



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



NICOLLE SANTOS PIRES

**POTENCIALIDADES DO USO DA ROCHA BASÁLTICA PARA APLICAÇÃO NO
PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

UBERLÂNDIA

2023

NICOLLE SANTOS PIRES

**POTENCIALIDADES DO USO DA ROCHA BASÁLTICA PARA APLICAÇÃO NO
PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia Química como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia
Angélica Vieira

UBERLÂNDIA

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais. À minha mãe por ser o exemplo de mulher que quero me tornar, por me apoiar e me entender em todos os desafios que tive durante esse período da graduação. Ao meu pai por me ensinar tanto sobre a vida e me instigar a continuar sonhando cada vez mais alto.

Ao restante da minha família, em especial meus tios Francisco e Maria Aparecida por me apoiarem e estarem sempre a postos para me ajudar durante toda minha vida e aos meus avós, Antônio e Francisca, pela coragem inspiradora que sempre tiveram em procurar melhores condições de vida para os filhos e netos.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos, em especial Maria Eduarda, Vitória e Dyeinne, os que conheci a 10 anos e os que conheci a pouco tempo: vocês fazem a minha vida muito mais feliz.

À Cristina, minha amiga desde os 5 anos, por ser minha irmã e um apoio indispensável na minha vida. À Ana Lídia que participou da minha saga ao desenvolver este trabalho e compartilhar desta experiência comigo.

Ao Society of Women Engineers – Acelerar e Suportar (SWE-AS), grupo que me acolheu e me ofereceu tantas oportunidades, não apenas de conhecimento profissional, mas também de conhecer grandes profissionais da área e amizades maravilhosas.

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Patrícia Angélica Vieira por todo conhecimento compartilhado e pela orientação dedicada a este trabalho.

À equipe que participo na Iniciação Científica, composta por Amanda Rocha, Amanda Rodrigues e a minha orientadora Prof.^a Dr.^a Patrícia Angélica Vieira. Está sendo gratificante participar de um projeto de pesquisa tão importante e complexo. Aprendi e evolui muito enquanto futura pesquisadora durante esse período.

Por fim, gostaria de agradecer a Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Química por me proporcionar uma formação profissional de excelência.

RESUMO

O basalto é uma rocha formada por magmas basálticos extremamente abundante no planeta terra. É considerada uma rocha extrusiva de grãos finos, uma consequência do arrefecimento do magma de forma rápida após uma erupção vulcânica. Sua composição é formada em média de 52% de SiO_2 , 14% de Al_2O_3 e 10% de Fe_2O_3 como principais componentes. O basalto se encontra em grandes províncias ígneas, que são grandes concentrações de terra nas quais houve grande atividade vulcânica. No Brasil existe a província ígnea do Paraná, que se estende por estados como Paraná, São Paulo e Minas Gerais e outros países como o Paraguai. É nessa região que se concentra a maior quantidade de basalto no país e por consequência uma prática de mineração bem estabelecida. A rocha é utilizada principalmente na construção civil e o pó de basalto é um dos principais resíduos da atividade mineradora. O pó preserva a composição química da rocha e pode ser utilizado em várias aplicações. Um dos principais usos do pó de basalto é como fertilizante natural em uma prática conhecida como rochagem no qual o pó é aplicado no solo com o objetivo de liberar substâncias lentamente para manter o solo remineralizado por longos períodos. Outra prática é utilizar o pó de rocha basáltica como material base para a criação de zeólitas que são materiais porosos que podem ser utilizados em atividades catalíticas. O pó de basalto pode ser usado em recheio na formação de novos materiais, principalmente polímeros e materiais da indústria civil como argamassas e concretos. Em todos os casos, o basalto ajuda a aumentar as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais sintetizados. Outra área em que o pó de basalto é um material promissor é na área de tratamento de efluentes. No tratamento de efluentes gasosos, o pó de basalto está sendo objeto de estudos preliminares para identificar a capacidade do basalto em sequestrar carbono e transformá-lo em minerais de carbonato. No tratamento de efluentes líquidos, se destaca a adsorção e uma classe de processos denominados Processos Oxidativos Avançados no qual a fotocatalise, o Fenton e o foto-Fenton foram investigados juntamente com o pó de basalto como catalisador em relação à eficácia desses processos em tratar moléculas complexas e resíduos industriais. No trabalho em questão foram discutidas as vantagens e desafios nas diversas aplicações do pó de rocha com o enfoque no tratamento de efluentes por processos oxidativos avançados. As principais vantagens do pó de basalto incluem a grande quantidade disponível no planeta, sua composição rica em muitos componentes, sua área superficial específica e o baixo custo envolvendo sua aquisição, o que contribui em sua eficiência como catalisador no tratamento de efluentes. Os principais desafios estão no fato de que é um segmento de pesquisa relativamente novo, em sua maioria estudos preliminares. O pó de basalto tem potencial para ser um grande aliado no tratamento de efluentes, mas ainda são necessários mais estudos sobre a gama de substâncias que podem ser degradadas e sua compatibilidade com a rocha.

Palavras-chave: Pó de Basalto, Tratamento de Efluentes, Processos Oxidativos Avançados, Fenton, Fotocatalise Heterogênea

ABSTRACT

Basalt is a rock formed by basaltic magma abundant on planet Earth. It is considered a fine-grained extrusive rock due the magma cooling rapidly after a volcanic eruption. Its composition consists of an average of 52% SiO₂, 14% Al₂O₃, and 10% Fe₂O₃ as the main components. Basalt is found in large igneous provinces, which are large concentration of land in which there has been great volcanic activity. In Brazil, a large igneous province extends through states as Paraná, São Paulo, and Minas Gerais and other countries such as Paraguay. Large volumes of basaltic magma are placed and, consequently, a well-established mining practice in the region. The rock is used in civil construction and the basalt powder is one of the main residues of the mining activity. The powder preserves the chemical composition from rock and can be used in various applications. One of the main uses of basalt powder is as a natural fertilizer in which the powder is applied to the soil to slowly release substances to keep the soil remineralized for long periods. Another practice is to use basaltic rock dust as a base material for zeolites creation, which are porous materials that can be used in catalytic activities. Basalt powder can be used as a filler to new materials formation, mainly polymers and civil industry materials such as mortars and concrete. In all cases, basalt provides mechanical and thermal properties improvements. Another area where basalt powder is a promising material is in the field of wastewater treatment. In the gaseous effluents treatment, basalt powder is the subject of preliminary studies to identify basalt's ability to sequester carbon and transform it into carbonate minerals. In the liquid effluent treatment, adsorption and a class of processes called Advanced Oxidative Processes stand out in which photocatalysis, Fenton, and photo Fenton were investigated together with basalt powder as a catalyst concerning the effectiveness of these processes in treating molecules complexes and industrial waste. In the current work, the advantages and challenges in the various applications of rock powder were discussed, focusing on the treatment of effluents by advanced oxidative processes. The main advantage of basalt powder including the large amount available on the planet, its rich composition in many components, its specific surface area and the low cost involved in its acquisition, which adds to its efficiency as a catalyst of wastewater treatment. The main challenges lie in the fact that it is a relatively new research segment, mostly preliminary studies. Basalt powder has the potential to be a great ally in the treatment of effluents, but further studies are needed on the range of substances degraded and their compatibility with the rock.

Key Words: Basalt Powder, Effluent Treatment, Advanced Oxidative Processes, Fenton, Heterogeneous Photocatalysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais Províncias Ígneas da Crosta Terrestre	11
Figura 2 – Fragmento de Basalto e Gabro	14
Figura 3 – Ilustração de Execução de Mecanismo de Catálise e Foto-Fenton Heterogêneo	25
Figura 4 - Análises MEV das Amostras de Pó de Basalto.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição de uma Rocha Basáltica Comun	12
Tabela 2 – Classificação Química de Rochas Basálticas Baseado na Concentração de SiO ₂	13
Tabela 3 – Especificações dos Processos de Adsorção	20
Tabela 4 – Resultados de remoção por processo.....	22
Tabela 5 – Caracterizações Empregadas no Pó de Basalto em Estudos Aplicando POAs.....	26
Tabela 6 – Composição Química das Amostras de Pó de Basalto.....	27
Tabela 7 – Estruturas Cristalinas Identificadas por Análise DRX.....	29
Tabela 8 – Resultados de S ₀ , E _{gap} e λ	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVO GERAL	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	ORIGEM E CARACTERÍSTICAS DA ROCHA BASÁLTICA.....	10
2.1.1	Composição e Classificação Química da Rocha Basáltica	7
2.1.2	Granulação e outras propriedades da rocha basáltica.....	9
2.2	POTENCIALIDADES DE APLICAÇÕES DO PÓ DE ROCHA BASÁLTICA	10
2.2.1	Remineralizador de Solos	10
2.2.2	Material de Partida para Síntese de Zeólitas.....	11
2.2.3	Pó de Basalto como Recheio em Compósitos de Cimento e Polímeros...	13
2.3	APLICAÇÕES DO PÓ DE BASALTO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	14
2.4	CARACTERIZAÇÕES IMPORTANTES DO PÓ DE ROCHA PARA APLICAÇÃO EM PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	18
2.4.1	Caracterizações Realizadas no Pó de Rocha Basáltica.....	21
3	ESTUDO DE CASO	26
3.1	RESUMO.....	26
3.2	METODOLOGIA APLICADA.....	27
3.3	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS	27
3.4	CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO	29
4	CONCLUSÃO	30
5	REFERÊNCIAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

O basalto é uma rocha ígnea extrusiva formada principalmente por SiO_2 . Grande parte de suas propriedades estão relacionadas a forma como o magma basáltico do qual é originada se movimentou para acima da crosta terrestre e se solidificou (CARMICHAEL *et al.*, 1974). Geralmente, essa cristalização acontece após uma série de derrames de lava de forma rápida, não dando tempo que a nucleação de cristais maiores ocorra, o que garante uma granulação fina para a rocha (CHIOSSI, 2013). A composição do basalto tem como os três principais componentes SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e porcentagem de cada óxido difere dependendo do lugar na crosta no qual o basalto foi formado (CARMICHAEL *et al.*, 1974).

