



CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ROCHA BASALTICA PARA APLICAÇÃO EM PROCESSOS DO TIPO FOTO-FENTON

NICOLLE S. PIRES^{1*}, AMANDA R. CARDOSO¹, AMANDA C. DA ROCHA¹, PATRÍCIA A. VIEIRA¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química
*e-mail: @ufu.br

RESUMO – O pó de basalto é um particulado de rocha vulcânica que apresenta estabilidade térmica, resistência mecânica, valência zero, baixo custo e alta disponibilidade. Este trabalho teve como objetivo caracterizar o resíduo de mineração do basalto e de propor uma nova rota de aplicação em processos do tipo foto-Fenton para degradação de contaminantes emergentes. Os procedimentos analíticos empregados de caracterização foram Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier com reflexão total atenuada (FTIR-ATR), Fluorescência de Raios X (FRX) e Difratomia de Raios X (DRX). Os resultados de MEV possibilitaram a verificação da morfologia irregular e baixa porosidade do resíduo pulverizado. Pelos resultados de DRX e FRX, foi verificada estruturas cristalinas e composição elementar, com elevada concentração de alumina, sílica e percentual considerável de hematita. As ligações desses óxidos metálicos puderam ser confirmadas pela varredura em FTIR-ATR. Constatou-se, diante da sequência de caracterizações e do levantamento de estudos recentes com catalizadores de fonte natural, que o pó de basalto tem potencial para aplicação como catalisador foto-Fenton heterogêneo (fonte de ferro).

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com alto potencial geológico, o qual possui um diversificado patrimônio em rochas, ricas em minerais. Atualmente, são produzidas cerca de 90 substâncias minerais diferentes e existem mais de 18 mil minas em funcionamento (IBRAM, 2019). Portanto é notório, que a mineração desenvolve um importante papel no setor econômico brasileiro, e segundo a Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do Ministério de Minas e Energia (SGM, 2021), este setor representou em 2019 2,4% do PIB (Produto Interno Bruto) nacional.

Dentre os minérios extraídos destaca-se o basalto, um tipo de rocha vulcânica, denominada rocha ígnea. Essa rocha é proveniente do arrefecimento e solidificação do magma, o qual é resultado de erupções

vulcânicas, tornando-se popularmente conhecida, por seu alto teor em óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio (Schiavon *et al.*, 2007).

Uma das principais aplicações do basalto é na fabricação de pisos e revestimentos. A mineração desse material, portanto, é uma prática comum e o pó de basalto em grandes quantidades é gerado como consequência dessa atividade (Bernabé, 2021). Porém, inúmeras aplicações e morfologias do basalto vêm sendo estudadas, dentre elas: Luchese *et al.* (2021) e Krhal *et al.* (2019) trazem estudos aplicando o pó de basalto residual como fertilizante natural; Hwang *et al.* (2018) descrevem sobre a capacidade de adsorção da zeólita de basalto; e Jiang *et al.* (2014) mostra que a fibra de basalto pode ser utilizada como suporte na síntese de um catalisador para tratamento de água.

Em tratamentos conhecidos como POA's ou processos de oxidação avançados, pode ser usada uma combinação de oxidantes (H_2O_2 , $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ e etc) com catalisadores (luz: UV, visível e solar; TiO_2 , Fe^{2+} , Fe_2O_3 e etc) que se mostram eficientes geradores de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) e/ou sulfato ($\bullet\text{SO}_4^{2-}$) contribuindo de forma rápida e eficiente no tratamento de diversas moléculas prejudiciais, levando a destruição das mesmas (Umar *et al.*, 2010). E, devido ao basalto possuir óxido de ferro em sua composição, apresenta o potencial de que esse mineral possa ser utilizado como catalisador em POA's como o Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$) e o foto-Fenton heterogêneos ($h\nu/\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$) (Saleh *et al.*, 2021).

