoção da economia circular.

Abstract

The extraction and processing of ornamental rocks, such as marble and granite, generate a significant amount of waste, representing an environmental and public health problem. Brazil stands out as the fourth largest producer of ornamental rocks in the world, but the inadequate disposal of waste generated in the process represents a significant environmental challenge. On the other hand, in the textile sector, the disposal of effluents containing dyes is also a concern due to their difficult degradation and potential impact on aquatic life. Thus, the present study aimed to evaluate the efficiency of the waste generated in the processing of marble and granite in the synthesis of ferrites and their application as adsorbents and photocatalysts in the removal of textile dyes in aqueous media. The waste samples underwent chemical and physical characterizations and were used in the synthesis of ferrites. Then, adsorption and photodegradation tests were performed. In the photodegradation, the methodology used was the advanced oxidative process of the Fenton and photo-Fenton type. The results showed that the magnetic fraction of the residue (GRM) presented better performance in both the adsorption and degradation of the dye. The photocatalysts synthesized from the waste showed an efficiency of 90.01% (FGRA), 95.81% (FGRR) and 96.07% (FGRM) in dye decolorization in 120 minutes, using the photo-Fenton process. The research confirms that marble

and granite waste can be successfully reused in the production of photocatalysts in the treatment of effluents containing dyes, representing a sustainable, low-cost alternative with great potential for environmental and industrial application, contributing to the promotion of the circular economy.

Keywords (Palavras chaves): Resíduo de mármore e granito, degradação, foto-Fenton.

1. Introdução

A crescente demanda por materiais de construção e bens de consumo tem impulsionado o desenvolvimento de diversos setores industriais, entre eles a indústria de rochas ornamentais e a indústria têxtil. O Brasil se destaca mundialmente na produção de mármore e granito, ocupando posição de liderança tanto na extração quanto na exportação desses materiais. Contudo, o processo de beneficiamento das rochas ornamentais gera uma quantidade significativa de resíduos finos e lama abrasiva, que, quando descartados de forma inadequada, podem representar sérios riscos ambientais e à saúde pública.^[1,2]

Os resíduos provenientes da indústria de mármore e granito, frequentemente acumulados em bacias de decantação ou descartados em aterros, apresentam composição rica em óxidos metálicos e sílica, podendo ser reutilizados como matéria-prima em diversos setores, como na fabricação de produtos cerâmicos, cimento e catalisadores ambientais.^[3,4] A incorporação desses rejeitos em materiais cimentícios, por exemplo, contribui para a redução das emissões de CO₂ e melhora as propriedades mecânicas dos materiais.^[5]

As indústrias têxteis, devido ao grande volume de água utilizado em seu processo de tingimento, representa um dos maiores potenciais de poluição hídrica. Os efluentes gerados são devolvidos aos corpos d'água, muitas vezes sem o tratamento adequado o que produz significativo impacto ambiental. Os corantes são os principais resíduos desses efluentes, sendo estes compostos de difícil degradação e altamente tóxicos para o meio ambiente. A maior parcela de corantes sintéticos mundialmente fabricados é destinada às indústrias têxteis e somente 50 a 70% da quantidade aplicada se fixa nas fibras dos tecidos, configurando um importante problema de poluição e desperdício.^[6] Os corantes sintéticos são substâncias insaturadas complexas que absorvem parte do espectro visível e emitem determinada cor, referente a fração de luz não absorvida.^[7]

A importância das indústrias de rochas ornamentais e da indústria têxtil na economia nacional e os altos impactos ambientais gerados motivam este trabalho, que tem como objetivo o reaproveitamento da lama abrasiva da indústria de rochas ornamentais no desenvolvimento de tecnologias ambientais limpas no tratamento de efluentes das indústrias têxteis, representando uma alternativa estratégica para a mitigação de impactos

ambientais, promovendo a economia circular e a sustentabilidade nos setores produtivos.^[8,2]

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se destacado como técnicas promissoras no tratamento de efluentes industriais. Os POAs atuam por meio da geração de radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), altamente reativos e capazes de degradar compostos orgânicos complexos até sua mineralização completa. Dentre esses processos, o sistema foto-Fenton e suas variantes têm sido amplamente estudados e aplicados devido à sua eficiência, custo acessível e versatilidade.^[9,10] Materiais ricos em ferro, vêm sendo investigados em função de suas propriedades redox e estabilidade térmica, características que os tornam atrativos para aplicações ambientais.^[11] Trabalhos recentes apontam que a estrutura local e a composição dos óxidos metálicos influenciam diretamente a sua atividade fotocatalítica, permitindo obter fotocatalisadores mais eficientes e sustentáveis.

