

EFEITO DO TRATAMENTO ÁCIDO NAS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS E QUÍMICAS NO REJEITO DA MINERAÇÃO DA VERMICULITA

TAFFAREL ELOI DE MOURA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

ANGÉLICA OLIVEIRA DE ALENCAR

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

JOELDA DANTAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

ELVIA LEAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

Introdução

A extração de vermiculita gera resíduos com grande potencial poluente. Estes materiais, embora ainda pouco estudados, podem ser aproveitados, por exemplo, na agricultura, na construção civil e na indústria química, contribuindo para mitigar parte dos impactos ambientais da mineração.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Esta pesquisa objetivou ativar o resíduo de vermiculita a partir do tratamento com ácido clorídrico (HCl), e posteriormente avaliá-lo, visando a obtenção de um material para aplicações industriais.

Fundamentação Teórica

A Vermiculita é um argilomineral que apresenta propriedades particulares, como elevada capacidade de troca catiônica, capaz de modificar quimicamente sua estrutura e influenciar suas propriedades físico-químicas tornando possível sua aplicação em processos tecnológicos. A exploração da vermiculita tem causado sérios impactos ambientais. Várias pesquisas estão sendo desenvolvidas visando a mitigação desses impactos, dentre elas a reutilização desses rejeitos, capaz de promover o desenvolvimento sustentável mediante a criação de produtos a partir de materiais alternativos.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida no anexo de biocombustíveis do Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LaBSMaC), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, (UAEMA) da Universidade Federal de Campina Grande. O rejeito de vermiculita foi ativado com HCl e as seguintes caracterizações foram realizadas: Difração de Raios X (DRX) e Espectroscopia de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX).

Análise dos Resultados

O resultado de DRX mostrou que a amostra reduziu a cristalinidade em 32% e o tamanho de cristalito em 39% quando comparada a amostra sem qualquer tratamento. De acordo com os resultados da análise de EDX, foi possível confirmar a redução significativa na porcentagem de cátions trocáveis (Mg²⁺ e Al³⁺), indicando possivelmente o aumento do número de sítios ácidos na superfície do material.

Conclusão

O material analisado apresenta potencial para ser aplicado em uma ampla variedade de campos tecnológicos emergentes, como microeletrônica, catalisadores, biomateriais, absorvedores, cerâmica, revestimentos e armazenamento de energia, sendo capaz de promover o desenvolvimento sustentável mediante a criação de produtos constituídos a partir de materiais considerados alternativos.

Referências Bibliográficas

DE VARGAS BRIÃO, G.; DA SILVA, M. G.; VIEIRA, M. G. A. Expanded vermiculite as an alternative adsorbent for the dysprosium recovery. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, v. 127, p. 228-235, 2021. W?GRZYN, A.; STAWI?SKI, W.; FREITAS, O.; KOM?DERA, K.; B?ACHOWSKI, A.; J?CZMIONEK, L.; FIGUEIREDO, S. Study of adsorptive materials obtained by wet fine milling and acid activation of vermiculite. Applied Clay Science, v. 155, p. 37-49, 2018.

Palavras Chave

Ativação ácida, Rejeito de vermiculita, Cristalinidade

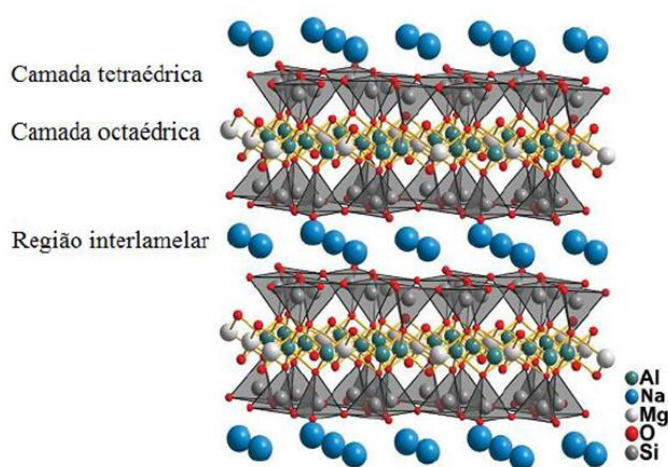
EFEITO DO TRATAMENTO ÁCIDO NAS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS E QUÍMICAS NO REJEITO DA MINERAÇÃO DA VERMICULITA