O basalto é utilizado na construção civil, na fabricação de pisos e revestimentos. O pó de basalto é um dos principais resíduos da prática de mineração (BERNABÉ *et al.*, 2021) e atualmente não possui nenhum valor agregado (SALEH *et al.*, 2021). No Brasil há um imposto reservado a titulares de direitos minerários que é voltado para cidades e municípios no qual há qualquer construção voltadas para a prática de mineração e em 2019, a mineração do basalto teve uma arrecadação de tributos de mais de 14 milhões de reais (IBRAM, 2020).

Como esse resíduo e a própria rocha existem em grande abundância em várias regiões do mundo, muitos pesquisadores procuraram utilizar o pó de basalto em diversas gamas de aplicações: como remineralizador de solos (LUCHESE *et al.*, 2019), como agregado e recheio na formação de novos materiais no intuito de potencializar suas propriedades mecânicas (KURÁNSKA *et al.*, 2019) e como material base para a criação de zeólitas que são muito utilizadas na indústria como catalisadores (ESAIFAN *et al.*, 2017).

Uma das aplicações para o pó de basalto é no tratamento de efluentes no qual seu uso parece bastante promissor (SALEH *et al.*, 2021). O pó de basalto possui uma capacidade para atividade catalítica que encoraja pesquisadores a utilizá-los em processos oxidativos avançados, os conhecidos POAs (SALEH *et al.*, 2022). Dentre eles, em relação ao POAs, três processos se destacam: Fotocatálise heterogênea, Fenton e foto-Fenton.

Todos os POAs se assemelham em um requisito em seu mecanismo de degradação: sempre há a formação de radicais hidroxila ou radicais sulfato pela ação de um agente oxidante, que pode ser peróxido de hidrogênio, luz sintética ou solar, ou a combinação de ambos. Esses radicais agem na molécula a ser degradada doando ou recebendo elétrons e

causando uma quebra em suas ligações químicas, formando subprodutos como água, CO₂ e outras moléculas menores (THOMAS *et al.*, 2021).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi investigar estudos no qual o pó de basalto foi empregado em processos oxidativos avançados como catalisador e analisar as vantagens e desvantagens identificadas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Investigar as propriedades da rocha basáltica com relação à sua atividade catalítica;
- Descrever as principais aplicações da rocha basáltica;
- Escolher um estudo de caso no qual o basalto é empregado em um POA;
- Realizar levantamento de um possível direcionamento para aplicações da rocha para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ORIGEM E CARACTERÍSTICAS DA ROCHA BASÁLTICA

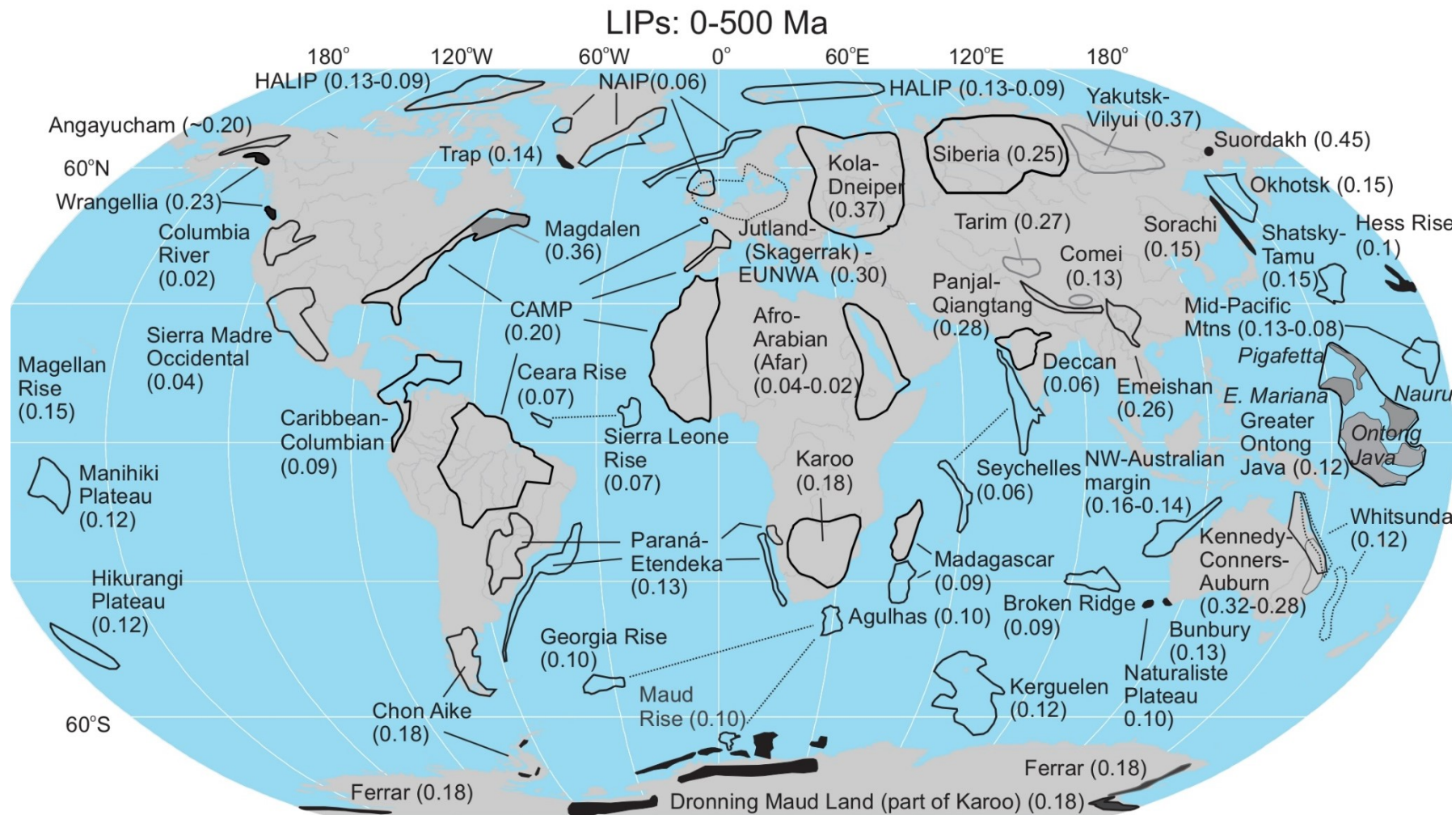
O basalto é um tipo de rocha ígnea extrusiva formada aproximadamente de 50% de silicatos (SiO_2), com granulação fina e é a rocha vulcânica mais comum encontrada na superfície terrestre sendo o resultado da fusão dos magmas basálticos que ocorrem no manto. Magma é uma denominação que se dá ao estado em que as rochas estão presentes no interior da Terra, que contém líquido magmático (material completamente fundido) e cristais em suspensão. A maioria das rochas eruptivas são definidas por sua concentração de óxidos de silício e álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), componentes que representam as composições dos líquidos magmáticos, e a forma como a fusão no manto ocorre determina a composição química presente no magma (CARMICHAEL *et al.*, 1974).

O magma geralmente é formado por um processo de fusão parcial, no qual os líquidos magmáticos não são completamente liquefeitos e o material sólido residual desse processo se separa. Assim os componentes químicos mais fundíveis como SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3 etc., se concentram no líquido magmático que se movimenta para a crosta terrestre por convecção e os componentes mais refratários como o MgO , Ni e o Cr permanecem no resíduo não liquefeito. As regiões nas quais o magma basáltico se forma são pobres em SiO_2 e ricas em MgO (GILL, 2014).

O basalto pode ser observado em vários ambientes tectônicos na Terra, como em grandes cadeias de montanhas oceânicas e grandes províncias ígneas (extensões terrestres com volume em torno de 10^5 a 10^7 km^3) por exemplo, porém também pode ser encontrado em outros planetas e na Lua, formando uma classe importante de meteoritos. (BLACK, 2021).

As províncias ígneas podem ser chamadas de platôs oceânicos ou platôs continentais e as principais províncias foram formadas a 260 Ma (Milhões de anos) (COLTICE *et al.*, 2007). Uma das maiores províncias do planeta é encontrada na América do Sul, em grande parte no território brasileiro (LICHT, 2014), como pode ser observado na Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Principais Províncias Ígneas da Crosta Terrestre



Fonte: (ERNST, YOUBI, 2017).

A Província Ígnea do Paraná possui cerca 1.200.000 km² de extensão e a maior parte dos eventos tectônicos ocorreram no cretáceo em torno de 134 Ma. A província faz parte de um sistema natural bastante complexo que é a Bacia do Paraná, que compreende tanto rochas ígneas quanto rochas sedimentares. A bacia do Paraná compreende a Argentina, o Uruguai, o Paraguai e os estados do Rio Grande do sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Minas Gerais, em especial na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (LICHT, 2014).

De acordo com Soares (2020), o basalto é o tipo de rocha predominante na região do triângulo mineiro, sendo formado durante os eventos ao final do período jurássico, quando o vulcanismo presente na região permitiu vários derrames consecutivos com intervalos de tempos distintos possibilitando a formação do mesmo tipo de rocha ígnea, porém com texturas diferentes dando origem à uma formação geológica denominada Serra Geral.

Em Uberlândia – MG os basaltos estão presentes abaixo de 840 m, em geral ao redor da Cachoeira do Sucupira no rio Uberabinha e em alguns pontos do ribeirão Bom Jardim (SANTOS, 2021). Em 2021, a prefeitura de Uberlândia lançou a cidade como primeiro Polo Agromineral Verde do país tendo em vista consolidar o pó de basalto da região como um remineralizador de solos e incentivando mineradoras a registrar o basalto junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para processamento do pó da rocha (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2021), e através de estudo realizado com o apoio da Universidade Federal de Uberlândia, em 2022, a prefeitura lançou um ensaio apresentando o efeito do pó da rocha em culturas como alface, rúcula, tomate, entre outras (PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2022).