Recentemente, pesquisadores têm explorado o uso de resíduos industriais como catalisadores nos POAs, transformando passivos ambientais em insumos úteis para a degradação de contaminantes. Resíduos de granito e mármore, por exemplo, já foram testados com sucesso como suportes catalíticos e fotocatalisadores, mostrando capacidade de degradação significativa de corantes como o Reactive Orange 122 em condições de luz visível e UV.^[12]

2. Metodologia

A lama abrasiva de mármore e granito foi coletada segundo a norma ABNT NBR 10007:2004 para amostragem de resíduos sólidos em uma empresa de Castelo, no estado do Espírito Santo, Brasil.^[13] As amostras foram secas ao ar para retirar a umidade, destorroadas e passadas por peneira com malha de 2,00 mm - ASTM 200 mesh/Tyler, para obtenção de uma amostra de granulometria mais fina e remoção materiais de maior granulometria como cascalhos, galhos, folhas etc. Após esta etapa, efetuou-se o quarteamento da amostra conforme a Norma, e a amostra foi armazenada em local adequado, e denominada GRA. A partir da GRA, foi realizada a separação da fração magnética com o auxílio de um ímã e agitação magnética, denominada GRM e a fração não magnética denominada GRR.

Na amostra GRA foi realizado a determinação do ponto de carga zero (pH_{pcz}), que se refere ao pH em que a

superfície do solo possui carga neutra, a fim de identificar o melhor pH para os ensaios de adsorção. A determinação do teor total de ferro nas amostras (GRA, GRR e GRM) foi realizada pelo método da dicromatometria, proposta por BACCAN et al (2001).^[14]

Os ensaios de adsorção foram realizados utilizando-se 0,1 gramas de cada amostra (GRA, GRM e GRR) e adicionadas em tubos Falcon de 50,0 mL, com 25,0 mL de solução de corante azul de metileno (AM) preparado na concentração $15,0 \text{ mg.L}^{-1}$ e em pH 3,0. Os tubos foram colocados em uma mesa agitadora dentro de uma cabine escura com agitação constante por 24 horas. O processo foi avaliado por meio de um espectrofotômetro UV/Visível modelo DR 5000 em um comprimento de onda de 664 nm.

A síntese dos fotocatalisadores foi feita pelo método de coprecipitação adaptado de Lelis (2003),^[15] onde a solução contendo o ferro extraído foi transferido para um bquer de 400 mL, foi adicionado cerca de 50 mL de água destilada, aqueceu-se até as proximidades do ponto de ebulição. No processo de obtenção do precursor do fotocatalisador, empregou-se uma solução aquosa de hidróxido de amônio (NH_4OH) e adicionada lentamente sobre a solução contendo os íons de ferro (III). O precipitado obtido foi lavado com acetato de amônia, centrifugado e seco em estufa em temperatura de 80°C por 24 horas. Triturado, peneirado e levado à mufla a 450°C por 2 horas, para a obtenção do fotocatalisador. Os fotocatalisadores sintetizados foram denominados FGRA (obtido a partir da amostra GRA), FGRR (obtido a partir da amostra GRR) e FGRM (obtido a partir da amostra GRM). Posteriormente, foi feita a caracterização das amostras GRA, GRM e GRR e das amostras sintetizadas FGRA, FGRR e FGRM por difratometria de raios X usando um difratômetro D8 Discover (Bruker, EUA) com radiação $\text{K}\alpha\text{Cu}$ ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) e velocidade de varredura de 1° min^{-1} numa faixa de 2θ $10\text{--}90^\circ$.