1 INTRODUÇÃO

Os argilominerais são usualmente definidos como materiais naturais, terrosos, de fina granulação, apresentando diâmetro de partícula inferior a 2 μm , capazes de adquirir plasticidade quando misturadas com água e de endurecer após secagem ou queima. Os pertencentes à família dos silicatos lamelares ou filossilicatos (unidades de tetraedros que compartilham três vértices) se destacam por suas propriedades particulares, como expansão por tratamento térmico e elevada área superficial. São essencialmente formados por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, mas também apresentam na sua composição geral outros tipos de minerais tais como quartzo, feldspato, carbonatos, óxidos metálicos e até mesmo matéria orgânica. As argilas Montmorilonitas, Vermiculitas e Atapulgitas são exemplos de argilominerais (NASREEN et al., 2017).

A Vermiculita é um argilomineral pertencente ao grupo dos filossilicatos. É, portanto, um alumino silicato hidratado de magnésio, ferro e alumínio com aparência micácea, estrutura lamelar e com diferentes composições químicas e propriedades físicas, cuja fórmula estrutural pode ser expressa, aproximadamente, por $(\text{Mg,Ca})_{0.7}(\text{Mg,Fe,Al})_{6.0}[(\text{Al,Si})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{4.8}\text{H}_2\text{O}$. A estrutura desse argilomineral está ilustrada na Figura 1 (ONEN et al., 2021; LIU et al.; 2023).

Figura 1 - Estrutura da vermiculita.



Fonte: Adaptado de Liu et al., 2021.

Esse argilomineral é representante dos filossilicatos de camadas 2:1 (duas camadas tetraédricas de silicato e uma camada octaédrica), com íons Mg^{2+} ou Al^{+3} entre as camadas tetraédricas, unidas entre si por oxigênios comuns às camadas, semelhante a um sanduíche, onde um íon Mg^{2+} ou Al^{+3} é coordenado octaedricamente a seis oxigênios ou hidróxidos (PETERSEN et al., 2021).

O mineral vermiculita é o produto resultante da alteração de micas, mais comumente da biotita e em sua estrutura cristalina pode surgir um grande número de minerais em camadas mistas interestratificadas de mica-vermiculita e clorita-vermiculita, bem como o aparecimento de frações ternárias e quaternárias de vermiculita como ilita, clorita, talco e/ou montmorilonitas na sua composição final. Ela surge pelo processo de intemperismo, em zonas de falhas ou por alteração hidrotermal em baixa temperatura (acima de 350 $^{\circ}\text{C}$, a vermiculita é instável) de piroxenitos, peridotitos, dunitos, carbonatitos e anfibolitos (ONEM et al., 2021).

A vermiculita apresenta propriedades particulares, como elevada capacidade de troca catiônica (CTC), que varia de 100 a 150 meq/100 g (MA et al., 2021), sendo esta uma propriedade importante, pois, pela troca de cátions é possível modificar quimicamente a estrutura desses materiais, influenciando diretamente sobre suas propriedades físico-químicas e tornando possível a sua aplicação em processos tecnológicos (CVEJN et al., 2021). Além de expansão por tratamento térmico, causada pela liberação rápida das moléculas de água na forma de vapor que dá a esse mineral a capacidade de expansão, possibilitando o aumento do seu volume, a diminuição da sua densidade e o aumento da sua área superficial (XU et al., 2023).