2.1.1 Composição e Classificação Química da Rocha Basáltica

O Basalto, assim como a maioria das rochas ígneas, é formado principalmente por óxidos de silício, titânio, alumínio, ferro, entre outros (ESAIFAN *et al.*, 2017). Elementos que são encontrados em rochas acima de 0,1% são chamados elementos maiores e elementos abaixo de 0,1% são chamados de elementos-traço e geralmente são representados em partes por milhão em massa. Os elementos-traço são de extrema importância pois fornecem informações sobre a origem do magma e seu processo de cristalização (GILL, 2014). Na Tabela 1 a seguir, GILL, (2014) apresenta a composição em porcentagem de massa de uma rocha basáltica.

Tabela 1 – Composição de Rochas Basálticas de Duas Províncias Ígneas Distintas

Componente	Dorsal Meso-Atlântica (% em massa)	Koloa, Ilha Kauai, Havai (% em massa)
SiO ₂	50,48	45,64
TiO ₂	1,19	1,84
Al ₂ O ₃	16,87	12,49
Fe ₂ O ₃	8,85	12,44
MnO	0,15	0,17
MgO	8,07	11,36
CaO	11,85	9,93
Na ₂ O	2,62	2,25
K ₂ O	0,10	0,67
P ₂ O ₅	0,11	0,32

Fonte: (GILL, 2014).

Quando se compara basaltos em relação à sua composição química, pode-se dividir a rocha em três categorias apresentadas na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Classificação Química de Rochas Basálticas Baseado na Concentração de SiO₂

Tipo de Rocha	Descrição
Supersaturada em Sílica	Possui “excesso” de SiO ₂ , contendo quartzo (SiO ₂) como um dos principais minerais em sua composição
Saturada em Sílica	Está em “equilíbrio” de SiO ₂ e possui enstatita (2MgO.2SiO ₂) e olivina (2MgO.SiO ₂) como seus minerais principais
Subsaturada em Sílica	Possui “déficit” de SiO ₂ e possui a nefelina (Na ₂ O.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂) como o principal mineral presente na rocha

Fonte: (GILL, 2014).

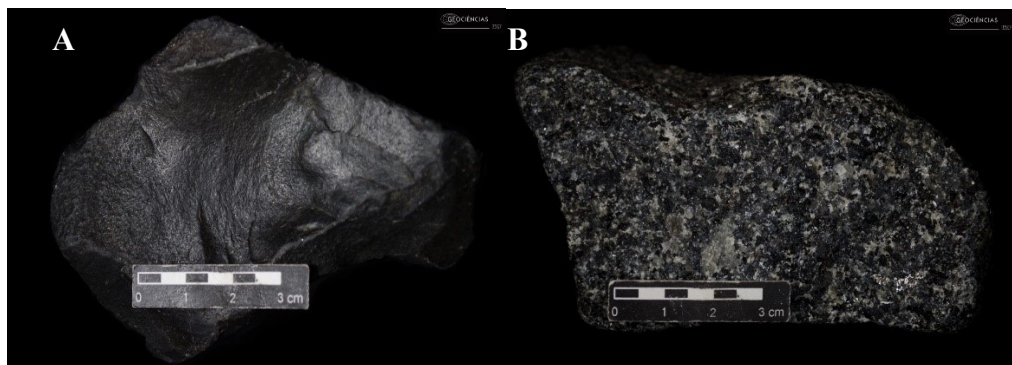
Basaltos saturados em sílica podem ser chamados de toleíticos e são os tipos mais comuns encontrados na superfície terrestre. Basaltos subsaturados em sílica são comumente denominados alcalinos (GILL, 2014).

2.1.2 Granulação e outras propriedades da rocha basáltica

O processo de formação das rochas ígneas pode ocorrer a partir de duas vertentes diferentes. Quando ocorre por meio do movimento do líquido magmático para a superfície, formando uma erupção vulcânica e originando grandes derrames de lava, o arrefecimento acontece rapidamente o que ocasiona rochas de granulação mais finas, sendo o exemplo mais comum a rocha basáltica. Em alguns casos, quando o arrefecimento é extremamente rápido, não há a formação de cristais finos e sim uma matéria sólida sem estrutura cristalina. Rochas desse tipo são denominadas extrusivas ou vulcânicas (CHIOSSI, 2013).

O oposto é denominado intrusiva ou plutônica e ocorre quando o processo de arrefecimento é lento e o magma cristaliza ainda em profundidade, antes de alcançar a superfície. Nesse caso, os cristais formados são maiores. Um exemplo é o gabro, uma rocha com composição semelhante à do basalto, ou seja, uma rocha também proveniente de magmas basálticos, porém intrusiva e com granulação consideravelmente maior (CHIOSSI, 2013).

Figura 2 – Fragmento de (A) Basalto e (B) Gabro



Fonte: A (BASALTO – MATERIAIS DIDÁTICOS, 2020), B (GABRO – MATERIAIS DIDATICOS, 2020)

Rochas basálticas são caracterizadas por possuírem baixa porosidade, ou seja, poucos espaços vazios (poros) em sua matriz rochosa, chegando a no máximo 1,5% de porosidade

máxima, quando comparados o volume vazio de uma amostra de rocha com seu volume total (CHIOSSI, 2013). Quanto à cor, basaltos geralmente se apresentam pretos e cinza-escuros. Porém essas propriedades podem variar a depender do vulcanismo originário dessas rochas. Na região do triângulo mineiro, o basalto possui porosidade e permeabilidade maiores do que as que são comumente retratadas, por conta do processo de solidificação único (SOARES, 2020).

A rocha basáltica possui durabilidade alta, resistência a solventes orgânicos e estabilidade térmica (SALEH *et al.*, 2022). Hartlieb *et al.* (2015) compararam as propriedades termo físicas do basalto, do granito e do arenito entre as temperaturas de 25 a 1000 °C. Os resultados demonstram que a estabilidade térmica e a textura do basalto não sofreram grandes alterações quanto às outras duas rochas, possivelmente devido ao fato de que a amostra de rocha basáltica não possuía o quartzo como o principal mineral (apenas 5%), ou seja, um basalto não supersaturado em sílica. O granito e o arenito (27% de quartzo em sua composição) apresentaram picos de instabilidade limitados na região da temperatura de 573 °C, sendo essa a temperatura em que há uma transição entre as fases de configuração cristalina do quartzo.

2.2 POTENCIALIDADES DE USO DO PÓ DE ROCHA BASÁLTICA

A prática de mineração da rocha basáltica é muito comum no Brasil, sendo sua principal aplicação na construção civil, na fabricação de pisos e revestimentos (BERNABÉ, 2021). O pó de basalto, por consequência, é um resíduo gerado por essa prática em grande quantidade, o que podem causar danos respiratórios em pessoas expostas por longos períodos (KURÁŇSKA *et al.*, 2019). Assim, diversas áreas do conhecimento investigam como melhor reutilizar esse pó. As principais aplicações são na agricultura, na indústria civil e química e no tratamento de água e gases em geral.

2.2.1 Remineralizador de Solos

A agricultura utiliza do pó de basalto principalmente como remineralizador de solos. A rochagem, como também é chamada a prática de remineralização, é uma tecnologia relativamente nova e vem sendo estudada por muitos pesquisadores. A prática consiste em uma técnica de fertilização natural no qual a rocha passa por processos de moagem e peneiração, apenas com o objetivo de reduzir a granulação, com a ausência de processos químicos. O pó,

ao entrar em contato com o solo, tende a penetrar em suas camadas e aos poucos liberar as substâncias que são consideradas importantes nutrientes para as plantas, como Ca, Mg e Fe. O pó de basalto possui uma composição química que agrega vantagens para o processo, pois dentre as rochas magmáticas é o que possui maiores quantidades dos elementos citados (EUTRÓPIO, 2021).

Luchese *et al.* (2021) avaliaram o efeito do pó de basalto na composição química do solo e no crescimento das plantas. O estudo foi realizado com dois solos (solo argiloso e solo franco-argiloso-arenoso), duas culturas (milho e soja), dois potenciais remineralizadores (pó de basalto e calcário), três doses de aplicação (33, 66 e 99 Mg ha⁻¹ pó de basalto ou 1,2 e 4 Mg ha⁻¹ de calcário) com quatro repetições. O uso do pó de basalto resultou em um maior crescimento das plantas quando comparado ao calcário, proporcionando um aumento no pH de ambos os solos, na concentração de Ca e P e um aumento na absorção de Mg por ambas as culturas estudadas.

Souza (2022) analisou a eficiência agrônômica do pó de rocha basáltica em culturas de milho em dois solos: Neossolo quartzarênico e Argissolo amarelo distrófico com doses respectivas de 0,0, 7,5, 15,0, 30,0 e, 60,0 t ha⁻¹ e de 0,0, 10,0, 20,0, 40,0 e, 80,0 t ha⁻¹, com quatro repetições. O pó da rocha apresentou resultados satisfatórios como remineralizador em ambos os solos, possibilitando o aumento nos valores de pH, capacidade de troca catiônica dos solos, aumento nos teores de macro e micronutrientes como P, S, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn e Zn, criação de um ambiente favorável para microrganismos e acréscimo nos valores de matéria seca para as culturas.

2.2.2 Material de Partida para Síntese de Zeólitas

Zeólitas são estruturas porosas formada por minerais aluminossilicatos que são utilizadas como catalisadores em indústrias de refinarias e adsorventes em tratamentos de águas residuais através da remoção de moléculas complexas como alguns corantes por exemplo (KE *et al.* 2019). Por conta de sua vasta possibilidade de aplicação na indústria, a demanda por zeólitas naturais aumentou significativamente nos últimos anos (ESAIFAN *et al.*, 2017). Por consequência, as zeólitas de origem química se tornam uma opção que ainda tem um custo extremamente alto. O estudo da síntese de zeólitas através de materiais preliminares naturais

vem sendo aprimorado para atenuar esses custos e suprir as necessidades da indústria (KE *et al.*, 2019).