Para verificar a eficiência de adsorção e degradação do corante azul de metileno (AM) pelos processos Fenton e foto-Fenton heterogêneo foram realizados ensaios utilizando 50,0 mL de solução de $20,0 \text{ mg.L}^{-1}$ de azul de metileno (Neon, Brazil) preparada em pH natural. A solução foi colocada em contato com as amostras (GRA, GRM, GRR, FGRA, FGRR e FGRM) e deixadas no escuro por uma 1 hora para avaliar a capacidade de adsorção. O experimento foi realizado em um bquer de 100 mL nas seguintes condições: sistema I: 50,0 mL de solução de AM; sistema II: 50 mL de solução AM e 0,5 mL de H_2O_2 $0,03 \text{ mol.L}^{-1}$; sistema III: 50,0 mL de solução de AM, 0,5 mL de H_2O_2 $0,03 \text{ mol.L}^{-1}$ e 20 mg do fotocatalisador FGRA; sistema IV: 50,0 mL de solução de AM, 0,5 mL de H_2O_2 $0,03 \text{ mol.L}^{-1}$ e 20 mg do fotocatalisador FGRR; sistema V: 50,0 mL de solução de AM, 0,5 mL de H_2O_2 $0,03 \text{ mol.L}^{-1}$ e 20 mg do fotocatalisador FGRM. Os processos foto-Fenton foram

realizados na presença da luz UV e os processos Fenton foram realizados em uma cabine escura, e tiveram início com a adição do peróxido de hidrogênio, após o processo de adsorção. O monitoramento da descoloração foi realizado em um espectrofotômetro UV/Visível modelo DR 5000 (HACH, USA) em uma varredura de 400 a 800 nm, nos intervalos de tempo predeterminados (15, 30, 45, 60, 90 e 120 min).

3. Discussão dos resultados

O ponto de carga zero (pHPCZ) é o pH em que a superfície do adsorvente tem uma carga líquida nula, o que significa que as cargas positivas e negativas estão equilibradas, sendo esse um fator que é importante na adsorção. Quando o pH da solução é superior ao pHPCZ, a superfície do material adquire uma carga líquida negativa. Em contraste, quando o pH da solução é inferior ao pHPCZ, a superfície do material apresenta uma carga líquida positiva.^[16]

A Figura 1 apresenta os valores de pH inicial e final da amostra do rejeito de mármore e granito em um período de 24 horas em contato com a solução azul de metileno (AM). O pHPCZ foi determinado pela média dos valores em que os pH finais se mantiveram constantes, portanto, o valor de pHPCZ determinado para o rejeito de mármore e granito foi 6,26.

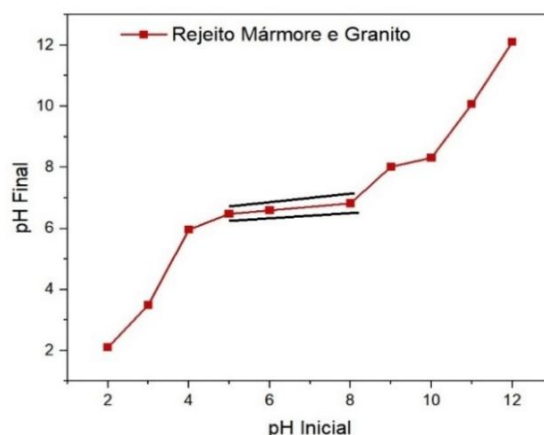


Figura 1: Valores de pH inicial e final do rejeito de mármore e granito.

A Figura 2 apresenta a caracterização das amostras por difratometria de raios X. É possível observar a presença de quartzo (SiO_2), mica, magnetita, calcita e albita em todas as amostras. Na amostra GRM, destacamos a presença da granalha e da magnetita, responsáveis pelo caráter magnético da amostra. Na GRR picos característicos de quartzo, mica, calcita e albita, proveniente do mármore e granito.