Contudo, é necessário caracterizar o mineral para a melhor aplicação. Tendo isso em vista, tem-se na mineralogia a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregada para análise morfológica de rochas, sendo de suma importância para compreender a estrutura do material e relacionar com suas propriedades. Essa técnica consiste em um feixe de elétrons que incide sob o composto, fazendo com que este fique ionizado, liberando elétrons secundários e retroespalhados. A imagem de varredura consiste na contagem desses elétrons, obtendo-se uma resolução com 300.000 vezes de aumento (Duarte *et al.*, 2003).

Outra técnica amplamente empregada é a espectroscopia no Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), aplicável em líquidos, soluções, pós, fibras e até gases. Seu princípio de funcionamento se dá com o contato da radiação infravermelha com as amostras. Sendo assim, as moléculas irão vibrar na frequência atingida pela radiação infravermelha passando por um processo de absorção ou transmissão de energia. Assim é possível identificar, quais são as vibrações moleculares que indicam ligações químicas específicas presentes na amostra (Nandiyanto *et al.*, 2019).

Outra análise essencial para identificar as aplicabilidades do material e em quais áreas ele pode ser empregado sem trazer riscos ao meio é a fluorescência de raios X. Este é um procedimento utilizado para analisar a composição química de materiais sólidos.

Nesse processo, ocorre a incidência de raios X sob o material, fazendo com que elétrons mais internos se tornem excitados e se movam para camadas externas do átomo. Essa reconfiguração eletrônica possibilita que os elétrons externos se desloquem, a fim de preencher os espaços vazios nas camadas internas, ocorrendo à liberação de energia na forma de fluorescência. Através da luz emitida é possível então identificar as substâncias presentes, visto que cada elemento químico possui um espectro característico (Ribeiro *et al.*, 2017).

Por fim, a difratometria de raios X o DRX possibilita a caracterização das estruturas cristalinas de compostos sólidos, sendo de suma importância para correlacionar o arranjo estrutural das moléculas que formam o material com suas propriedades. Nessa técnica, ao incidir os raios X sob a amostra, o conjunto de elétrons dispostos no arranjo estrutural difratam os raios e através do padrão de difração é possível identificar o composto (Silva, 2020).

Portanto, este trabalho teve como objetivo a caracterização do pó de basalto e a, conseqüente, avaliação do potencial em processos do tipo foto-Fenton para degradação de contaminantes emergentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta e Preparação do Pó de Basalto

A amostra de pó de basalto foi obtida de solos pertencentes à região do Triângulo Mineiro. Para garantir uma faixa granulométrica mais homogênea a amostra foi moída durante 60 segundos em um moinho de disco oscilantes Herzog, no Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER – FEQUI/UFU).

Caracterização Morfológica

A verificação da morfologia do pó de basalto foi feita através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), na qual a uma amostra homogênea do pó de basalto foi acoplada a "stubs" de alumínio de 13 mm com o auxílio de uma fita de carbono e, posteriormente, submetidas ao processo de metalização com ouro utilizando um

equipamento de pulverização a vácuo LEICA, modelo EM SCD050 por 120 segundos a 50 mA. Dado o período para a metalização foram obtidas as imagens. As imagens da superfície de cada amostra foram registradas em equipamento Carl Zeiss, modelo EVO MA 10, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV – FEQUI/UFU).

Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier com reflexão total atenuada (FTIR-ATR)

A estrutura do pó de basalto foi investigada por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) utilizando um espectrofotômetro Perkin Elmer, modelo Spectrum Two, com acessório de reflexão total atenuada – ATR, com reflexão interna de seleneto de zinco (Miracle ATR – Single Reflection ZnSe/L1600115), no Laboratório do Núcleo de Bioprocessos (NUCBIO – FEQUI/UFU). Os dados da análise de FTIR-ATR foram tomados na região de número de onda entre 450 e 4000 cm^{-1} com resolução de 2 cm^{-1} . Foram registrados 32 “scans” por amostra analisada.