O pó de rocha basáltica é uma opção particularmente interessante para ser utilizado como base da síntese de zeólitas devido à sua composição e à abundância de rochas basálticas no planeta. Aproximadamente 8,5% das rochas existente na crosta terrestre são basalto. O material de partida mais comum na síntese de zeólitas são as cinzas de combustível pulverizadas que possui proporções de SiO₂ e de Al₂O₃ similares as do basalto, o que poderia tornar a rocha vulcânica o material ideal para tal aplicação (KE *et al.*, 2019).

Esaifan *et al.* (2017) obtiveram resultados satisfatórios ao sintetizar zeólitas a partir do pó de rocha. Foi utilizado o método de síntese hidrotérmica por fusão alcalina para atingir um material do tipo hidroxisodalita (H-SOD), um tipo de zeólita com canais micro e meso uniformes. Ainda de acordo com Esaifan *et al.* (2017), zeólitas são classificadas a partir da razão Si/Al em sua composição final. O material que possui baixo teor de Si/Al ($\text{Si/Al} \leq 5$) são identificadas como do tipo A, do tipo X ou do tipo H-SOD a depender de sua configuração cristalina.

Hwang *et al.* (2018) demonstraram a síntese de uma zeólita 4A proveniente de pó de basalto com o objetivo de adsorver CO₂ de gás natural. De acordo com o estudo, as zeólitas são materiais estáveis, com capacidades de alta adsorção e seletividade. Também foi empregado a técnica de síntese hidrotérmica por fusão alcalina para obter a zeólita sintética de forma satisfatória. Em seguida, foi analisado a adsorção de CO₂ pelo material e os resultados foram comparados com zeólitas comerciais. Ao final, concluiu-se que as zeólitas provenientes do basalto obtiveram uma capacidade de adsorção maior que o produto comercial, principalmente devido ao aumento da área superficial e do volume dos microporos.

Já Ke *et al.* (2019) alcançaram resultados satisfatórios na síntese de zeólitas do tipo X também utilizando o pó de basalto como base. O método hidrotérmico por fusão alcalina foi novamente empregado e a área superficial atingida após a geração da zeólita foi 40 vezes maior que a área superficial do pó de basalto puro.

2.2.3 Recheio em Compósitos de Cimento e Polímeros

Em geral, o pó de basalto é principalmente empregado como recheio em modificações de compósitos de cimento e em materiais poliméricos. Um outro material também oriundo da rocha basáltica e que já é vastamente conhecido como recheio para compósitos com propriedades superiores às fibras de vidro é a fibra de basalto (KURAŃSKA *et al.*, 2019). O processo para obter uma fibra de basalto envolve três possíveis técnicas: sopro centrífugo, sopro de fusão, multirrolamento centrífugo (JAMSHAD; MISHRA, 2016), ou seja, existe um tratamento mecânico do material bruto antes de ser disposto como recheio. Sendo assim, estudos que abordam a formação de compósitos recheados com pó de basalto são indispensáveis, por apresentar uma solução com custo baixo e que reaproveita resíduos da indústria de mineração.

Kurańska *et al.* (2019) empregaram o pó de basalto em uma matriz porosa de poliuretano (PUR) e analisaram as propriedades do compósito. O novo material demonstrou possuir um efeito catalítico aumentando a reatividade do processo de formação de espumas da matriz de poliuretano, enquanto outros tipos de recheio como por exemplo a microcelulose tendem a diminuir a reatividade do compósito. Isso se dá, provavelmente pela presença de alguns metais como Fe, Zn e Mg na composição do basalto. O material polimérico obtido ao final também se provou ter maior estabilidade termomecânica.

Barczewski *et al.* (2020) executaram um estudo semelhante. O pó de basalto foi aplicado como recheio na produção de um compósito de poliácido láctico (PLA) e ao contrário do estudo de Kurańska *et al.* (2019), o pó foi tratado quimicamente com o objetivo de aumentar as propriedades mecânicas do material. Foi realizado testes com o recheio tratado quimicamente e com o recheio inalterado e em ambos os casos a estabilidade termomecânica e as propriedades mecânicas foram aprimoradas. Diante disso, os Autores concluíram que o pó de basalto é um recheio de bom desempenho e não há a necessidade de um tratamento prévio de longa duração.

Dobiszewska e Beycioglu (2020) analisaram a eficiência do pó de basalto como agregado em um compósito de concreto. Foi avaliado a maleabilidade, o esforço de compressão, as propriedades de transporte de água e as performances microestruturais desse compósito. Os resultados mostraram que a o esforço de compressão aumentou em até 25% substituindo parcialmente a areia por pó de basalto. Nesse caso, a estrutura do concreto se tornou mais forte e diminuiu a migração interna de água. O pó de basalto ajuda a aumentar a hidratação do

cimento e diminuir a porosidade, em grande parte devido à maior densidade do basalto em relação à areia. Isso ocasionou em uma estrutura mais compacta e de melhor eficiência.

Uma abordagem distinta de Mahmoud *et al.* (2019) revelou as propriedades de blindagem de um compósito com o pó de basalto como agregado. Para tal, analisaram o coeficiente de atenuação de massa μ (cm^{-1}) do material em função da energia dos raios gama. Esse coeficiente indica a capacidade do material de atenuar a radiação que está sendo propagada nele. O estudo mostrou uma relação inversamente proporcional entre o aumento na energia emitida pelos raios gama e o decréscimo do coeficiente de atenuação de massa. Porém em amostras do material contendo pó de basalto, esse parâmetro se mostrou maior do que em compósitos sem basalto quando o material foi testado sob a mesma irradiação de raios gama. Isso indica que a maior densidade que o pó de basalto proporciona para o compósito auxilia o material a blindar os raios gama com uma maior eficiência.

Dada essas principais capacidades proeminentes para a utilização do pó de basalto, emerge uma rota alternativa para sua aplicação no processo de tratamento de resíduos líquidos. Considerando que o cerne central deste estudo consistiu em examinar o desempenho do pó de basalto no tratamento de efluentes, a seguir, foi criada uma seção totalmente dedicada a esse objetivo.

2.3 APLICAÇÕES DO PÓ DE BASALTO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

O interesse em técnicas cada vez mais avançadas e de baixo custo para tratar efluentes industriais e domésticos se tornou emergente nas últimas décadas devido à quantidade de poluentes expostos no ar e nas águas próprias para consumo. Dentre as diversas técnicas empregadas no tratamento de resíduos atualmente, é possível citar adsorção, filtração, coagulação, floculação e tratamentos biológicos. Cada uma dessas tecnologias possuem um fator limitante, uma desvantagem e cabe aos profissionais responsáveis decidir qual processo é o mais viável para tratar os poluentes presentes (SALEH *et al.*, 2021). O pó de basalto pode ser um grande aliado em processos de tratamento de efluentes, dado suas propriedades, custo econômico viável, abundância em várias partes do mundo e não ser nocivo ao meio ambiente.

No tratamento de efluentes gasosos como o CO_2 , uma técnica conhecida como Sequestro de Carbono Geológico (GCS) consiste na injeção e armazenamento de CO_2 dentro de formações geológicas. Eventualmente, o dióxido de carbono é convertido em minerais com

carbonato em sua composição. As principais formações usadas no GCS são bacias de arenito e sua maior desvantagem é não possuírem a reatividade necessária para a formação dos minerais de carbonato (ZHANG; SONG, 2013).

Xiong *et al.* (2017) propuseram um estudo no qual pó de basalto com diferentes granulometrias foi utilizado como recheio em um reator de leito empacotado para analisar o efeito que diferentes áreas superficiais causam na formação de minerais de carbonato, com o objetivo de entender a viabilidade de utilizar a rocha basáltica no GCS. As amostras de rocha basáltica foram moídas e peneiradas para gerar partículas entre 53 e 106 μm e os experimentos foram controlados a 100 bar e 100 °C e duraram no total de 28 dias.

Os experimentos foram realizados também com amostras de olivina (mineral puro) para comparar os resultados entre um pó de origem rochosa que possui diversos minerais diferentes. Os resultados atestaram que a olivina sequestrou mais CO_2 do que o basalto e as amostras de basalto com áreas superficiais mais acessíveis prenderam maiores quantidades de CO_2 . O pó de basalto conseguiu transformar o CO_2 em siderita (mineral de carbonato) após os 28 dias de experimento o que indica que isso pode ser replicado em grandes reservas de basalto em um tempo muito menor quando comparado com o tempo que esse processo acontece em arenitos, que pode chegar a centenas ou milhares de anos.

O tratamento de efluentes líquidos possui um campo mais vasto de aplicações para o pó de basalto. Devido a área superficial e sua composição química, o pó de rocha pode ser empregado em processos de adsorção ou como catalisador em processos oxidativos avançados.

Em relação ao Cromo este é geralmente encontrado nos estados de oxidação Cr (VI) e Cr (III) naturalmente e um pode se transformar no outro dependendo do pH do meio e de outras propriedades cinéticas. O Cr (VI) é um oxidante muito potente, os óxidos formados por esse cátion são extremamente solúveis em água e essa substância pode ser seriamente tóxica, podendo causar problemas respiratórios, hematológicos, carcinogênicos e muitos outros em humanos e animais (ALEMU *et al.*, 2018). Devido aos grandes riscos presentes na contaminação por Cr (VI) e, conseqüentemente por Cr (III), dado a facilidade de conversão entre ambos os íons, a necessidade de encontrar um processo que trate tais substâncias efetivamente e com baixo custo se torna urgente (ALEMU *et al.*, 2019).