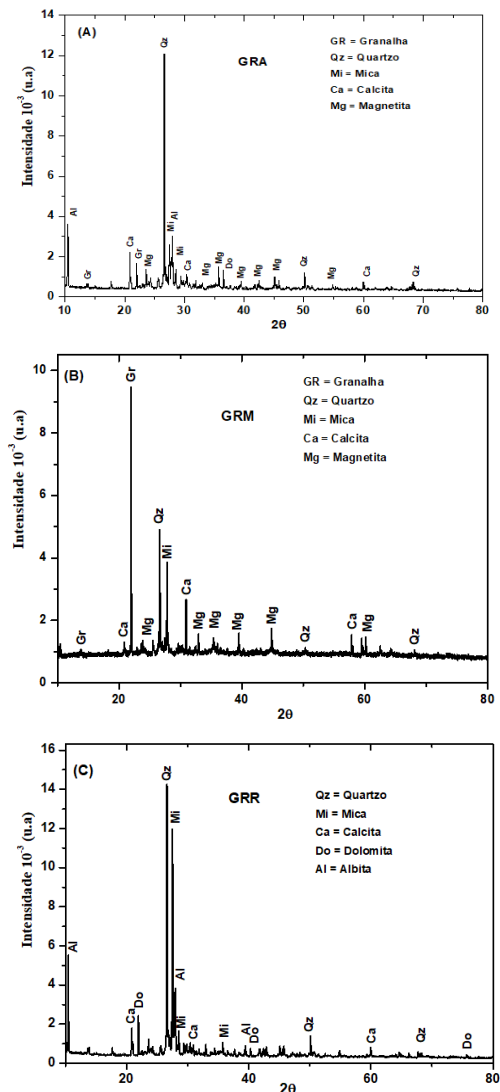


Figura 2. Difractogramas de raios X (radiação Cu K α) das amostras GRA (a), GRR (b) e GRM (c). Gr: Granalha, Qz: Quartzo, Mg: Magnetita, Mi: Mica, Al: Albita, Ca: Calcita e Do: Dolomita.

A Figura 3 apresenta a caracterização das amostras FGRA, FGRR e FGRM por difratometria de raios X. Observa-se picos característicos magnetita (Fe_3O_4) em maior proporção na FGRM e em menor proporção na FGRA, que é responsável pelo caráter magnético, pico característico do óxido de ferro (Fe_2O_3), de quartzo (SiO_2) e da hematita.

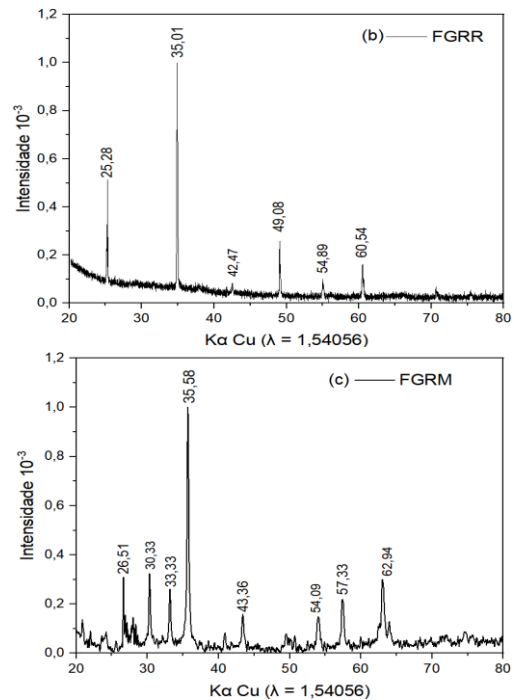
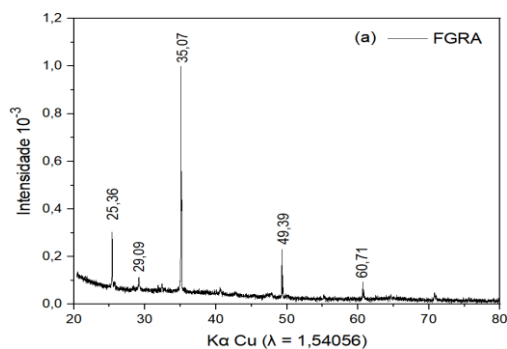
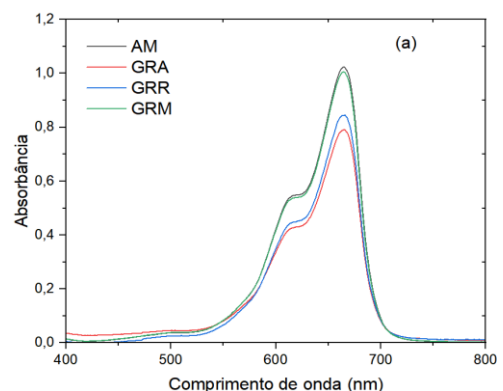


Figura 3: Difratometria de raios X das amostras FGRA (a), FGRR (b) e FGRM (c).

