

Preparação de fotocatalisadores a partir de rejeito de minério de ferro para remoção de contaminantes ambientais

Souza, T.G^{1*}; Tongo, C.V.R.C.¹; Neves, V. L. O.¹; Neves, T. R.²; Lelis, M. F. F.¹; Ferreira, S. A. D.¹

¹ Departamento de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

² Programa de Pós-graduação em Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

* e-mail: thalyta.souza@edu.ufes.br

Resumo

Os efluentes da indústria têxtil contêm elevados teores de corantes sintéticos, substâncias tóxicas e resistentes à degradação, que representam um desafio crescente para o tratamento de águas residuais. Este trabalho propõe a valorização de rejeitos de mineração de ferro por meio da síntese de ferritas com propriedades fotocatalíticas, aplicadas na degradação do corante azul de metileno (AM) via processo foto-Fenton heterogêneo. As amostras foram obtidas por coprecipitação a partir de rejeitos ultrafinos (FRUFF) e arenosos (FRFF), ambos coletados na Mina de Fazendão (MG). As caracterizações por DRX, MEV e FTIR confirmaram a presença das fases cristalinas de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), com diferenças morfológicas entre as amostras que influenciaram sua atividade catalítica. A amostra FRUFF apresentou desempenho superior, com 97,38% de descoloração do corante em 60 minutos, além do maior coeficiente de reação ($k = 0,0403 \text{ min}^{-1}$), evidenciando sua maior eficiência na geração de radicais hidroxila. Os resultados demonstram o potencial dos rejeitos como precursores de fotocatalisadores sustentáveis e eficientes para aplicação em processos avançados de tratamento de efluentes.

Abstract

Textile industry effluents contain high concentrations of synthetic dyes, which are toxic and resistant to degradation, posing a growing challenge for wastewater treatment. This study proposes the valorization of iron mining waste through the synthesis of ferrites with photocatalytic properties, applied to the degradation of methylene blue (MB) via the heterogeneous photo-Fenton process. The samples were synthesized by coprecipitation using ultrafine (FRUFF) and sandy (FRFF) iron ore tailings, both collected from the Fazendão Mine (Minas Gerais, Brazil). Characterizations by XRD, SEM and FTIR confirmed the presence of hematite (Fe_2O_3) and magnetite (Fe_3O_4) crystalline phases, along with morphological differences that influenced catalytic performance. The FRUFF sample exhibited superior efficiency, reaching 97.38% discoloration in 60 minutes, with the highest reaction rate constant ($k = 0.0403 \text{ min}^{-1}$), indicating enhanced hydroxyl radical generation. The results demonstrate the potential of mining waste as a precursor for sustainable and efficient photocatalysts in advanced industrial wastewater treatment technologies.

Keywords (*Palavras chaves*): Mining tailings; photocatalysis; methylene blue; photo-Fenton process

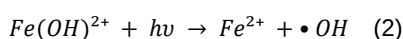
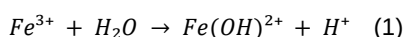
1. Introdução

O minério de ferro ocupa atualmente a terceira posição entre os produtos mais exportados pelo Brasil, consolidando-se como um recurso de grande interesse econômico [1]. Entretanto, o processo de beneficiamento desse minério gera grandes volumes de rejeitos, cuja disposição inadequada tem resultado em significativos impactos socioambientais, como evidenciado nos recentes rompimentos de barragens. Diante desse cenário, a valorização desses resíduos tem se tornado uma alternativa promissora, especialmente por meio da produção de novos materiais com aplicações tecnológicas relevantes, como as ferritas [2,3].

As ferritas são óxidos de ferro com estrutura espinélio que apresentam propriedades elétricas, magnéticas e catalíticas. Tais características possibilitam sua aplicação em processos de remoção de poluentes, atuando como adsorventes, catalisadores e, especialmente, fotocatalisadores em reações químicas assistidas por luz, como os Processos Oxidativos Avançados (POAs) [4-6].