Alemu *et al.* (2018) e Alemu *et al.* (2019) estudaram a eficácia do pó de basalto como adsorvedor de Cr (VI) e Cr (III) respectivamente. Ambos os Autores realizaram procedimentos semelhantes e as condições ótimas do processo são expostas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Especificações dos Processos de Adsorção

	Alemu <i>et al.</i> (2018)	Alemu <i>et al.</i> (2019)
Poluente	Cr (VI)	Cr (III)
Processo	Adsorção com pó de basalto	Adsorção com pó de basalto
Granulação da rocha	90 – 500 μm	90 – 500 μm
Concentração do poluente	5 mg L^{-1}	100 mg L^{-1}
Massa de adsorvedor	5 g	5 g
pH inicial	2	6
Temperatura	25 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$
Tempo de reação	9h (equilíbrio)	8h (equilíbrio)

Fonte: (ALEMU *et al.* 2018 e ALEMU *et al.* 2019)

Alemu *et al.* (2018) analisaram os efeitos de pH e a cinética do processo. Ao variar o pH de 2 a 11, foi possível concluir que a adsorção foi maior em pH inicial mais baixo, sendo a melhor porcentagem de adsorção 81,2% com o pH 2. Ao variar a concentração inicial entre 0,1, 1 e 5 mg L^{-1} , a melhor capacidade de adsorção foi com concentração de poluente de 5 mg L^{-1} , chegando a remover 79,2 mg por quilograma de pó de basalto. Verificaram que o equilíbrio da reação depende da concentração inicial do poluente e para a concentração de 5 mg L^{-1} , o tempo total gasto foi de 9h.

Alemu *et al.* (2019) também estudaram os mesmos efeitos. O pH foi o principal fator que influenciou na porcentagem adsorvida. Ao variar o pH entre 2 e 7, o melhor resultado obtido foi em pH 6 com 54,67% de adsorção de Cr (III). As concentrações iniciais avaliadas foram 20, 60 e 100 mg L^{-1} , sendo que a maior adsorção observada foi na concentração de 100 mg L^{-1} , com um total de 0,976 mg de poluente adsorvido por grama de adsorvente em 8h de processo. Em ambos os trabalhos os Autores concluíram que o modelo cinético de segunda ordem se encaixa melhor com os dados experimentais e que o pó de rocha é um possível adsorvente para processos de tratamento de água de baixo custo e alta eficiência.

Uma alternativa de tratamento, são os processos oxidativos avançados (POAs) que incluem técnicas como Fenton, foto-Fenton, ozonização, fotólise, sonólise (SALEH *et al.*, 2021) e fotocatalise (QIU *et al.*, 2019) e consiste em utilizar um ou mais tipos de oxidante para degradar moléculas complexas (THOMAS *et al.*, 2021). Entre os métodos citados, aqueles no qual é necessário um catalisador heterogêneo ou homogêneo são Fenton, foto-Fenton e fotocatalise. Assim, alguns estudos se propuseram a pesquisar qual a eficiência em utilizar o pó de basalto como um catalisador heterogêneo.

Saleh *et al.* (2021) comparou três métodos para degradação (Adsorção, Fenton e foto-Fenton) de dois corantes distintos: Azul de metileno (MB), Basic Red 18 (BR18). O Fenton é uma reação que ocorre através da ação de um oxidante que é catalisada, no caso do estudo, pelo pó de basalto. O foto-Fenton utiliza luz tanto artificial quanto solar para potencializar o efeito oxidante da reação. Logo, nesse estudo o oxidante escolhido foi o peróxido de hidrogênio (H₂O₂). As condições ótimas de operação foram 70 mg/L da solução com os contaminantes, 5 mM de H₂O₂, 1 g/L de basalto, pH 2. Todos os experimentos tiveram uma duração de 60 min. A Tabela 4 a seguir apresenta a relação entre a remoção dos corantes e o processo de degradação correspondente.

Tabela 4 – Resultados de remoção por processo

Processo	MB	BR18
Adsorção	12%	17%
Fenton	87%	28%
Foto-Fenton	100%	70%

Fonte: (SALEH *et al.* 2021)

Saleh *et al.* (2022) investigaram a degradação de dois corantes: verde malaquita (MG) e violeta genciana (CV) por um processo Fenton. O oxidante escolhido foi H₂O₂ novamente. Diferente do estudo anterior, houve um tratamento térmico no pó de basalto para identificar possíveis melhorias na porcentagem de remoção final. Foram testadas 4 amostras de pó de basalto: basalto puro (sem tratamento prévio), sinterizado a 300 °C, sinterizado a 600 °C e a 900 °C. O efeito do pH também foi estudado, sendo pH 2 e 6 as escolhas dos Autores. A concentração de catalisador e a concentração inicial de oxidante também foram otimizadas. A melhor condição de operação obtida foi basalto sinterizado a 600 °C, pH 6, 1 g/L de catalisador

e 12 mM de H_2O_2 para ambos os corantes. A máxima remoção obtida foi de 95,7% para o verde malaquita e 97% para violeta genciana.

Os Autores Saleh *et al.* (2021) e Saleh *et al.* (2022) chegaram a conclusões similares. O pó de basalto possui inúmeras vantagens: além de ter sido eficiente na degradação dos quatro tipos de corante, o pó de basalto é um resíduo produzido pela prática de mineração e não possui valor comercial. Logo o basalto é uma opção extremamente viável e que deve ser considerada em futuros estudos sobre o tema.

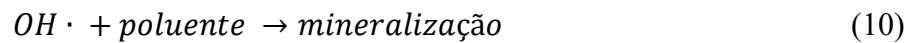
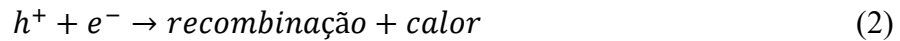
Almeida *et al.* (2022) comparam dois métodos de degradação diferentes. Adsorção e a fotocatalise, outro processo oxidativo avançado. Os Autores também compararam a eficácia de duas rochas trituradas como catalisador: o basalto e o granito. O contaminante escolhido foi para preparação de solução sintética foi o corante Basic Yellow 96 geralmente utilizado para melhorar o aspecto de comidas, embalagens etc. O experimento também utilizou amostras de efluentes industriais contendo o corante para os testes de degradação. Estes Autores concluíram que a capacidade adsorção do pó de basalto é superior à do granito e que não somente o basalto, mas possivelmente qualquer pó de rocha pode ser utilizado como catalisador na fotocatalise heterogênea. Além disso, concluem que o basalto é uma opção mais viável por conta de sua abundância e natural granulometria que permite uma área superficial superior à de muitos outros tipos de rocha, como por exemplo o granito. Mais detalhes sobre esse artigo são fornecidos no item 3.

2.4 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

Processos oxidativos avançados (POAs) são umas das tecnologias mais promissoras no tratamento de efluentes dos últimos anos (QIU *et al.*, 2019). O que categoriza um POA é a mineralização dos contaminantes em moléculas menos complexas e menos tóxicas, como sais, CO_2 e água ou ainda em moléculas menores, mais fáceis de serem degradadas. Essa transformação acontece geralmente, devido à formação de radicais hidroxila ($\bullet OH$) pela ação de um oxidante que agem quebrando as moléculas complexas. Processos em que há a formação de outros radicais como o $SO_4^{\bullet-}$ e o Cl^{\bullet} também são considerados POAs (THOMAS *et al.*, 2021).

A fotocatalise heterogênea é uma das tecnologias mais clássicas de POAs. Nesse caso o principal agente oxidante é a luz que pode ser tanto artificial quanto solar. O catalisador mais conhecido é o TiO_2 , um semicondutor (QIU *et al.*, 2019). Quando a energia do fóton irradiado

é maior do que o gap de energia do TiO_2 acontece a formação de elétrons que saem da banda de valência para a banda de condução formando buracos que podem receber elétrons de outras moléculas, ocasionando sua oxidação (THOMAS *et al.*, 2021). As equações abaixo retiradas de Qiu *et al.* (2019) demonstram o mecanismo de reação.



A grande questão é que o TiO_2 é um catalisador não natural e difícil de ser retirado do meio aquoso. Isso significa que tratamentos posteriores a fotocatalise seriam necessários para recuperar o óxido de titânio (QIU *et al.*, 2019). Portanto, os catalisadores heterogêneos mais fáceis de serem removidos da água e de fontes naturais são essenciais para o avanço das pesquisas no tema.

No Fenton a formação de íons hidroxila por agentes oxidantes é aprimorada por uma fonte de íons Fe II ou Fe III. O foto-Fenton utiliza luz para potencializar a oxidação da reação Fenton. O Fenton original ocorre de forma homogênea em meio ácido (pH em torno de 2,8), porém seria necessário tratar a água antes e após o processo, para não haver depósito de ferrugem e manter a água com pH neutro não prejudicando o meio no qual a água será descartada (Figura 3). Uma solução é o Fenton heterogêneo no qual a oxidação pode ocorrer por dois mecanismos distintos: Pela ação da fonte de ferro como catalisador heterogêneo ou pelos íons Fe II e Fe III liberados pelo catalisador sólido produzindo um processo homogêneo (THOMAS *et al.*, 2021).

Saleh *et al.* (2022) descreve o mecanismo de um processo Fenton através das equações abaixo.