Fluorescência de Raios X (FRX)

A composição química do pó de basalto foi avaliada pela técnica analítica de Fluorescência de Raio-X em espectrômetro da marca Bruker modelo S8 Tiger realizadas em pastilhas prensadas de 10 g, obtidas pela prensa hidráulica manual Herzog, no Laboratório Multiusuário em Energias Renováveis (LAMER – FEQUI/UFU).

Difratometria de Raios X (DRX)

A caracterização mineralógica do pó de basalto foi realizada em um difratômetro de raios X de fabricação Shimadzu, modelo XRD 6000, localizado no Laboratório Multiusuários do Instituto de Química (LAMIQ – IQ/UFU) sob as seguintes condições: voltagem (kV): 40, corrente (mA): 30, ângulo de varredura (2θ): 10 – 90; passo de 0,02. O resultado obtido da linha de difração foi identificado por comparação com linhas-padrões obtidas no banco de dados *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização Morfológica

A morfologia da superfície do pó de rocha basáltica foi capturada nas imagens por MEV e são apresentadas na Figura 1.

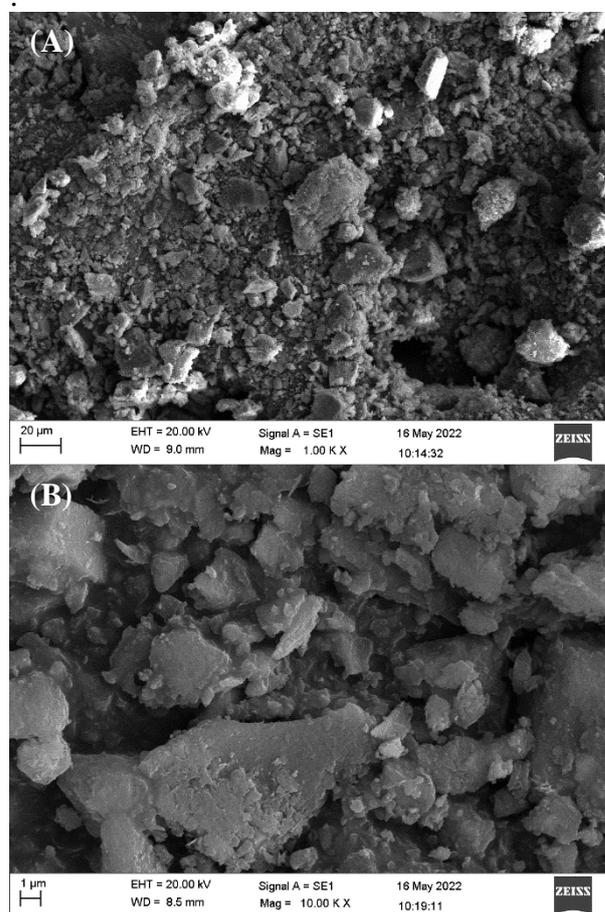


Figura 1: Imagens MEV de pó de basalto com aumento de (A) 1.000x e (B) 10.000x.

Na Figura 1A, com aumento de mil vezes, fica evidente que a amostra apresenta formato indefinido e heterogêneo com variedade de tamanhos na escala majoritária de 1-40 μm , aproximadamente. Como o material foi previamente moído em moinho de discos apresentou tamanho de partícula semelhante ao de siltes e areia fina conforme norma ABNT NBR 6502.

Na Figura 1B, com aumento de dez mil vezes, pode-se observar a ausência de poros, pouca porosidade, e que as partículas apresentam características irregulares e ásperas em sua superfície, similares ao pó de basalto caracterizado por Saleh *et al.* (2021).

Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier com reflexão total atenuada (FTIR-ATR)

As propriedades químicas da rocha também definem sua capacidade catalítica, sendo assim, o espectro de FT/IR está representado na Figura 2, sendo apresentadas as bandas de ligação de vários óxidos metálicos.