Este material apresenta um enorme potencial em aplicações industriais e ambientais, podendo ser usado na construção civil, como isolante térmico e acústico; na indústria, para absorção de óleos e contaminantes orgânicos em casos de derramamentos; na agricultura sendo bastante utilizado na composição de fertilizantes aplicados como corretivo e condicionador de solos; bem como no ramo da química, para ser aplicado em misturas com resinas e em suportes catalíticos (LIU et al., 2021; ZHANG et al., 2023).

A exploração da vermiculita tem causado impactos ambientais consideráveis devido ao grande acúmulo de rejeitos gerados desse processo, alterando intensamente as regiões de mineração e as áreas vizinhas, onde são depositadas as pilhas desses rejeitos a céu aberto, promovendo a degradação da vegetação local, causando irregularidades topográficas e consequentemente poluição visual. Os rejeitos da vermiculita são constituídos de solos com altos teores de nutrientes e minerais, tais como silício, magnésio, ferro e alumínio. Porém, esses materiais não possuem estudos de viabilidade econômica para o tratamento na própria indústria (ALENCAR et al., 2015; DIAS et al., 2018).

Diante desse cenário, várias pesquisas estão sendo desenvolvidas visando práticas que possibilitem a mitigação dos impactos causados pela mineração local, dentre elas tem-se a reutilização ou reciclagem desses rejeitos, capaz de promover o desenvolvimento sustentável mediante a criação de produtos constituídos a partir de materiais considerados alternativos (DIAS et al., 2018).

O resíduo da mineração da vermiculita vem sendo estudado para utilização na agricultura, devido a sua quantidade de potássio (FRANÇA et al., 2010) e na construção civil com estudos em argamassas devido a sua composição química (rico em magnésio, ferro e alumínio) e granulométrica (MAITI et al., 2023). As maiores vantagens da utilização de resíduos minerais na produção de materiais de construção estão atreladas a sua abundância resultante do processo de beneficiamento mineral, bem como a possível redução dos custos de produção (ROJAS-RAMIREZ et al., 2019).

A vermiculita e os seus rejeitos não são ativos na sua forma natural e necessitam de tratamentos térmicos e/ou químicos capazes de modificar a estrutura, a composição e as suas propriedades. O ataque químico, geralmente, é feito por ácidos inorgânicos. A reação de lixiviação desses materiais com ácido provoca a destruição parcial ou total da folha octaédrica, através da reação entre o silicato e um ácido inorgânico, como o ácido clorídrico, promovendo a retirada seletiva de elementos estruturais, tais como magnésio e alumínio. O intuito do ataque ácido é o de formar grupos silanóis livres reativos na superfície, capazes de influenciar na interação desses sólidos com outras espécies em solução (MAROSZ et al., 2020). Além de proporcionar um aumento na área superficial, na acidez, na porosidade, no volume de poro e até mesmo na estabilidade térmica desses materiais (CHAARI et al., 2021).

A intensidade do tratamento ácido deve ser escolhida de acordo com a finalidade da aplicação do material, para que as propriedades mais importantes sejam ajustadas da melhor maneira. Em catálise, por exemplo, pode haver a necessidade de um material com alta acidez de Brønsted. Nestes casos, as melhores condições de acidez e atividade catalítica são obtidas quando os materiais são tratados com ácidos brandos, pois estes são capazes de aumentar o número de sítios ácidos na superfície (STAWINSKI et al., 2018).

A literatura cita diferentes trabalhos que fizeram aplicação da vermiculita natural ou modificada quimicamente, em processo de adsorção. A vermiculita expandida, tem aplicação eficiente como material adsorvente no tratamento de efluentes com metais pesados, com eficiência comprovada na retenção de chumbo e cádmio (HASHEM et al., 2015), como também na adsorção de disprósio (97,6%), chumbo (80,1%), níquel (70,1%), cádmio (52%) e cobre (51,7%) (VARGAS et al., 2021). Na área de combustíveis e biocombustíveis a vermiculita também apresenta excelentes resultados como adsorvente, a exemplo dos trabalhos de Mysore et al. (2005) quando estudaram a vermiculita expandida e hidrofobizada no tratamento de efluentes oleosos da indústria do petróleo, bem como na contenção de derramamentos de óleo acidentais em superfícies aquáticas chegando a 93% de remoção.