Os POAs têm se destacado por sua capacidade de degradar compostos orgânicos recalcitrantes, incluindo corantes, antibióticos, agrotóxicos e outros contaminantes emergentes presentes em efluentes industriais. Tais processos operam por meio da geração de espécies reativas, principalmente o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que possui elevado potencial oxidante. Dentre os POAs, destacam-se a fotocatálise, a fotólise, o processo Fenton e o processo foto Fenton, sendo este último amplamente investigado por sua alta eficiência e custo relativamente baixos, especialmente quando comparado a métodos convencionais, como a adsorção por carvão ativado [7-10].

O processo foto Fenton combina peróxido de hidrogênio, radiação ultravioleta e íons de ferro como catalisadores, promovendo reações redox que ampliam a geração de $\bullet\text{OH}$ (reações 1 e 2). Descoberto na década de 1980, esse mecanismo mostrou que a irradiação dos complexos férricos (Fe^{3+}) favorece sua redução a Fe^{2+} , intensificando a produção de radicais e aumentando significativamente a eficiência do sistema. As reações envolvidas são descritas a seguir [9]:



Dentre os diversos compostos orgânicos presentes em efluentes, os corantes sintéticos são considerados especialmente problemáticos, devido à sua toxicidade, estabilidade química e resistência à degradação biológica. O azul de metileno, um corante catiônico amplamente utilizado na indústria têxtil, tem sido frequentemente empregado como molécula modelo em

estudos de degradação, por sua representatividade e facilidade de monitoramento espectrofotométrico [9-12].

Apesar das resoluções brasileiras vigentes, como a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, e a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011 [13,14], que estabelecem diretrizes para o lançamento de efluentes, os limites para diversos contaminantes emergentes ainda não foram definidos, o que contribui para a persistência de impactos ambientais significativos sobre os corpos hídricos.

Paralelamente, os desafios ambientais decorrentes da exploração excessiva de recursos naturais e da geração crescente de resíduos reforçam a necessidade de soluções integradas que unam valorização de resíduos e tratamento eficiente de poluentes. Nesse contexto, o uso de rejeitos de mineração como precursores na síntese de ferritas com propriedades fotocatalíticas representa uma alternativa viável e sustentável.

O presente trabalho propõe a utilização de rejeitos de mineração de ferro como matéria-prima para a produção de ferritas, avaliando seu desempenho como fotocatalisadores na degradação do corante azul de metileno em meio aquoso, utilizando o processo foto Fenton como abordagem de tratamento avançado.

2. Metodologia

2.1 Preparo das amostras

As amostras de rejeito de mineração de ferro, classificadas como rejeito arenoso e rejeito ultrafino, foram coletadas na Mina de Fazendão em Mariana, Minas Gerais (MG). A amostra foi seca ao ar, e em seguida realizado o quarteamento e homogeneização segundo a norma (ABNT 10007, 2004) [15] e passadas por peneira com malha de 2,00 mm. A determinação do teor total de ferro nas amostras foi realizada pelo método de dicromatometria, proposta por BACCAN et al (2001) [16].

Duas sínteses foram realizadas pelo método de coprecipitação, adaptado de LELIS (2003) [17]. Para a amostra 1, foram utilizados 5,7753 g de rejeito ultrafino de mineração de ferro, tratados com 30,00 mL de HCl (37%, P.A.) sob aquecimento em banho de areia a 80 °C até completa evaporação. Após esse processo, foram adicionados 30,00 mL de água destilada com reaquecimento até ebulição, seguido de filtração e lavagem do resíduo com solução aquecida de HCl a 1% (m/m). A solução obtida foi transferida para um béquero de 400 mL, adicionando-se 50,0 mL de água destilada sob aquecimento. Em seguida, hidróxido de amônio (NH_4OH) foi adicionado sob agitação constante até completa precipitação dos hidróxidos de ferro. O material precipitado foi filtrado, lavado com solução de

acetato de amônio a 10% (NH_4Ac), centrifugado, seco em estufa a 80°C por três dias, desagregado e peneirado em malha de 0,075 mm (ASTM 200 mesh/Tyler). Por fim, foi calcinado em mufla a 450°C .