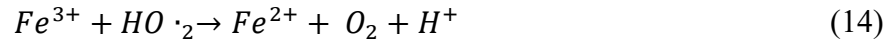
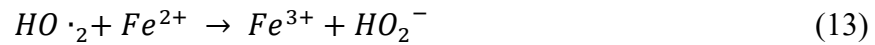
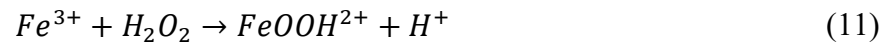
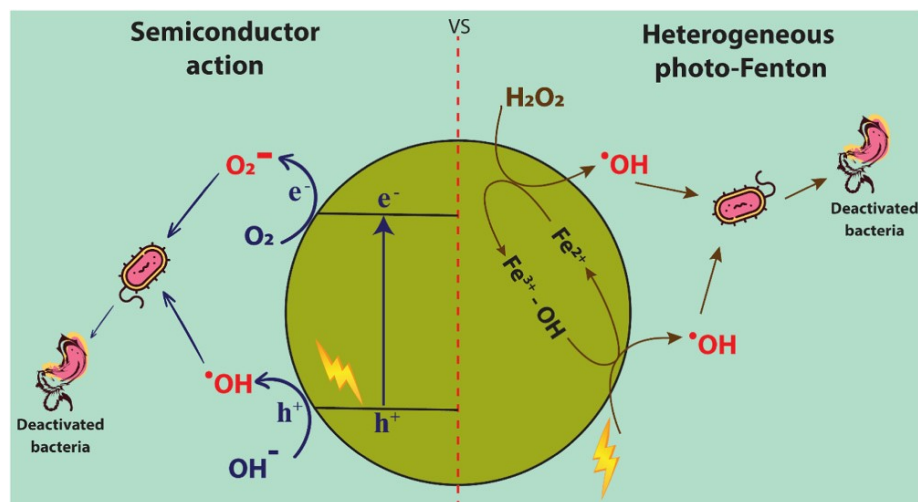


Figura 3 – Ilustração de Execução de Mecanismo de Catálise e Foto-Fenton Heterogêneo



Fonte: (THOMAS *et al.*, 2021)

Em alguns casos o Fenton permite que a reação ocorra em meio neutro, o que seria essencial para a diminuição dos custos do processo (SALEH *et al.*, 2022). Existe um vasto estudo de processos Fenton e foto-Fenton com óxidos de ferro como catalisadores heterogêneos. Geralmente, nesses óxidos a estrutura cristalina dá a eles uma estabilidade em separar as moléculas de oxidante. Alguns exemplos de fontes de óxidos de ferro naturais mais comuns são a magnetita, ferridrita, hematita e goetita (THOMAS *et al.*, 2021). Saleh *et al.* (2021) consideram em torno de 5% a 15% de hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) uma quantidade satisfatória para um bom catalisador heterogêneo natural.

Sendo assim, apesar do basalto ser uma rocha que não possui uma composição química específica, já que depende do local onde foi cristalizada, a rocha basáltica tem o potencial de

ser uma fonte de ferro com mínimos tratamentos requeridos antes e após sua utilização em processos Fenton e foto-Fenton como demonstra Saleh *et al.* (2021) e Saleh *et al.* (2022).

2.4.1 Caracterizações Realizadas no Pó de Rocha Basáltica visando Processos Oxidativos Avançados

Na Tabela 5 a seguir são apresentadas as caracterizações do pó de basalto realizadas por estudos que empregaram POAs.

Tabela 5 – Caracterizações Empregadas no Pó de Basalto em Estudos Aplicando POAs

Referência	Métodos Analíticos
Saleh <i>et al.</i> (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • Fluorescência de raios X (FRX) • Difração de raios X (DRX) • Análise de Brunauer Emmett-Teller (BET) • Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) • Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ligada com raios-X dispersivos de energia (EDS)
Saleh <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Fluorescência de raios X (FRX) • Difração de raios X (DRX) • Análise de Brunauer Emmett-Teller (BET) • Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)
Almeida <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Difração de raios X (DRX) • Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) ligada com raios-X dispersivos de energia (EDS)
Pires <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Fluorescência de raios X (FRX) • Difração de raios X (DRX) • Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Fonte: (SALEH *et al.* 2021, SALEH *et al.* 2022, ALMEIDA *et al.* 2022 e PIRES *et al.* 2022)

O método FRX é uma tecnologia que permite identificar a composição química de sólidos. Através da incidência de raios X sob o material, os elétrons se excitam e se deslocam, o que libera energia na forma de fluorescência e assim, como cada elemento possui um espectro característico, é possível avaliar os compostos químicos presentes no material (PIRES *et al.*, 2022). Na Tabela 6 foram apresentadas as análises FRX de cada estudo expostos na Tabela 5.

Dentre os estudos que analisaram o pó de rocha por FRX, é possível notar que a composição química de todas as três amostras analisadas é semelhante, mesmo que a rocha seja oriunda de locais diferentes: Saleh *et al.* (2021) e Saleh *et al.* (2022) usaram amostras encontradas na Turquia enquanto a de Pires *et al.* (2022) foi encontrada no Brasil.

Tabela 6 – Composição Química das Amostras de Pó de Basalto

Fórmula	(Saleh <i>et al.</i> 2021)	(Saleh <i>et al.</i> 2022)	(Pires <i>et al.</i> 2022)
SiO ₂	44,80%	44,75%	48,91%
Al ₂ O ₃	15,39%	15,39%	15,14%
Fe ₂ O ₃	10,61%	10,61%	13,24%
CaO	8,68%	8,68%	9,52%
MgO	11,64%	11,64%	4,49%
TiO ₂	2,03%	2,03%	3,35%
Na ₂ O	3,16%	3,16%	2,99%
K ₂ O	1,41%	1,41%	1,34%
P ₂ O ₅	0,62%	0,62%	0,51%
MnO	0,18%	0,18%	0,17%

Fonte: (SALEH *et al.* 2021, SALEH *et al.* 2022 e PIRES *et al.* 2022)

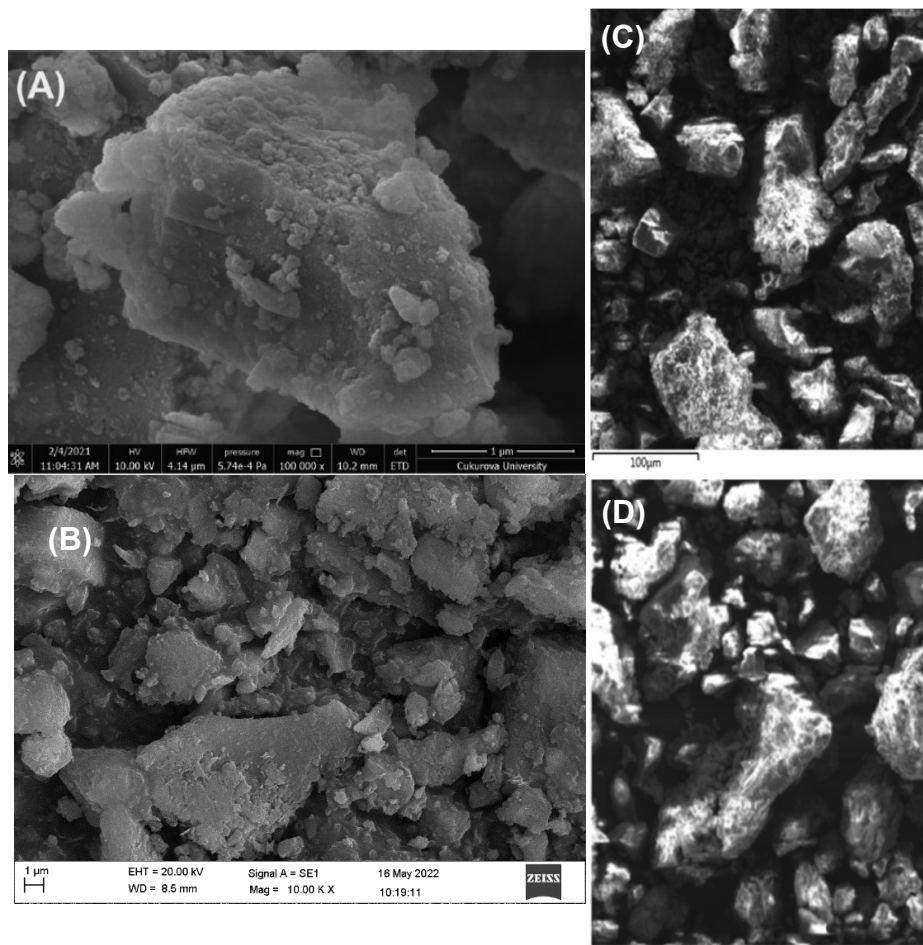
Além disso, as três amostras possuem quantidades de ferro suficientes para serem usadas como catalisador heterogêneo em processos Fenton e foto-Fenton. A presença de alguns elementos alcalinos como CaO, MgO e Na₂O possuem a capacidade de promover um aumento

de pH em meios sólidos e líquidos (PIRES *et al.*, 2022). Por fim, vale ressaltar que a presença de TiO_2 por si só já indica a capacidade do basalto de ser um bom fotocatalisador.

Os métodos MEV e BET são utilizados para caracterizar a superfície de materiais sólidos. O MEV captura a superfície do material em imagens que possuem 300.000 vezes de aumento (PIRES *et al.*, 2022). A análise BET mede a área superficial de sólidos, o volume e o diâmetro dos poros e o volume dos microporos (SALEH *et al.*, 2021).

As análises MEV das rochas basálticas utilizadas nos estudos acima são apresentadas na Figura 4 a seguir. A similaridade entre as rochas é notável. Todas as quatro amostras presentes demonstram uma superfície heterogênea e irregular. De acordo com Pires *et al.* (2022), a amostra empregada em seu estudo apresenta pouca porosidade, as partículas são ásperas e irregulares, assim como as de Saleh *et al.* (2021).

Figura 4 - Análises MEV das Amostras de Pó de Basalto



Fonte: Figura 4A - (SALEH *et al.* 2021); Figura 4B – (PIRES *et al.* 2022); Figura 4C e 4D – (ALMEIDA *et al.* 2022)

Os resultados da análise BET de Saleh *et al.* (2021) e de Saleh *et al.* (2022) indicam uma área superficial de 2,7568 m²/g em ambas as amostras. Um destaque importante do estudo de Saleh *et al.* (2022): como há a sinterização térmica prévia do pó de rocha, é possível notar que a área superficial decai com o aumento da temperatura sendo que na temperatura de sinterização de 900 °C a área superficial foi de 0,9035 m²/g.

A análise DRX revela quais são as estruturas cristalinas presentes no pó da rocha, sendo possível analisar algumas propriedades como por exemplo a estabilidade do material e sua possibilidade de reuso (PIRES *et al.* 2022). Na Tabela 7 é apresentado um resumo das estruturas cristalinas presentes nos estudos citados acima.