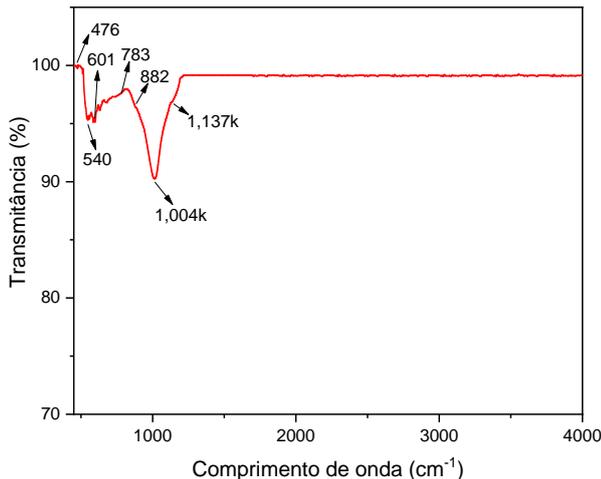


Figura 2: Espectro FTIR do pó de basalto.

Segundo Freitas *et al.* (2015) que também caracterizaram um material de composição argilosa, a argila bentonítica, que apresenta picos próximos a 476 cm^{-1} e a 540 cm^{-1} seriam representativos às flexões Si-O-Si e Al-O-Si, respectivamente. Além disso, os picos em 882 cm^{-1} , 1004 cm^{-1} e 1137 cm^{-1} encontrados no pó de basalto indicariam o estiramento atribuído à flexão de Si-H e Si-O para Si-O-H (Saleh *et al.*, 2021).

Fan *et al.* (2020) caracterizaram por FT/IR um mineral de silicato do tipo 2:1, a vermiculita, que é composta de folhas tetraedros de oxigênio de sílica e folhas octaedros coordenados de oxigênio de alumínio ou óxido de ferro. Estes autores demonstraram que a banda larga da ligação Fe-O aparece entre 601 cm^{-1} e 783 cm^{-1} , como indicado da Figura 1, representando a presença de Fe no basalto bruto, assim como, na vermiculita.

Fluorescência de Raios X (FRX)

O material de pó de rocha basáltica foi analisado quanto a sua composição química por FRX apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em peso) do pó de basalto.

Fórmula	Z	Concentração
SiO ₂	14	48,91%
Al ₂ O ₃ (Alumina)	13	15,14%
Fe ₂ O ₃ (Hematita)	26	13,24%
CaO	20	9,52%
MgO	12	4,49%
TiO ₂	22	3,35%
Na ₂ O	11	2,99%
K ₂ O	19	1,34%
P ₂ O ₅	15	0,51%
MnO	25	0,17%
V ₂ O ₅	23	0,10%
BaO	56	0,06%
SrO	38	0,05%
SO ₃	16	0,04%
CuO	29	0,03%
ZrO ₂	40	0,02%
Gd ₂ O ₃	64	0,02%
ZnO	30	0,01%
NiO	28	67 ppm
Nb ₂ O ₅	41	32 ppm
Ga ₂ O ₃	31	30 ppm
Rb ₂ O	37	24 ppm
Tb ₄ O ₇	65	1 ppm

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, observa-se que a amostra de basalto consiste principalmente de sílica (48,91%) e alumina (15,14%) caracterizando-a como um material argiloso (Luchese *et al.*, 2021). Espera-se da composição de rochas uma grande variedade de minerais e níveis consideráveis de potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P), entre outros nutrientes essenciais para plantas, e todos estes foram encontrados na composição do basalto analisado. Segundo Luchese *et al.* (2021) a presença significativa de CaO, MgO e Na₂O (9,52%, 4,49% e 2,99% respectivamente) neste produto tem a capacidade de reagir e promover um aumento de pH quando aplicado a solos e águas. Segundo Saleh *et al.* (2022) os materiais usados como catalisadores heterogêneos, fontes de ferro, apresentaram uma porcentagem de hematita entre 5% e 15%, sendo a encontrada nessa amostra no valor de 13,24%. Além disso, a presença de dióxido de titânio no basalto, um semiconductor

consolidado na literatura, apresentando percentual de 3,35% também encoraja a aplicação desta rocha em estudo em processos foto-catalíticos.