A amostra 2 foi preparada com 5,0675 g de rejeito arenoso de minério de ferro, seguindo o mesmo procedimento adotado para a amostra 1. Os materiais obtidos foram denominados FRUFF (proveniente do rejeito ultrafino) e FRFF (rejeito arenoso).

2.2 Caracterização das amostras (DRX, FTIR, MEV)

As ferritas foram caracterizados por difratometria de raios X (DRX), por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os espectros de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram realizados a fim de investigar grupos funcionais nas ferritas. As análises foram realizadas no intervalo de 4000 cm^{-1} a 650 cm^{-1} , em resolução de 4 cm^{-1} e 16 scans, adquiridos em espectrômetro Agilent Cary 630, do Laboratório Multiusuário de Instrumentação (LabMInst/ LabPetro/ UFES).

Os difratogramas de raios X das amostras foram obtidos em um equipamento D8 DISCOVER (Bruker, EUA) com radiação $\text{CuK}\alpha$ e comprimento de onda $\lambda=1,5406\text{ \AA}$, que opera a uma voltagem de 40KV com 30mA de corrente. As amostras em forma de pó foram analisadas em um intervalo de varredura de 2θ , entre 10° a 90° , com passo angular de $0,01^\circ$ e tempo de aquisição de 1 segundo por passo no Laboratório de Difratometria de Raios-X – LDX (LabPetro/UFES).

Para avaliar a morfologia foram obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em microscópio eletrônico de varredura Superscan SSX-550 (Shimadzu, Japão) com AccV 25,0 kV e sonda 4,0. realizadas no Laboratório de Ultraestrutura Celular Carlos Alberto Redins – LUCCAR (CCS/UFES).

2.3 Teste de fotodegradação

A descoloração do corante azul de metileno (AM) foi investigada em pH 6,2, empregando 50,00 mL de solução de AM na concentração de $50,0\text{ mg L}^{-1}$. Os materiais sintetizados (FRUFF e FRFF) foram utilizados como fotocatalisadores para promover a degradação do corante. Os experimentos foram realizados em uma cabine de luz da T&M Instruments (modelo CL6 - 45s), equipada com uma lâmpada UV de comprimento de onda 253,7 nm e potência de 18 W.

Foram montados quatro sistemas distintos, cada um contendo 50,00 mL da solução do corante AM 50 mg.L^{-1} em béqueres de 100 mL, para comparar os efeitos

catalíticos:

- i) 40,00 mg de FRUFF + 2,00 mL de H_2O_2 ($0,03\text{ mol L}^{-1}$);
- ii) 40,00 mg de FRFF + 2,00 mL de H_2O_2 ($0,03\text{ mol L}^{-1}$);
- iii) 2,00 mL de H_2O_2 ($0,03\text{ mol L}^{-1}$) (fotólise);
- iv) 50,0 mL de solução de AM (controle).

Inicialmente, foi realizada uma etapa de equilíbrio de adsorção por 60 minutos no escuro. A fotodegradação foi então iniciada com a adição do peróxido de hidrogênio, e a evolução da concentração do corante foi monitorada por espectrofotometria UV-Vis, no comprimento de onda máximo do AM ($\lambda = 665\text{ nm}$) [18,19].

3. Discussão dos resultados

A composição dos rejeitos foi determinada por análise volumétrica utilizando o método de dicromatometria. Os resultados indicaram que o rejeito arenoso apresentou teor de Fe_2O_3 de 28,67% (m/m), enquanto o rejeito ultrafino apresentou um valor significativamente superior, com 53,61% (m/m). Esses dados demonstram a maior concentração de óxidos de ferro na fração ultrafina, o que pode influenciar diretamente o rendimento e a eficiência dos materiais sintetizados na aplicação fotocatalítica.