Os ensaios para verificar a eficiência de adsorção e degradação do corante AM foram realizados em pH natural da solução (6,2). O corante AM, em solução aquosa, pode estar presente em forma de espécies catiônicas e não dissociadas. O estudo de Salazar-Rabado et al. (2017) revela que, a um pH de 3,0, predomina a forma não dissociada do corante. No pH igual a 3,8 ocorre a coexistência das diferentes formas do corante e em pH superiores a 6,0, predominam quase exclusivamente as formas catiônicas do AM.^[16]

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para a adsorção do corante AM no tempo inicial de 10 minutos (a), após 60 minutos de agitação (b) e a concentração final após 24 horas de agitação (c). De acordo com os resultados apresentados no gráfico, é possível perceber que após o tempo de 24 horas a solução contendo apenas o corante não obteve alteração significativa na descoloração. As soluções contendo as amostras GRA, GRR e GRM se mostraram bem eficientes na descoloração do corante.



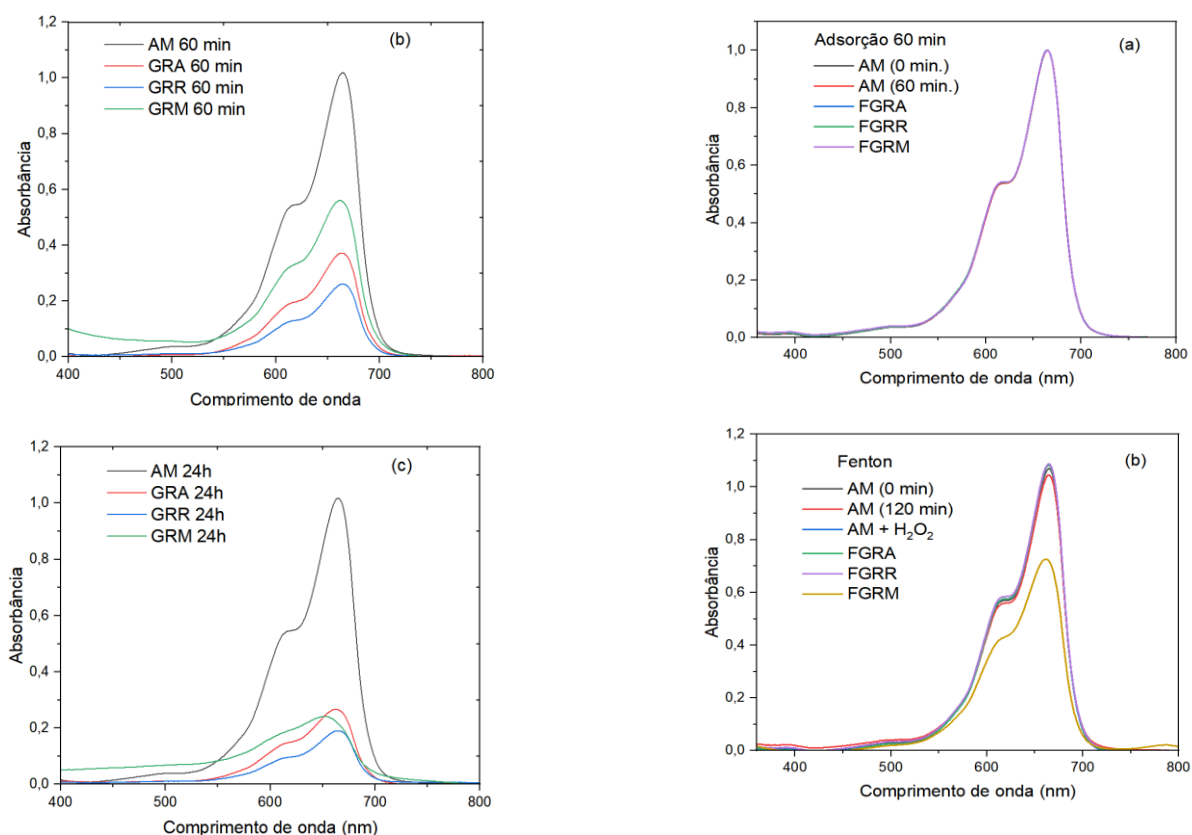


Figura 4: Adsorção do corante azul de metileno no tempo de 10 minutos (a), após 60 minutos (b) e após 24 horas (c).