Tabela 7 – Estruturas Cristalinas Identificadas por Análise DRX

Referência	Estruturas Cristalinas
Saleh <i>et al.</i> (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • Quartzo - SiO₂ • Hematita - α-Fe₂O₃ • Óxido de magnésio - MgO
Saleh <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Quartzo • Hematita • Óxido de magnésio
Almeida <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Quartzo • Albita – NaAlSi₃O₈ • Microlina - K(AlSi₃O₈) • Labradorita - ((Ca,Na)(Al,Si)₄O₈)
Pires <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Quartzo • Alumina • Hematita

Fonte: (SALEH *et al.* 2021, SALEH *et al.* 2022, ALMEIDA *et al.* 2022, PIRES *et al.* 2022)

Saleh *et al.* (2021) realizaram a análise DRX no pó de basalto antes e a após os processos de Fenton e foto-Fenton. Como não houve modificação na estrutura cristalina após a oxidação das moléculas de corante, pode-se considerar o pó de basalto estável quimicamente. O mesmo acontece com Saleh *et al.* (2022) que fizeram a análise DRX após a sinterização de amostras de pó de basalto em diferentes temperaturas. Não houve transformações nos cristais presentes mesmo a temperaturas altas de 600 °C e 900 °C.

Saleh *et al.* (2021) investigaram quais eram as cargas na superfície do basalto pelo equipamento de potencial zeta e descobriram que as cargas eram negativas. Fizeram o mesmo teste com as soluções com contaminantes e foi possível notar que o azul de metileno e o Basic

ed 18 possuíam cargas positivas, o que favoreceu a atração eletrostática entre o poluente e o catalisador. Isso pode indicar que o basalto possui uma capacidade de catálise maior quando o componente oxidado tem carga oposta a ele.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso adotado tem como título “The Adsorptive and Photocatalytic Performance of Granite and Basalt Waste in the Discoloration of Basic Dye” (ALMEIDA *et al.* 2022)

3.1 RESUMO

Esse estudo compara dois processos de tratamento de efluentes (Adsorção e Fotocatálise Heterogênea) aplicados a dois efluentes (amostras contendo efluente industrial e outra contendo uma solução sintética com o corante Basic Yellow 96) empregando o pó de duas rochas diferentes (basalto e granito), ambos como adsorvedor e catalisador. As amostras de basalto e granito foram feitas em duplicata e caracterizadas por MEV/EDS e DRX. Os principais elementos encontrados em ambas as rochas foram O, Si, Fe, Al, Na, Ca e K, porém com proporções diferentes. As amostras foram nomeadas como Rp-1B, Rp-2B, Rp-3G e Rp-4G sendo as duas primeiras referentes ao basalto e as seguintes ao granito. Os Autores observaram que a área superficial específica (S_0) do pó de basalto era de 7 a 10 vezes maior que a do pó de granito e calcularam o gap de energia (E_{gap}) de cada uma das amostras, assim como o comprimento de onda de absorção (λ). Os tamanhos das partículas de granito eram maiores que 100 nm enquanto as de basalto foram de 49 nm (Rp-1B) e 91 nm (Rp-2B). Os primeiros testes foram realizados com o efluente sintético. As quatro amostras de pó de rocha desempenharam uma satisfatória atividade catalítica. Porém as amostras de basalto se mostraram eficientes adsorvendo a molécula do corante. Ambas as quatro amostras se mostraram eficientes na descoloração do efluente chegando a 94% de descoloração em 3 horas de processo. Para tratar o efluente industrial, os Autores decidiram seguir com a adsorção seguida da fotocatalise. As amostras de pó de rocha escolhidas para seguir foram a Rp-3G e a Rp-2B. A concentração de pó de rocha foi de $6,0 \text{ g L}^{-1}$. Foi utilizado luzes natural e artificial para os testes e não houve correção de pH. Os resultados de descoloração das amostras foram de 98% para Rp-2B com radiação solar e artificial e de 91% para Rp-3G por radiação artificial e 86% para Rp-3G por radiação solar. Os resultados da TOC (carbono orgânico total) após o processo indicam que não houve mineralização do efluente industrial já que para quase todas as amostras o valor de TOC encontrado antes e após o tratamento foi de 25 mg L^{-1} . O pó de basalto se revelou um melhor adsorvedor do que fotocatalisador e mais eficiente que o pó de granito, provavelmente por ter uma área superficial específica consideravelmente maior. Ainda assim, o pó de basalto foi considerado com um grande potencial para ser utilizado na área de tratamento de efluentes, pois não são necessárias muitas correções de pH e outros tratamentos prévios para ser empregado nos processos realizados.

Palavras-Chave: Basalto, Granito, Fotocatálise Heterogênea, Adsorção, Tratamento de Efluentes

3.2 METODOLOGIA APLICADA

Os Autores coletaram as amostras de pó de rocha do Paraná e de São Paulo. As rochas foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada a raios-X dispersivos de energia (EDS), espectroscopia fotoacústica, adsorção física de N₂ e difração de raios X (DRX).

Os experimentos fotocatalíticos foram feitos inicialmente com uma solução sintética de corante com água destilada, e em seguida, após escolher as amostras com melhor performance, foram feitos testes em efluente industrial de uma indústria de moldes de polpa de embalagens. Esse efluente foi caracterizado e os dados de Demanda Biológica de Carbono (DBO), Demanda Química de Carbono (DQO) e Carbono Orgânico Total (TOC) foram obtidos, sendo respectivamente 60, 170 e 25 mg L⁻¹. As soluções sintéticas continham 10 µL L⁻¹ de água destilada. O comprimento de onda utilizado no espectrofotômetro de UV-VIS utilizado na determinação das concentrações residuais de corante foi de 430 nm.

O pH da reação não passou por ajustes e a concentração de pó de rocha foi 1 g/L para os testes com efluente sintético e 6 g/L para os testes com efluente industrial. O reator para fotocatalise e para adsorção era de borosilicato com agitador magnético e uma camisa de resfriamento na qual passava um fluxo de ar a 0,5 L min⁻¹. A fonte de luz sintética para os processos de fotocatalise era uma lâmpada de 250 W com irradiação de 7,14 mW/cm² e foram feitos testes com luz solar.

3.3 ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Ao comparar o pó de rocha de Almeida *et al.* (2022) com o pó de Pires *et al.* (2022) é perceptível a diferença no tamanho dos grãos das amostras de basalto. Ainda, quando comparadas o tamanho da área superficial de Almeida *et al.* (2022) com de Saleh *et al.* (2021) e Saleh *et al.* (2022), nota-se que as amostras do estudo em foco nesse tópico possuem muito mais área superficial específica, mesmo o diâmetro dos poros sendo semelhantes (Tabela 8). Isso explica o melhor desempenho que o pó de basalto teve como adsorvedor nesse estudo quando comparado com o de Saleh *et al.* (2021).

Porém, as duas rochas, granito e basalto, obtiveram resultados semelhantes na fotocatalise heterogênea e esse processo não foi tão eficiente na mineralização do efluente

industrial. Isso significa que ambas as rochas têm a mesma capacidade de formar gaps de energia tanto em luz natural quanto na luz artificial utilizada, o que é confirmado pelos valores apresentados na tabela 8. Algumas fontes de luz artificial, como UV-A e UV-C podem ser uma alternativa para testes futuros, já que a capacidade de formar gaps de energia está relacionada à fonte luminosa utilizada (MACHADO, MIRANDA, 2015).

Tabela 8 – Resultados de S_0 , E_{gap} e λ

	S_0 (m ² /g)	E_{gap} (eV)	λ (nm)
Rp-1B	8,5	2,25	551
Rp-2B	15	2,27	546
Rp-3G	1,5	2,16	574
Rp-4G	1,6	2,21	561

Fonte: (ALMEIDA *et al.* 2022)

Ao comparar processos categorizados como POAs, o processo de Fenton e foto-Fenton heterogêneo, mais especificamente o foto-Fenton, podem ser uma alternativa a fotocatalise heterogênea por possuírem uma ação oxidante mais efetiva, já que são duas fontes produzindo radicais hidroxila (o peróxido de hidrogênio e a luz). Nesse caso, a escolha do material natural se torna uma questão importante, já que uma quantidade significativa de Ferro é essencial para o processo. Como Almeida *et al.* (2022) comentaram em seu estudo a quantidade de Ferro presente no basalto é maior do que no granito e maior do que a maioria de outras rochas ígneas provenientes de magmas não basálticos, por conta da composição e de como elas são cristalizadas (GILL, 2014). Logo, é possível que o basalto seja a melhor rocha para ser utilizada como catalisador heterogêneo em processos foto-Fenton.

Algo que não foi mencionado no estudo é a atração eletrostática entre a superfície do pó da rocha e o corante. Como indica Saleh *et al.* (2021), o pó de rocha basáltica tem mais afinidade com moléculas que possuem cargas contrárias à de sua superfície. Sendo assim, investigar a carga da molécula que deve ser degradada assim como da superfície da rocha pode ser uma etapa importante em pesquisas posteriores. Ainda, é importante ressaltar que a reutilização da mesma amostra também influencia no quão viável é o catalisador. Se é possível utilizar a amostra mais de uma vez, o custo na aquisição do material é muito menor. Como Saleh *et al.* (2022) mencionaram, a mesma amostra de catalisador teve eficiência constante por 5 ciclos de reuso.

As vantagens do basalto vão além da quantidade de Ferro em sua composição, como já visto anteriormente. A grande quantidade de rocha disponível na crosta terrestre, o baixo custo envolvendo a aquisição do pó de basalto, já que um resíduo da mineração, o fato de não causar danos ao meio ambiente, possuir estabilidade química e térmica e não ser necessários muitos tratamentos no pó para sua utilização se somam ao tamanho pequeno dos grãos e ao fato de que podem ocorrer processos paralelos ao foto-Fenton que auxiliam ainda mais na degradação de contaminantes diversos.