A caracterização por difração de raios X foi utilizada para identificar as fases cristalinas presentes nas amostras FRUFF e FRFF. Os difratogramas (Figura 1) revelam a formação de estruturas cristalinas compatíveis com as fases de hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), com picos bem definidos em $2\theta = 24,17^\circ$; $33,19^\circ$; $35,67^\circ$; $49,54^\circ$; $54,18^\circ$; $57,68^\circ$; $62,60^\circ$; $64,06^\circ$ e $72,02^\circ$. A presença de múltiplas reflexões permite confirmar a formação de ferritas do tipo espinélio, comuns em materiais contendo ferro.

A amostra FRFF apresentou picos com maior intensidade relativa, sugerindo uma maior cristalinidade em comparação com a FRUFF. A coincidência de alguns picos de magnetita e maghemita, especialmente em $35,67^\circ$, indica possível coexistência dessas fases, o que é comum em sínteses conduzidas a temperaturas moderadas.

A identificação das fases foi realizada com base nos padrões da base de dados JCPDS/ICDD, sendo os mais representativos: Hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$): JCPDS 33-0664; Magnetita (Fe_3O_4): JCPDS 19-0629; Maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$): JCPDS 39-1346.

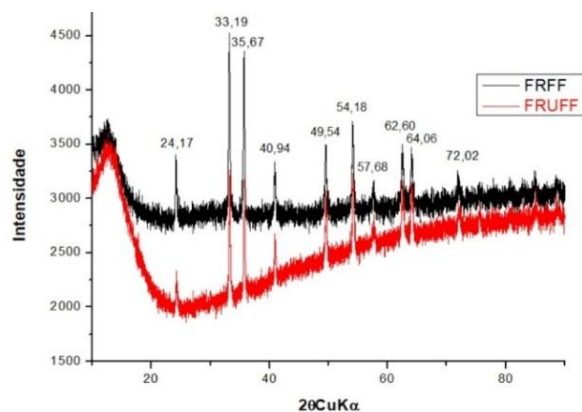


Figura 1 – Difratoograma de raios -X das amostras FRFF e FRUFF

A região entre 1000 e 650 cm^{-1} revelou bandas características atribuídas às ligações Fe–O, típicas de estruturas de ferritas, como hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4). As bandas mais intensas abaixo de 700 cm^{-1} são consistentes com a formação das fases esperadas, corroborando os resultados obtidos por DRX. Observa-se que a amostra FRUFF apresenta uma intensidade mais acentuada nas bandas de ligações de grupos hidroxila –OH e H–O–H, sugerindo maior retenção de água adsorvida na superfície dos materiais ou resíduos hidroxilados em sua estrutura. Espectros de FTIR para óxidos de ferro são bem estabelecidos, associando a presença de magnetita a banda de absorção em 650 cm^{-1} , devido ao alongamento do grupo Fe–O. Bandas entre 1000-1100 cm^{-1} podem ser associadas ao estiramento de ligações de grupos hidroxila O–H ou a sua deformação pela água absorvida [19-21].

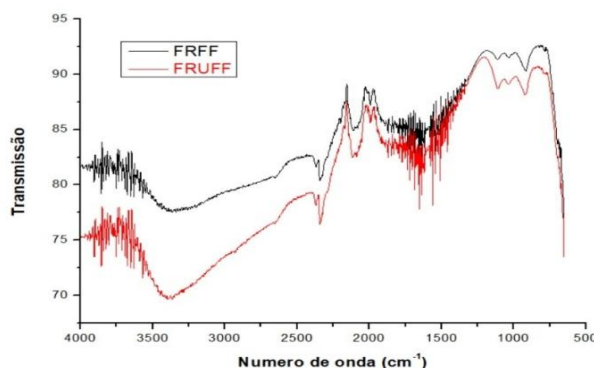


Figura 2 - Espectro de FTIR da amostra FRFF e FRUFF

A caracterização morfológica das amostras FRUFF e FRFF foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme apresentado nas Figuras 3(a) e 3(b). As imagens revelam diferenças marcantes

na morfologia das ferritas sintetizadas a partir dos dois tipos de rejeito de mineração de ferro.