O corante azul de metileno, em solução aquosa, pode estar presente em forma de espécies catiônicas e não dissociadas, a predominância de cada espécie pode variar a depender do pH trabalhado. O estudo de Salazar-Rabado et al. (2017) revela que, a um pH de 3,0, predomina a forma não dissociada do azul de metileno. No pH igual a 3,8 ocorre a coexistência das diferentes formas do corante e em pH superiores a 6,0, predominam quase exclusivamente as formas catiônicas do azul de metileno.^[18]

Antes de avaliar eficiência de descoloração do corante utilizando os fotocatalisadores FGRA, FGRR e FGRM, a solução de AM foi deixada em contato com os fotocatalisadores por 60 minutos, no escuro. Posteriormente, foi adicionado peróxido de hidrogênio e iniciou-se a fotodegradação utilizando os processo Fenton e foto-Fenton heterogêneo. A eficiência da descoloração da solução de AM utilizando os fotocatalisadores foram avaliadas nos períodos de 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos. A Figura 5 ilustra a mudança nos espectros de absorção do corante AM sob diferentes condições de descoloração com os fotocatalisadores, mostrando que o pico dos espectros de absorção diminui conforme o tempo de descoloração aumenta.

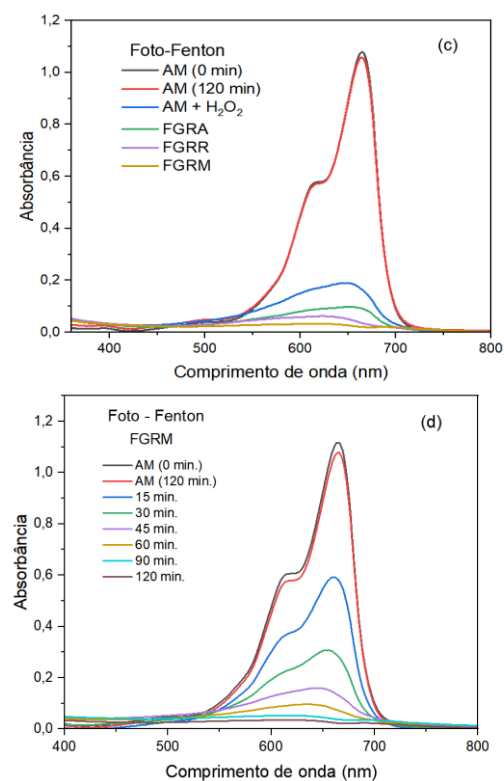


Figura 5: Mudança nos espectros de absorção do corante azul de metileno na adsorção (a), descoloração do corante em reações Fenton no intervalo de tempo de 120 minutos (b), descoloração do corante em reações foto-Fenton no intervalo de 120 minutos (c) e processo foto-Fenton nos intervalos de tempo de 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos (d).

A figura 5a representa os experimentos de adsorção e é possível perceber que não houve uma diminuição no

pico correspondente ao comprimento de onda 665 nm, indicando que não houve uma remoção do corante. O uso das amostras FGRA, FGRR e FGRM como adsorvente não apresentou nenhuma eficiência significativa, portanto, para aumentar sua capacidade de adsorção, seria necessário alterar o pH ou modificar a sua superfície.

Na figura 5b (Fenton) é possível observar a diminuição do pico característico no comprimento de onda de 665 nm com o fotocatalisador FGRM, essa diminuição não é muito significativa quando se observa os fotocatalisadores FGRA e FGRR no tempo de 120 minutos. Na figura 5c (foto-Fenton) observa-se o desaparecimento do pico característico no comprimento de onda 665 nm com os fotocatalisadores FGRA, FGRR e FGRM após 120 minutos de reação. A figura 5d mostra o desaparecimento do pico no comprimento de onda 665 nm com o catalisador FGRM nos intervalos de tempo de 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos nas reações foto-Fenton.

A figura 6 mostra a eficiência de degradação das reações Fenton heterogêneo (6a) e foto-Fenton heterogêneo (6b) calculadas de acordo com equação 1:

$$E_d = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

sendo C_0 (mgL^{-1}) a concentração inicial da solução do composto estudado e C_t (mgL^{-1}) a concentração da solução do composto estudado no tempo t .