Tais relatos confirmam a eficiência da vermiculita em diversas áreas. No entanto, sabe-se que a indústria da mineração causa impactos ambientais consideráveis. Desse modo, visando mitigar tais impactos e levando em consideração que os rejeitos de vermiculita dispõem desse próprio argilomineral, porém em menores quantidades, a possibilidade de esses rejeitos apresentarem eficiência nas mais diversas aplicações industriais também é real apesar de não ser relatada na literatura.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é ativar com ácido clorídrico (HCl) o rejeito de vermiculita oriundo da cidade de Santa Luzia, no estado da Paraíba e caracterizá-lo tanto na sua forma natural como após ativação ácida visando sua aplicação em processos industriais.

2 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta caráter quali-quantitativo, exploratório e laboratorial (PEREIRA et al., 2018) e foi desenvolvido no anexo de biocombustíveis do Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LaBSMaC), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, (UAEMa) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) na Paraíba.

2.1 ATIVAÇÃO ÁCIDA DO REJEITO DE VERMICULITA

O rejeito de vermiculita utilizado nesse estudo foi oriundo do Município de Santa Luzia, localizado no estado da Paraíba-PB. O material obtido passou por um processo de maceração com o auxílio de um pistilo e almofariz, e posteriormente foi peneirado em uma peneira com padrão de malha de 200 mesh. Após a maceração foi feita a secagem desse material em estufa a 70 °C.

O rejeito peneirado em malha de 200 mesh foi ativado pela reação de 50 g do material com 500 mL de solução aquosa de ácido clorídrico (HCl) a 2 mol.L⁻¹. O sistema foi mantido em agitação contínua por 1 hora a uma temperatura de 80 °C. O sólido obtido foi então filtrado, lavado exaustivamente com água destilada até que o pH do filtrado ficasse igual ao pH da água utilizada para a lavagem (cerca de 2 litros) e seco por 24 horas em estufa a temperatura de 60 °C. A metodologia para a ativação ácida foi adaptada dos estudos de Yang et al. (2020) quando utilizou HCl a 0,05 mol.L⁻¹, a uma temperatura de 65 °C durante o período de 2 horas, em seu estudo sobre os efeitos da lixiviação ácida nas propriedades termofísicas de materiais compostos de parafina/vermiculita expandida.

Os sólidos obtidos foram denominados RVR (Rejeito de vermiculita) e RVRA (rejeito de vermiculita ativado). Posteriormente, foram encaminhados para as devidas caracterizações.

2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

A determinação das fases presentes, a cristalinidade e o tamanho de cristalito do rejeito, antes e após ativação ácida, foram determinados utilizando um difratômetro de raios X Bruker,

modelo D2 Phaser. A varredura foi realizada na região de $10 \leq 2\theta \leq 90^\circ$, a uma taxa de varredura de $0,016^\circ/\text{min}$ e radiação CuK_α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$) aplicando tensão e corrente anódica de 40 kV e 30 mA, respectivamente. O *software* Diffrac.EVA foi utilizado para analisar as fases cristalinas usando o banco de dados do Powder Diffraction File (PDF-2).

2.3 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (EDX)

A determinação semiquantitativa dos elementos presentes nos rejeitos foi analisada por espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva, utilizando o modelo EDX-720, da marca SHIMADZU.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ATIVAÇÃO ÁCIDA DO REJEITO DE VERMICULITA

O rejeito de vermiculita após passar pela operação de diminuição das partículas apresentou coloração ligeiramente amarronzada (Figura 2 (a)). Posteriormente, com o processo de ativação ácida utilizando ácido clorídrico (HCl) foi possível observar a mudança de coloração para cor esverdeada (Figura 2 (b)). A Figura 2 ilustra o rejeito de vermiculita antes e após ativação ácida.