A amostra FRUFF, sintetizada a partir do rejeito ultrafino, apresenta morfologia irregular, com partículas de formas diversas e altamente agregadas. Observa-se a formação de aglomerados porosos, o que sugere uma maior área superficial e presença de partículas menores, características desejáveis para aplicações em catálise heterogênea. Essa morfologia pode estar relacionada à natureza mais fina do rejeito precursor, que favorece maior nucleação durante o processo de coprecipitação.

Por outro lado, a amostra FRFF, derivada do rejeito arenoso, exibe partículas de maiores dimensões e superfícies mais compactas e bem definidas, com menor grau de agregação. A morfologia observada sugere uma estrutura mais densa e estável, potencialmente vantajosa em aplicações que demandem menor lixiviação ou maior resistência estrutural.

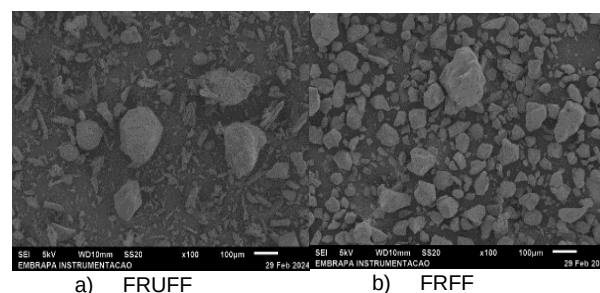


Figura 3 – Micrografias obtidas por MEV das ferritas sintetizadas: a) FRUFF e b) FRFF

As micrografias evidenciam, que o tipo de rejeito influencia diretamente a morfologia dos materiais sintetizados, o que pode impactar seu desempenho em processos como a fotodegradação de corantes.

A caracterização das amostras por DRX, FTIR e MEV confirma a formação de ferritas com estrutura cristalina definida, presença de óxidos de ferro como hematita (Fe_2O_3) e magnetita (Fe_3O_4), além de morfologias distintas influenciadas pela natureza do rejeito de origem [20-22]. A amostra FRUFF apresentou maior grau de agregação e possível maior área superficial, como evidenciado pelas micrografias de MEV, o que pode favorecer sua interação com o corante em meio aquoso. Os dados estruturais e morfológicos obtidos fornecem indícios do potencial diferencial de cada material na degradação do azul de metileno, cujos resultados catalíticos são discutidos a seguir.

A Figura 4 mostra o monitoramento espectroscópico da descoloração do corante AM utilizando FRFF e FRUFF como fotocatalisadores. Inicialmente as soluções de AM foram deixadas em contato com o catalisador por 60 minutos no escuro para se avaliar o processo de adsorção. Após este período, o peróxido de hidrogênio

foi adicionado para iniciar a reação foto Fenton heterogêneo.

A eficiência de degradação foi calculada a partir da Equação 1, sendo C_0 a concentração inicial do corante no tempo zero, e C_t , a concentração nos intervalos de tempo

$$Ef = 100 \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

A amostra FRUFF (rejeito ultrafino) apresentou o melhor desempenho catalítico, atingindo cerca de 97% de degradação do corante em apenas 60 minutos de reação, com estabilização próxima de 100% ao final de 120 minutos. Esse rápido decaimento da absorbância reflete uma cinética mais eficiente, possivelmente favorecida por sua maior área superficial e abundância de grupos hidroxila, como evidenciado pelas análises de MEV e FTIR [19-21].

Já a amostra FRFF (rejeito arenoso) apresentou um desempenho ligeiramente inferior, atingindo cerca de 92% de degradação apenas ao final de 120 minutos. A curva de absorbância associada a esse sistema mostra um decaimento mais lento e gradual, indicando menor taxa de geração de espécies reativas no início da reação, possivelmente em razão de sua morfologia mais compacta e menor exposição de sítios catalíticos ativos

O sistema de controle, composto apenas por peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e azul de metileno (AM), apresentou desempenho inferior em comparação aos sistemas contendo ferritas, atingindo cerca de 82% de degradação após 120 minutos. Apesar disso, nota-se que o processo ocorre de forma mais lenta, principalmente nas fases iniciais da reação (ex.: ~34% em 20 minutos), o que evidencia a eficiência limitada da fotólise do peróxido na geração de radicais hidroxila ($\bullet OH$) em ausência de catalisadores. Esse resultado reforça o papel essencial das ferritas na intensificação do processo oxidativo e na aceleração da degradação do corante, como observado nos sistemas FRUFF e FRFF.