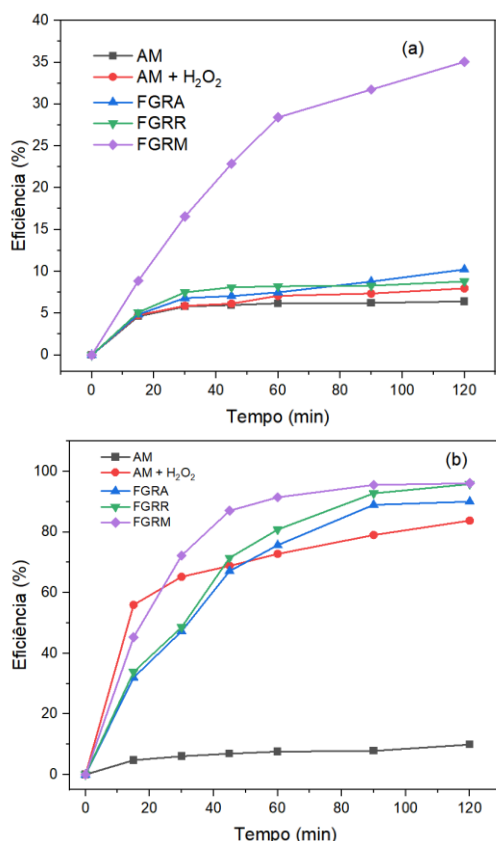


Figura 6: Eficiência de descoloração das reações Fenton (a) e foto-Fenton (b).

No processo Fenton, a eficiência de descoloração do corante utilizando os fotocatalisadores FGRA, FGRR e FGRM foi de 6,41%, 8,80% e 35,06% respectivamente após 120 minutos, demonstrando que, mesmo com a ausência de luz ocorreu a formação de radicais hidroxilas pela reação com o ferro presente nas amostras, catalisando a reação. Analisando o processo foto-Fenton, a solução contendo somente o corante não obteve alteração na descoloração, entretanto, com a adição de H_2O_2 , ocorreu uma descoloração do corante. Na presença dos catalisadores FGRA, FGRR e FGRM na reação de foto-Fenton heterogêneo, a eficiência de descoloração aumenta, alcançando eficiência de 90,01%, 95,81% e 96,07%, respectivamente. O processo foto-Fenton quando comparado ao Fenton, possui a vantagem das taxas de redução de Fe^{2+} ser melhorada devido a presença da luz, bem como a melhoria da utilização de H_2O_2 . A adição da luz ultravioleta aumenta a velocidade de regeneração do Fe^{2+} , criando um efeito combinado entre a luz UV e o Fe^{2+} na decomposição do H_2O_2 . As espécies oxidantes ativas, como o radical hidroxila ($\text{HO}\cdot$) são geradas em um intervalo de tempo muito breve em relação às reações de Fenton, levando a uma oxidação rápida dos contaminantes.^[17]

4. Conclusão

A reutilização do rejeito de mármore e granito neste estudo demonstrou ser uma alternativa sustentável e eficaz para a adsorção e degradação de corantes nos efluentes industriais. Obteve-se uma eficiência de 6,41%, 8,80% e 35,06% de descoloração do corante no processo Fenton utilizando os fotocatalisadores FGRA, FGRR e FGRM, respectivamente e uma eficiência de 90,01%, 95,81% e 96,07% de descoloração do corante no processo foto-Fenton utilizando os fotocatalisadores FGRA, FGRR e FGRM, respectivamente. Essa abordagem não apenas ajuda a resolver os problemas ambientais causados pelos rejeitos, mas também oferece novos métodos analíticos de baixo custo e alta eficiência para as indústrias. Além disso, essa prática valoriza os rejeitos, gerando benefícios tanto para a comunidade quanto para o meio ambiente.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao NCQP/UFES pelo fornecimento das instalações, a PRPPG/UFES, a CNPq e a FAPES ao Laboratório Multiusuário de Instrumentação - LabMInst (LabPetro-UFES, Brasil) pelas análises de FTIR (Acordo de Cooperação Técnica nº 0050.0022844.06.4), e as medidas de DRX (Acordo

de Cooperação Técnica nº CT-Infra 01/2007- FINEP 0202/08)7.