Difratometria de Raios-X (DRX)

O padrão DRX, apresentado na Figura 3, indicou a presença de quartzo, alumina e hematita como os principais componentes da amostra de basalto, conferindo a estabilidade da sua estrutura cristalina.

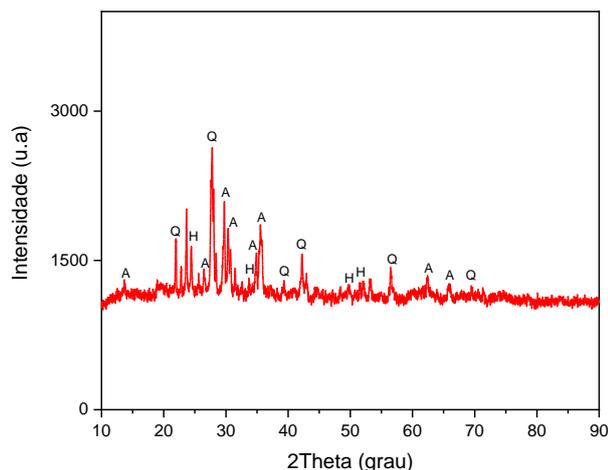


Figura 3: Padrão de difração de Raios-X do pó de basalto.

O mineral quartzo (Q) identificado possui estrutura cristalina hexagonal e caracteriza-se por aparecer em 2θ igual a $21,42^\circ$; $27,30^\circ$; $37,64^\circ$; $43,66^\circ$; $56,38^\circ$ e $70,08^\circ$. O grupo espacial para o quartzo mineral foi P 32 2 1 com parâmetros de rede de $a = b = 4,7736 \text{ \AA}$, $c = 5,3010 \text{ \AA}$ (ICSD: 41471).

A alumina (A) foi identificada na amostra de basalto com grupo espacial P 1 e com parâmetros de rede $a = 3,4009 \text{ \AA}$, $b = 2,7895 \text{ \AA}$ e $c = 7,0762 \text{ \AA}$ (ICSD: 173014). Seus picos característicos apareceram em 2θ igual a $12,48^\circ$; $26,14^\circ$; $29,02^\circ$; $31,94^\circ$; $34,54^\circ$; $36,56^\circ$; $62,02^\circ$; $67,04^\circ$.

A hematita (H), que também possui uma estrutura cristalina hexagonal com o grupo espacial R-3C, foi identificada em 2θ igual a $24,14^\circ$; $33,12^\circ$; $49,44^\circ$ e $54,02^\circ$ com valores dos parâmetros de rede $a = b = 5,0340 \text{ \AA}$, e $c = 13,7480 \text{ \AA}$ (ICSD: 22505).

Perspectiva para aplicação foto-Fenton

A morfologia da superfície e a distribuição do tamanho do particulado de basalto apresentam potencial para uma aplicação catalítica, apesar da baixa porosidade apresentada. As análises de FT/IR, FRX e DRX indicaram a composição argilosa da rocha basáltica, majoritariamente de óxidos de silício, alumínio e ferro. A quantidade de Fe_2O_3 encontrada da amostra foi alta suficiente para promover o uso do basalto como catalisador com fonte de ferro e o foto-Fenton é uma opção atraente. O foto-Fenton clássico é limitado a uma faixa estreita de pH (2,5–3,0) e isso requer acidificação seguida de neutralização, aumentando assim, os custos do tratamento (Gomes Jr *et al.*, 2020). No entanto, a presença de óxidos alcalinos, que podem se solubilizar na amostra, dificultaria a aplicação de processos em condições ácidas e a vantagem estaria então na aplicação do foto-Fenton heterogêneo em pH próximo a neutralidade. Processos do tipo-Fenton heterogêneo podem ocorrer com o emprego de catalisadores naturais, como compostos argilosos e zeólitas que contêm ferro sólido de valência zero em sua composição, e são empregados aliando o catalisador a oxidantes como: persulfato, peróxido de hidrogênio e luz em pH neutro ou sem correção (Rezaei e Vione, 2018).