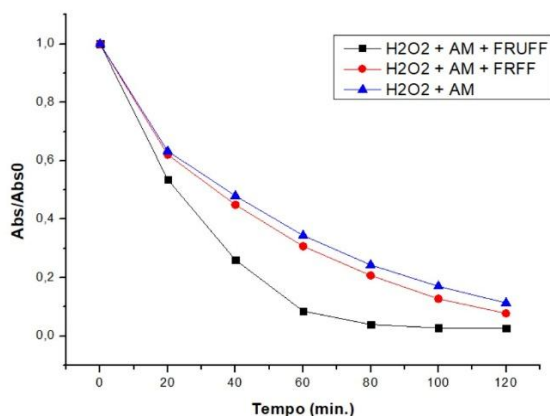


Figura 4 - Degradação de corante por processo fotocatalise

Os resultados confirmam a efetividade dos materiais sintetizados a partir de rejeitos de mineração como fotocatalisadores ativos, reforçando a viabilidade de seu uso em processos avançados de tratamento de efluentes contendo corantes sintéticos. A diferença de desempenho entre as amostras evidencia ainda o impacto da morfologia e da composição do precursor no comportamento catalítico final dos materiais.

Para avaliar a cinética da degradação do azul de metileno, aplicou-se o modelo de pseudo-primeira ordem, ajustando os dados experimentais à Equação 2

$$\ln \frac{C}{C_0} = -kt \quad (\text{Eq. 2})$$

O gráfico da Figura 5 apresenta os resultados dos ajustes lineares para os três sistemas investigados, a partir da razão entre as absorbâncias (Abs/Abs_0) ao longo do tempo de reação.

A amostra FRUFF demonstrou o maior coeficiente cinético, com $k=0,0403 \text{ min}^{-1}$, evidenciando sua elevada capacidade catalítica para geração de radicais hidroxila ($\bullet OH$) e rápida degradação do corante. Em comparação, a amostra FRFF apresentou constante $k=0,0212 \text{ min}^{-1}$, enquanto o sistema controle contendo apenas peróxido de hidrogênio exibiu o menor valor de $k=0,0143 \text{ min}^{-1}$, confirmando a contribuição fundamental das ferritas na intensificação do processo oxidativo [19].

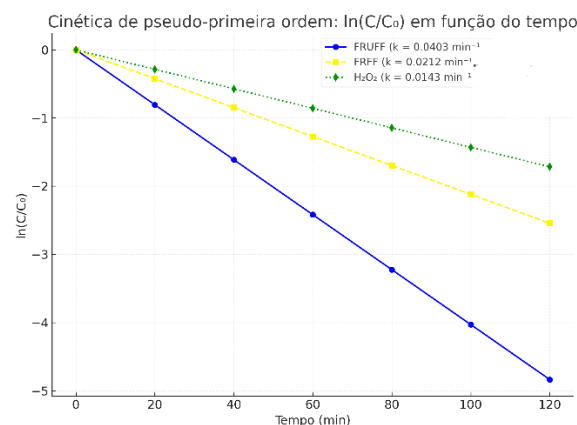


Figura 5 - Ajuste cinético de pseudo-primeira ordem para a degradação do azul de metileno

Esses resultados quantitativos corroboram os dados anteriores de caracterização estrutural e morfológica, evidenciando que a amostra FRUFF, por apresentar maior área superficial e presença de grupos funcionais hidroxila, favoreceu a degradação mais eficiente do corante.