7. Referências

- [1] AGUIAR, L.L.; TONON, C.B.; NUNES, E.T.; BRAGA, A.C.A.; NEVES, M.A.; DAVID, J. A. O. Mutagenic potential of fine wastes from dimension stone industry. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, v. 125, p. 116-120, mar. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651315301834>. Acesso em: 26 jun. 2025
- [2] ZULCAO, R.; CALMON, J. L.; REBELLO, T. A.; VIEIRA, D. R. Life cycle assessment of the ornamental stone processing waste use in cement-based building materials, *Construction and Building Materials*, v. 257, out. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820315282?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [3] SEDAGÃE, A. M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products, *Applied Clay Science*, v. 30, p. 42-52, ago. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131705000384>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [4] NAYAK, S. K. SATAPATH, A.; MANTRY S. Use of waste marble and granite dust in structural applications: A review. *Journal of Building Engineering*. v. 46, abril 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103742>. Acesso em: 26 jun 2025.
- [5] SCOLARO, T. P.; SILVESTRO, L.; RUIVIARO, A. S.; de AZEVEDO, A. R. G.; MONTEIRO, S. N.; PELISSER, F. Effect of Ornamental Stone Waste Incorporation on the Rheology, Hydration, Microstructure, and CO₂ Emissions of Ordinary Portland Cement. *Materials*, v. 15, p. 401, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/2/401>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [6] BENKHAYA, S.; M' RABET, S. HARFI, A. E. A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes, *Inorganic Chemistry Communications*, 2020, 115, 107891
- [7] MARQUES, F.C.; SILVA, J.C.M.; LIBARDI, C.P.; CARVALHO, R.R.; SEQUINE, G.F.; VALANE, G.M. Hydrogen production by photovoltaic electrolysis using aqueous waste from ornamental stones industries. *Renew. Energy*, v. 152, p. 1266-1273, junho 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120301786>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [8] ARAÚJO, B. A.; SOUZA, J. E. S. de; SARMENTO, K. F.; REBOUÇAS, L. D.; MEDEIROS, K. M. de; LIMA, C. A. P. de. Processos oxidativos avançados aplicados no tratamento de efluentes de produção de membranas: uma revisão. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.], v. 4, pág. e27210414253, abril 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/14253>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [9] LINO, L. F. M. Aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes da indústria têxtil e degradação de corantes. 2021. Trabalho de Formatura (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2021.
- [10] FERREIRA, S. A. D.; DONADIA, J. F.; GONÇALVES, G. R.; TEIXEIRA, A. L.; FREITAS, M. B. J. G.; FERNANDES, A. A. R.; LELIS, M. F. F. - Photocatalytic Performance of Granite Waste in the Decolorization and Degradation of Reactive Orange 122. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, p. 103-144, junho 2019.
- [11] OLIVEIRA, L. C. A.; FABRIS, J. D.; PEREIRA, M. C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. *Química Nova*, v. 36, n. 1, p. 123-130, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000100022>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- [12] MAGNAGO, L. B.; ROCHA, A. K. S.; PEGORETTI, V. C. B.; FERREIRA, S. A. D.; LELIS, M. F. F.; FERREIRA, S. A. D. NiFe₂O₄ synthesized from nickel recycled of spent Ni-MH batteries and their applications as a catalyst in a photo-Fenton process and as an electrochemical pseudocapacitor. *International Journal of Ionics*, v. 25, p. 2361-2372, maio 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11581-018-2623-2>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- [14] BACCAN, N. A. *Química analítica quantitativa*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.
- [15] LELIS, M. F. F. Ferritas dopadas com níquel e cobalto: síntese, caracterização e ação catalítica na oxidação do monóxido de carbono. 2003. Programa de Pós - Graduação (Doutorado em Química), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG).

[16] GUIMARÃES, B. Q.; BETIM, F.S.; SANTANA, I. L.; Pereira, A. V.; BRESSIANI, T. S. C.; SIQUEIRA, B. M. M.; LELIS, M. F. F. L.; MOURA, P. R. G. M. Biosorbents Used to Remove Methylene Blue Dye in Aqueous Solutions: a environmental chemistry education propose, Revista Virtual de Química, v. 14, n. 2, p 154-166, nov. 2021. Disponível em: <https://rvq.sbq.org.br/pdf/v14n2a07>. Acesso em: 26 jun. 2025.

[17] JANSSENS, R.; CRISTOVAO, M. B.; BRONZE, M. R.; CRESPO, J. G.; PEREIRA, V. J.; LUIS, P. J. Coupling of nanofiltration and UV, UV/TiO₂ and UV/H₂O₂ process for the removal of anti-cancer drugs from real secondary wastewater effluent. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 7, 103351. out 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S213343719304749?via%3Dihub>. Acesso em: 26 jun. 2025