Assim, catalisadores naturais se tornaram uma tendência nos estudos de Fenton e foto-Fenton, conferindo acessibilidade, ótima atividade catalítica e capacidade de reutilização, devido as espécies de Fe(II) e Fe(III) encontradas nas superfícies desses minerais. Ainda vale ressaltar, as vantagens apresentadas quando a luz do sol é utilizada como oxidante (foto-Fenton), já que os minerais são bem responsivos por possuírem um *gap* de energia estreito (Lu *et al.*, 2021).

Compósitos naturais foram caracterizados com o objetivo da aplicação foto-fenton por diversos autores, essas caracterizações são apresentadas na Tabela 2.

Rodríguez *et al.* (2021) compararam a eficiência dos processos de Adsorção, Fenton e Foto-fenton sob a luz solar na degradação de fenol utilizando um composto formado por argila natural e um complexo de ferro ($[\text{Fe}_3(\text{OCOCH}_3)_7\text{OH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}]\text{NO}_3$). Nesse estudo,

a concentração de fenol foi de 0,2 mmol L⁻¹ e a concentração de catalisador foi de 1,0 g L⁻¹. Para os processos de Fenton e Foto-fenton também houve a adição de 10,0 mmol L⁻¹ do oxidante H₂O₂. O processo de adsorção removeu 3,5% de fenol em 180 min de experimento; o Fenton removeu 95% após os 180 min; enquanto o processo de foto-fenton removeu mais de 99% em 120 min. Portanto, a presença de luz solar teve um papel essencial nos resultados obtidos, o que pode indicar o processo de foto-Fenton como uma melhor opção para reações com catalisadores heterogêneos. Os trabalhos apresentados na Tabela 2 são melhor descritos quanto aos seus parâmetros e eficiência na Tabela 3.

Tabela 2 – Trabalhos que realizaram caracterização de minérios naturais.

Referência	Métodos Analíticos
Hadjltaief <i>et al.</i> (2018)	Difração de Raios-X (DRX), Fissorção de Nitrogênio (BET), Espectroscopia de Infravermelho (FTIR), Redução Programada de Temperatura H ₂ (H ₂ -TPR), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ligada com raios-X dispersivos de energia (EDS) e microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTEM).
Lu <i>et al.</i> (2021)	Difração de Raios X (DRX)
Saleh <i>et al.</i> (2021)	Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX), Análise de Brunauer Emmett-Teller (BET), Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
Ayed <i>et al.</i> (2021)	Microscopia eletrônica de transmissão (MET), Microanálise de energia dispersiva de raios X (EDX), Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), Espectro Raman, Difração de raios X (DRX), Espectroscopia UV-vis e

Análise de Brunauer Emmett-Teller (BET).

Tabela 3: Trabalhos realizados na área de foto-Fenton heterogêneo com minérios naturais.