4. Conclusão

Os resultados deste estudo demonstram que os rejeitos de mineração de ferro são fontes viáveis para a síntese de ferritas com propriedades fotocatalíticas, destacando-se a amostra FRUFF, derivada de rejeito ultrafino, que apresentou maior eficiência na degradação do azul de metileno. As análises de DRX, FTIR e MEV confirmaram a presença de fases ativas, como hematita e magnetita, bem como características morfológicas favoráveis à catálise, como alta agregação e possível maior área superficial. O processo foto Fenton heterogêneo mostrou-se eficiente, especialmente em sistemas contendo ferritas, promovendo elevada taxa de degradação em tempo reduzido. A utilização desses resíduos como matéria-prima para materiais catalíticos não apenas contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte de rejeitos, mas também se alinha ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento de efluentes industriais

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao NCQP/UFES, a PRPPG/UFES, ao CNPq, 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.

6. Referências

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. Minério de ferro se destaca no TOP 3 dos produtos mais exportados pelo Brasil em 2023; entenda o que é e como é produzido. Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/>

[2] CARMIGNANO, O. Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos. Tese (Doutorado) – Programa de PósGraduação em Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021, 113.

[3] CARMIGNANO, O.; VIEIRA, S.; Teixeira, A. P.; Lameiras, F.; Brandão, P. R.; Lago, R. J. Braz. Chem. Soc. V. 32, 10, p.1895-1911, 2021.

[4] 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. J. Environ. Chem. Eng., v. 7, p. 103-144, 2019.

[5] MAGNAGO, L. B. ; ROCHA, A. K. S. ; PEGORETTI, V. C. B. ; FERREIRA, S. A. D. ; LELIS, M. F. F. ; FERREIRA, S. A. D. Intern. J. Ionics, v. 25, p. 2361-2372, 2019.

[6] LORENZINI, L. Produção de materiais fotocatalisadores a partir do rejeito de mineração. 55 f. Monografia de final de curso (Graduação) - Curso de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

[7] AUGUSTO, T. M. Degradação de contaminantes orgânicos em água usando catalisadores de ferro obtidos da indústria de mineração. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais, 2019.

[8] FIOREZE, M.; SANTOS, E. P.; SCHMACHTENBERG, N. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 18, n. 1, 7 abr. 2014.

[9] NOGUEIRA, Raquel F. Pupo *et al.* Química Nova, v. 30, n. 2, p. 400 - 408, 2007.

[10] ROCHA, A. K. S. et al. Materials Research Bulletin, v. 113, p. 231-240, 2019.

[11] BIAZATI, L. B.; LORENZINI, L.; FERREIRA, S. A. D.; PORTO, A. O.; CASTRO, E. V. R.; FABRIS, J. D.; FREITAS, M. B. J. G.; LELIS, M. F. F. J. Braz. Chem. Soc. v. 33, n. 2, p. 135-142, 2022.

[12] MARQUES, F.C.; SILVA, J.C.M.; LIBARDI, C.P.; CARVALHO, R.R.; SEQUINE, G.F.; VALANE, G.M. Renew. Energy, v. 152, p. 1266-1273, 2020.

[13] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/federal>

[14] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução CONAMA nº 430/2011, 13 de maio de 2011. Disponível em <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

[16] BACCAN, N. A. *Química analítica quantitativa*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

[17] 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).

[18] MOURA, M. N. *et al.* Synthesis, *Chemosphere*, v. 182, p. 339–347, 2017.

[19] JENIFER, R. A.; MOURA, N. M.; MAGNAGO, L. B.; ROCHA, A. K. S.; COELHO, E. D.; FERREIRA, S. A. D.; LELIS, M. F. F.; FREITAS, M. B. J. G. J. Braz. Chem. Soci., v.36, p. 1-17, 2025.

[20] PANTA, P. C. Obtenção de nanopartículas de óxido de ferro por coprecipitação, sua estabilização com surfactantes e caracterização quanto à morfologia,

cristalinidade e comportamento magnético. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

[21] SALAMA, W.; AREF, M.; GAUPP, R. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 136, 1816–1826, 2015.

[22] POLONINI, V. P. Síntese e aplicação de óxidos mistos derivados do rejeito de beneficiamento de

minérios de ferro e casca de coco para remoção de contaminantes ambientais. Monografia de final de curso (Graduação) - Curso de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2024.