Figura 2 - Rejeito de vermiculita antes e após ativação ácida. (a) RVR e (b) RVRA.



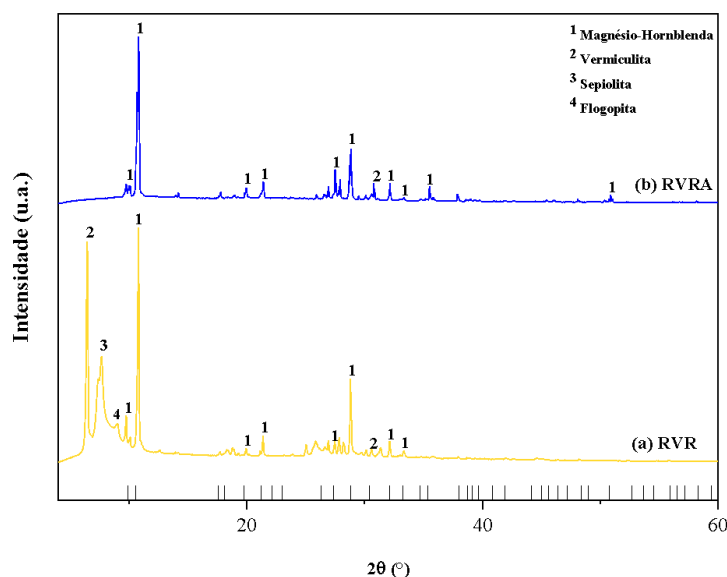
Fonte: Autoria própria, 2022.

A mudança de coloração indica que houve um fenômeno químico no processo de ativação ácida, provavelmente promovendo a retirada seletiva de elementos estruturais e formando novos grupos livres reativos na superfície deste sólido. Tal fenômeno pode ser confirmado através dos resultados obtidos nas análises de DRX e EDX.

3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

As curvas de difração de Raios X do rejeito de vermiculita (RVR) e rejeito de vermiculita ativado (RVRA), estão representadas na Figura 3 (a) e (b), respectivamente. A composição mineralógica de caráter qualitativo identificou os minerais: Magnésio-hornblenda, Vermiculita, Sepiolita e Flogopita.

Figura 3 - Curvas de difração de raios X do rejeito de vermiculita antes e após ativação ácida: (a) RVR) e (b) RVRA.



Fonte: Autoria própria, 2022.

As curvas de difração de raios X de ambos os rejeitos de vermiculita exibiram a presença dos picos principais característicos da estrutura do magnésio-hornblenda, evidenciados pelo aparecimento do pico principal $2\theta = 10,52^\circ$, conforme ficha cristalográfica PDF 00-020-0481, atribuído ao plano ($d_{hkl} = 110$), mostrando o espaçamento característico basal “d” de 8,4 Å. Este valor está de acordo com aquele encontrado por Silva et al. (2021) quando estudaram a influência do enxofre elementar adicionado ao rejeito de vermiculita visando à liberação de nutrientes no solo, característico das hornblendas, minerais comumente encontrados nos rejeitos de vermiculita do estado da Paraíba.

No rejeito RVR (Figura 3 (a)) é possível observar a presença de picos secundários em $2\theta = 6,15^\circ$, correspondente ao empilhamento das lamelas e característico de um argilomineral do tipo 2:1 (OLIVEIRA et al., 2021), sugerindo um espaçamento basal de 14,34 Å ($d_{hkl} = 002$) de acordo com a Lei de Bragg, atribuídos a estrutura da vermiculita ao se comparar com a ficha do padrão cristalográfico PDF 01-077-002. Resultados semelhantes também foram encontrados por Oliveira et al. (2021) quando estudaram óxido de zinco suportado por vermiculita para ser utilizado como catalisador na pirólise e desoxigenação do óleo de licuri e por You et al. (2023) ao desenvolverem filmes luminescentes sólidos a partir da montagem de nanofolhas de hidrotalcita (LDHs) carregadas positivamente com propriedades fluorescentes provenientes de vermiculita expandida e esfoliada com intuito de resolver o problema da extinção de fluorescência de corantes fluorescentes orgânicos.