3.4 CONCLUSÃO

O pó de basalto que Almeida *et al.* (2022) utilizaram se mostrou um bom adsorvedor por possuir uma área superficial específica maior do que as amostras de granito e que amostras de basalto de outros estudos citados anteriormente. O basalto também possui potencial como fotocatalisador heterogêneo, porém o processo de foto-Fenton seria mais eficiente, dado as particularidades do mecanismo de degradação. É necessário testes futuros que demonstrem a compatibilidade entre a molécula contaminante e o pó da rocha, pois isso pode influenciar na eficiência do catalisador. O potencial de reuso do basalto também pode ser investigado mais a fundo, já que isso diminuiria os custos do processo. Ainda assim, o basalto é uma opção extremamente viável no tratamento de efluentes quando se trata de soluções abundantes, naturais e baratas.

4 CONCLUSÃO GERAL DO TRABALHO

É possível concluir que o pó de rocha basáltica possui inúmeras possibilidades de uso na indústria. Desde material para compósitos em cimento e polímeros, como remineralizador de solos, até como adsorvedor no tratamento de efluentes. Porém suas propriedades apresentam atividades catalíticas satisfatórias para processos oxidativos avançados. A composição química da rocha é variável de acordo com o local na qual foi extraída, porém a quantidade de Ferro na composição de todas as amostras de rocha apresentadas é suficiente para seu uso como catalisador em processos do tipo Fenton e foto-Fenton. É possível que processos de tratamento diferentes ocorram em paralelo, já que a área superficial específica das rochas permite que a adsorção do efluente ocorra ao mesmo tempo que um POA.

No mais, para estudos futuros é necessário um enfoque maior na reusabilidade do material e na afinidade química entre as moléculas a serem degradadas e a superfície do pó da rocha. É interessante que pesquisas posteriores apontem o destino do material após seu uso no tratamento de efluentes para que seja uma alternativa ainda mais sustentável do que os atuais estudos indicam.

A aplicação do basalto no tratamento de efluentes seria uma solução para aproveitar um resíduo de mineração de forma eficiente e barata já que, muito provavelmente, esse resíduo pode ser utilizado em sua forma pura, com a ausência de tratamento excessivos antes e após o processo.

5 REFERÊNCIAS

- ALEMU, Agegnehu *et al.* Removal of chromium (VI) from aqueous solution using vesicular basalt: A potential low cost wastewater treatment system. *Heliyon*, v. 4, p. 682, 2018.
- ALEMU, Agegnehu; LEMMA, Brook; GABBIYE, Nigus. Adsorption of chromium (III) from aqueous solution using vesicular basalt rock. *Cogent Environmental Science*, v. 5, n. 1, 2019.
- ALMEIDA, Lariana N.B. *et al.* The Adsorptive and Photocatalytic Performance of Granite and Basalt Waste in the Discoloration of Basic Dye. *Catalysts*, v. 12, n. 10, 1 out. 2022.
- BARCZEWSKI, M. *et al.* Rigid polyurethane foams modified with thermoset polyester-glass fiber composite waste. *Polymer Testing*, v. 81, p. 106190, jan. 2020.
- BASALTO - MATERIAIS DIDÁTICOS. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2020. Acesso em: 23 jan. 2023. Disponível em: <
<https://didatico.igc.usp.br/rochas/igneas/basalto/> >
- BERNABÉ, Bruna Alexandrino. *Polimerização oxidativa de anilina utilizando FeCl₃ como agente oxidante e pó de basalto como codopante - análise gravimétrica e térmica*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2021.
- BLACK, Benjamin A.; KARLSTROM, Leif; MATHER, Tamsin A. The life cycle of large igneous provinces. *Nature Reviews Earth and Environment*. [S.l.]: Springer Nature. , 1 dez. 2021
- CARMICHAEL, (F. J.) TURNER, (J.) Verhoogen. *Igneous Petrology*. New York and London (McGraw-Hill), 1974. p. xvi + 739.
- CHIOSSI, Nivaldo José. *Geologia de Engenharia*. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. p. 31–68.
- COLTICE, N. *et al.* Global warming of the mantle at the origin of flood basalts over supercontinents. *Geology*, v. 35, n. 5, p. 391, 2007.
- DOBISZEWSKA, Magdalena; BEYCIOĞLU, Ahmet. Physical properties and microstructure of concrete with waste basalt powder addition. *Materials*, v. 13, n. 16, 1 ago. 2020.
- ERNST, R. E.; YOUNG, N. How Large Igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 478, p. 30–52, jul. 2017.
- ESAIFAN, Muayad *et al.* Synthesis of hydroxysodalite zeolite by alkali-activation of basalt powder rich in calc-plagioclase. *Advanced Powder Technology*, v. 28, n. 2, p. 473–480, 1 fev. 2017.
- EUTRÓPIO, Géssica Rogaleski. *Revisão Bibliográfica: Resultados promissores com o uso de pó de basalto em solos e nutrição de plantas*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso em Agronomia. Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2021.

- GABRO - MATERIAIS DIDÁTICOS. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2020. Acesso em: 23 jan. 2023. Disponível em: <<https://didatico.igc.usp.br/rochas/igneas/gabro/>>
- GILL, Robin. Os Basaltos e Rochas Afins. *Rochas e Processos Ígneos: Um Guia Prático*. 1. ed. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2014. p. 20–64.
- HARTLIEB, P. *et al.* Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution. *Minerals Engineering*, v. 91, p. 34–41, 15 maio 2016.
- HWANG, Kyung Jun *et al.* Synthesis of zeolitic material from basalt rock and its adsorption properties for carbon dioxide. *RSC Advances*, v. 8, n. 17, p. 9524–9529, 2018.
- IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, Informações sobre a Economia Mineral Brasileira, Vol 2020, p.56. Acesso em: 23 jan. 2023. Disponível em: <<https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>>
- JAMSHAD, Hafsa; MISHRA, Rajesh. A green material from rock: basalt fiber – a review. *Journal of the Textile Institute*, v. 107, n. 7, p. 923–937, 2 jul. 2016.
- KE, Guojun; SHEN, Haichen; YANG, Pengfei. Synthesis of X-Zeolite from Waste Basalt Powder and its Influencing Factors and Synthesis Mechanism. *Materials*, v. 12, n. 23, p. 3895, 26 nov. 2019.
- KURÁŃSKA, Maria *et al.* Basalt waste management in the production of highly effective porous polyurethane composites for thermal insulating applications. *Polymer Testing*, v. 76, p. 90–100, 1 jul. 2019.
- LICHT, Otavio Augusto Boni. A EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE A PROVÍNCIA ÍGNEA DO PARANÁ - DOS PRIMÓRDIOS ATÉ 1950. *Revista do Instituto Geológico*, v. 35, n. 2, 2014.
- LUCHESE, Vagheti Augusto *et al.* Agronomic feasibility of using basalt powder as soil nutrient remineralizer. *African Journal of Agricultural Research*, v. 17, n. 3, p. 487–497, 31 mar. 2021.
- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Photovoltaic Solar Energy: A Briefly Review. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 1, 2015.
- MAHMOUD, K. A. *et al.* Investigation of radiation shielding properties for some building materials reinforced by basalt powder. 6 dez. 2019, [S.l.]: American Institute of Physics Inc., 6 dez. 2019.
- PREFEITURA de Uberlândia Lança 1º polo Agromineral Verde do Brasil. **Prefeitura de Uberlândia**, 2021. Disponível em: <<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2021/12/08/prefeitura-de-uberlandia-lanca-1o-polo-agromineral-verde-do-brasil/>>. Acesso em: 23 de jan. de 2023.
- PREFEITURA Publica cartilha Virtual com Resultado de Estudos sobre Pó de basalto. **Prefeitura de Uberlândia**, 2022. Disponível em:

<<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2023/01/20/prefeitura-publica-cartilha-virtual-com-resultado-de-estudos-sobre-po-de-basalto/>>. Acesso em: 23 jan. de 2023.

PIRES, Nicolle S *et al.* *CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ROCHA BASALTICA PARA APLICAÇÃO EM PROCESSOS DO TIPO FOTO-FENTON*. *XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. [S.l.: s.n.], 2022

QIU, Linlin *et al.* Microwave Hydrothermal Synthesis of Basalt Fibers/Titanium Dioxide and Their Photocatalytic Activity for the Degradation of Rhodamine B. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 19, n. 9, p. 5723–5728, 9 abr. 2019.

SALEH, Mohammed *et al.* Investigation of Basalt Properties as Heterogeneous Catalyst for Fenton Oxidation of Textile Wastewater. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 50, n. 1, 1 jan. 2022.

SALEH, Mohammed *et al.* The use of basalt powder as a natural heterogeneous catalyst in the Fenton and Photo-Fenton oxidation of cationic dyes. *Advanced Powder Technology*, v. 32, n. 4, p. 1264–1275, 1 abr. 2021.

SANTOS, Lázara de Cássia. *Compartimentação topográfica da bacia do rio uberabinha a montante do sítio urbano de Uberlândia/MG*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

SOARES, Arthur Viegas. *Geologia na palma da mão: Uma proposta de valorização de divulgação para o Salto da Prata, Ituiutaba-MG*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, 2020.

SOUZA, Gabriel Vinicius Lima De. *Avaliação da eficiência agrônômica do pó de rocha basáltica como remineralizador de solos*. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Agrônômica. Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2022.

THOMAS, Nishanth; DIONYSIOU, Dionysios D.; PILLAI, Suresh C. Heterogeneous Fenton catalysts: A review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*, v. 404, 15 fev. 2021.

XIONG, Wei; WELLS, Rachel K.; GIAMMAR, Daniel E. Carbon Sequestration in Olivine and Basalt Powder Packed Beds. *Environmental Science and Technology*, v. 51, n. 4, p. 2105–2112, 21 fev. 2017.

ZHANG, Dongxiao; SONG, Juan. Mechanisms for geological carbon sequestration. 2014, [S.l.]: Elsevier B.V., 2014. p. 319–327.