Condições Experimentais	Resultados Obtidos	Referência
Componente degradado: 4-chlorophenol (4-CP) – 20 mg/L Fonte de luz: lâmpada UV pH: 3 Catalisadores: Hematita (46,89% de Fe) e Siderita (57,6% de Fe) - 0,5 g/L Dosagem de H₂O₂: 2 mL (solução 1 g/L)	Tanto os experimentos com hematita, quanto os experimentos com siderita apresentaram eficiência de degradação de 100% em 12 min de reação.	Hadjltaief <i>et al.</i> (2018)
Componente degradado: Efluente residual de tingimento Fonte de luz: lâmpada UV pH: entre 3 e 7,5 Catalisadores: Calcopirita (FeCuS ₂) Magnetita (Fe ₃ O ₄) Pirrotita (Fe _{1-x} S) Dosagem de Catalisador: entre 1 e 4 g/L Dosagem de H₂O₂: entre 1 e 16 mM	Os três catalisadores foram capazes de remover pelo menos 50% de DQO após 120 min, sendo que a Calcopirita foi o mineral com o melhor desempenho entre os três.	Lu <i>et al.</i> (2021)
Componente degradado: Azul de Metileno – 70 mg/L Fonte de luz: lâmpada UV-vis pH: 2 Catalisadores: Basalto (10,61% de Fe ₂ O ₃) – 1 g/L Dosagem de H₂O₂: 5 mM	Foi removido 100% do corante após 60 min. O Basalto apresentou capacidade de reuso por 3 ciclos consecutivos.	Saleh <i>et al.</i> (2021)
Componente	Foi alcançada a	Ayed <i>et al.</i>

degrado: Violeta de metila – 5 a 20 mg/L	remoção de 98% do corante em 3 h. Um estudo de regeneração do catalisador	(2021)
Fonte de luz: lâmpada UV-C	mostrou sua estabilidade e reutilização, após três ciclos de tratamento, a degradação do corante CV diminuiu de 94% para 83%.	
pH: Neutro (6,7)		
Catalisadores: Fe ₂ O ₃ natural – 1 g/L		
Dosagem de H₂O₂: 30 mg/L		

CONCLUSÕES

Embora diversos estudos abordem as aplicações do basalto como fertilizante ou como material cerâmico, por sua caracterização, foi possível conferir que as aplicações foto-catalíticas também podem ser favorecidas com a utilização desse resíduo particulado. A morfologia irregular com grande área superficial e a granulometria apresentada corroboram e, além disso, há em sua composição a presença de hematita, fonte ferrosa. Conclui-se, que o pó de basalto, um material resistente e estável, pode ser aplicado como uma fonte alternativa natural catalisadora nos processos do tipo foto-Fenton visando tratamento de efluentes contaminados.

REFERÊNCIAS

- AYED, S.B.; AZAM, M.; AL-RESAYES, S.I.; AYARI, F.; RIZZO, L. (2021), Cationic Dye Degradation and Real Textile Wastewater Treatment by Heterogeneous Photo-Fenton, Using a Novel Natural Catalyst, *Catalyst*, Vol 11, p. 1358.
- BERNABÉ, B.A. (2021), Polimerização oxidativa da anilina utilizando FeCl₃ como agente oxidante e pó de basalto como codopante - Análise gravimétrica e térmica. UTFPR – Francisco Beltrão – PR., 48p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- DUARTE, L. D. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; DE BRUM, T. M. M.;

- CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. (2003), Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. *Pesquisas em Geociências*, Vol 30, No 2, p. 3–15.
- FAN, E.; HUA, F.; MIAOA, W.; XUA, H.; SHAOA, G.; LIUA, W.; LIA, M.; WANGA, H.; LUA, H.; ZHANG, R. (2020), Preparation of g C₃N₄/vermiculite composite with improved visible light photocatalytic activity, *Applied Clay Science*, Vol 197, p.105789.
- FREITAS, E.D.; CARMO, A.C.R.; ALMEIDA NETO, A.F.; VIEIRA, M.G.A. (2015), Adsorção de prata e cobre por argila bentonítica: caracterização do adsorvente pré e pós processo, *Anais do XXXVII ENEMP 2015 - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, p.466-471, São Carlos – SP.
- GOMES JR, O.; BATISTA, L.L.; UEIRA-VIEIRA, C.; SOUSA, R.M.F.; STARLING, M.C.V.M.; TROVO, A.G. (2020), Degradation mechanism of fpronil and its transformation products, matrix effects and toxicity during the solar/photo-Fenton process using ferric citrate complex, *Journal of Environmental Management*, Vol 269, p.110756.
- HADJLTAIEF, H.B.; SDIRI, A.; GÁLVEZ, M.E.; ZIDI, H.; COSTA, P.; ZINA, M. B. (2018) Natural Hematite and Siderite as Heterogeneous Catalysts for an Effective Degradation of 4-Chlorophenol via Photo-Fenton Process, *ChemEngineering*, Vol 2, p. 29 – 43.
- HWANG, K. J.; CHOI, W. S.; JUNG, S. H.; KWON, Y. J.; HONG, S.; CHOI, C.; LEE, J. W.; SHIM, W. G. (2018) Synthesis of zeolitic material from basalt rock and its adsorption properties for carbon dioxide, *Royal Society of Chemistry*, Vol 8, p. 9524 – 9529.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, Informações sobre a Economia mineral