Nesse rejeito também se observa a presença dos minerais sepiolita ($2\theta = 7,35^\circ$ ($d_{hkl} = 110$), padrão cristalográfico PDF 01-080-5019) e flogopita ($2\theta = 8,79^\circ$ ($d_{hkl} = 001$) padrão cristalográfico PDF 00-042-1437). Estudos de caracterização mineralógica realizados por Oliveira et al. (2021) mostraram que as vermiculitas de Santa Luzia (PB) apresentam camadas mistas interestratificadas de vermiculita com outras fases mineralógicas, tais como talco, hidrobiotita, biotita e flogopita, estando o rejeito de vermiculita do presente estudo de acordo com os dados relatados na literatura.

Para o rejeito RVRA (Figura 3 (b)) percebe-se uma redução expressiva na intensidade do pico secundário, onde praticamente não se observa mais a presença da fase vermiculita,

indicando uma perda significativa da cristalinidade. Este efeito pode ser explicado pela troca de cátions, como Al^{3+} e Mg^{2+} intercalados por íons hidrônio (H_3O^+) do ácido clorídrico durante a ativação ácida, levando a destruição parcial ou total da estrutura cristalina da vermiculita. Segundo Marosz et al. (2020) e Stawinski et al. (2018), a ativação ácida provoca esfoliação das lamelas e uma menor organização estrutural, devido grande parte dos íons Al^{3+} e Mg^{2+} serem deslocados das camadas octaédricas e transferidos para o espaço interlamelar, onde passam a atuar como sítios ácidos. Desse modo, é possível perceber um decaimento no espaçamento interlamelar da fase vermiculita devido ao ataque ácido, podendo este comprometer a sua estrutura.

A ativação ácida também provocou o desaparecimento dos picos sepiolita e flogopita, antes presentes no rejeito de vermiculita. Segundo Marosz et al. (2020) a ativação ácida também promove a eliminação de diversas impurezas minerais aumentando o número de sítios ácidos na superfície. Portanto, espera-se um aumento na área superficial desses materiais.

A Tabela 1 descreve os resultados da cristalinidade e do tamanho de cristalito para a reflexão de primeira ordem (intensidade 110) dos rejeitos de vermiculita antes e após ativação ácida (RVR e RVRA) referente ao magnésio-hornblenda.

Tabela 1 - Curvas de difração de raios X do rejeito antes e após ativação ácida.

Amostra	Cristalinidade (%)	Tamanho de cristalito (nm)
RVR	61,2	67,62
RVRA	41,6	41,17

Fonte: Autoria própria, 2022.

De acordo com a Tabela 1, observa-se que o tratamento ácido propiciou ao rejeito de vermiculita após ativação ácida uma redução tanto em relação a cristalinidade como ao tamanho de cristalito. Assim, estes dados cristalográficos quando comparados entre si, indicam que os valores para o rejeito RVRA sofreram redução em relação a cristalinidade de 32% e em relação ao tamanho de cristalito uma redução de 39%. Comportamento semelhante foi encontrado no trabalho de Wegrzyn et al. (2018) quando estudaram a ativação ácida da vermiculita para aplicação na área de adsorção e identificaram uma redução de aproximadamente 52% no tamanho de cristalito após tratamento ácido.