- Brasileira, Vol 2020, p.84. Acesso em: 20 jul. 2022. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>.
- JIANG, X.; WU, C.; WU, Z. ZHANG, B. (2014), Basic characteristics and application of basalt fiber in the water pollution control, *Advanced Materials Research*, Vols 1073-1076, p.838-843.
- KRAHL, L.L.; PAZ, S.P.A.; ANGELICA, R.S.; VALADARES, L.F.; SILVA, J.C.S.; MARCHI, J.; MARTINS, E.S. (2019), Successive off take of elements by maize grown in pure basalt powder, *African Journal of Agricultural Research*, Vol.15, No2, p.229-239.
- LU, J.; CHEN, Q.; ZHAO, Q.; LIU, X.; ZHOU, J. (2021), Catalytic activity comparison of natural ferrous minerals in photo-Fenton oxidation for tertiary treatment of dyeing wastewater, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol 28, p. 30373–30383.
- LUCHESE, A.V.; PIVETTA, L.A.; BATISTA, M.A.; STEINER, F.; GIARETTA, A.P.S.; CURTIS, J.C.D. (2021), Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer, *African Journal of Agricultural Research*, Vol 17, No 3, p.487-497.
- NANDIYANTO, A. B. D.; OKTIANI, R.; RAGADHITA, R. (2019) How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material, *Journal of Science & Technology*, Vol 4, p. 97 – 118.
- REZAEI, F.; VIONE, D. (2018), Effect of pH on Zero Valent Iron Performance in Heterogeneous Fenton and Fenton-Like Processes: A Review, *Molecules*, Vol 23, p. 3127.
- RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H.; SILVA, E. A.; GUILHERME, L. R. (2017), Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science, *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, Vol 41, No 3, p. 245-254.
- RODRÍGUEZ, M.; BUSSI, J.; LEÓN, M.A. (2021), Application of pillared raw clay-base catalysts and natural solar radiation for water decontamination by the photo-Fenton process, *Separation and Purification Technology*, Vol 259, p. 118–167.
- SALEH, M.; BILICI, Z.; KAYA, M.; YALVAC, M.; ARSLAN, H.; YATMAZ, H.C.; DIZGE, N. (2021), The use of basalt powder as a natural heterogeneous catalyst in the Fenton and Photo-Fenton oxidation of cationic dyes, *Advanced Powder Technology*, Vol 32, p.1264–1275.
- SALEH, M.; YALVAC, M.; ARSLAN, H.; DIZGE, N. (2022), Investigation of Basalt Properties as Heterogeneous Catalyst for Fenton Oxidation of Textile Wastewater, *Clean – Soil, Air, Water*, Vol 2000432, p.1-11.
- SCHIAVON, M. A; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. (2007), Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto, *Cerâmica*, Vol 53, No 326, p. 212–217.
- SGM - Secretaria de Geologia, Mineração, Boletim do Setor Mineral, Vol 2021, No 1, p. 13. Acesso em: 26 jul. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/boletim-do-setor-mineral>.
- SILVA, R. F. DA. (2020), A Difração de Raios X: uma Técnica de Investigação da Estrutura Cristalina de Materiais, *Revista Processos Químicos*, Vol 14, No 27, p. 73-82.