Diz-se que, o comportamento da redução de cristalinidade em função do tratamento ácido, possivelmente pode ser atribuído ao aumento da quantidade de metais lixiviados da estrutura inorgânica e esfoliação das lamelas, que podem ser acompanhados pela drástica diminuição da intensidade do pico (002) referente à fase vermiculita. Ademais, baseando-se nos estudos de Silva et al. (2021) a redução do tamanho de cristalito pode ser justificada devido ao fato desse rejeito possuir variadas frações de materiais argilosos em sua composição, logo, pode-se inferir que, quanto maior for a quantidade de impurezas presentes no rejeito de vermiculita, maior tendência ao crescimento das partículas e mais forte será a força de ligação, o que leva a formação de aglomerados densos (sem porosidade interpartícula), o que pode influenciar no tamanho do cristalito.

3.3 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X POR ENERGIA DISPERSIVA (EDX)

A Espectroscopia de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva é uma análise química que permite detectar os diferentes elementos químicos presentes no material e em

determinadas circunstâncias permite quantificá-los. Além de detectar elementos químicos presentes em concentrações muito reduzidas.

A representatividade em termos percentuais dos elementos presentes no rejeito de vermiculita antes e após ativação ácida é ilustrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação por fluorescência de raios X (EDX) dos percentuais dos elementos presentes no rejeito antes e após ativação ácida.

Elementos	RVR (%)	RVRA (%)
Si	29,371	39,388
Fe	23,649	22,247
Ca	20,827	25,254
Mg	7,817	2,935
K	6,808	3,240
Al	5,721	2,254
Ba	1,779	-
Ti	1,353	2,832
P	0,962	0,729
Mn	0,421	0,586
Ni	0,390	-
Cr	0,362	0,227
Sr	0,308	0,308
Rb	0,086	-
S	0,073	-
Zr	0,071	-

Fonte: Autoria própria, 2022.

No rejeito antes e após ativação ácida foram identificados em maior porcentagem os elementos: silício (Si), ferro (Fe) e cálcio (Ca), característicos dos rejeitos de vermiculita. A presença de cromo (Cr) e ferro (Fe) é responsável pela coloração marrom do rejeito de vermiculita. Já o magnésio (Mg) e o potássio (K) são os cátions trocáveis (K^+ e Mg^{2+}) em posições interlamelares. Os resultados encontrados estão de acordo com os reportados na literatura por Rabello e Ribeiro (2021) quando utilizaram vermiculita na produção de uma resina de poliuretano para confeccionar tijolos ecológicos de isolamento térmico e Rojas-Ramírez et al. (2019) quando estudaram o impacto do uso de resíduo de vermiculita no estado endurecido de argamassas, ambos os trabalhos obtiveram como elementos mais abundantes o Si, Fe e Ca.

Na amostra RVRA, observa-se um decréscimo considerável na quantidade dos elementos: magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}), atribuído ao ataque ácido que resultou na lixiviação dos óxidos desses elementos, substituindo os mesmos pelo íon H_3O^+ .

4 CONCLUSÃO

O tratamento químico realizado com ácido clorídrico foi eficiente, resultando na modificação estrutural e morfológica do rejeito de vermiculita. De maneira geral, o processo de

ativação ácida levou a uma redução de 32% na sua cristalinidade e de 39% no seu tamanho do cristalito quando comparado ao rejeito sem qualquer tratamento. Além disso, ocorreu também uma redução significativa na porcentagem dos cátions trocáveis (Mg^{2+} e Al^{3+}) sendo este um indicativo do aumento do número de sítios ácidos na superfície do material, provavelmente devido a destruição parcial ou total da estrutura cristalina da vermiculita. Portanto, o material analisado apresenta potencial para ser aplicado em uma ampla variedade de campos tecnológicos emergentes, como microeletrônica, catalisadores, biomateriais, absorvedores, cerâmica, revestimentos e armazenamento de energia, sendo capaz de promover o desenvolvimento sustentável mediante a criação de produtos constituídos a partir de materiais considerados alternativos

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se à realização do ataque químico no rejeito de vermiculita com outros ácidos ou bases em outras concentrações, além de realizar novas caracterizações tais como, Análise termogravimétrica (TGA/DrTGA) e Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).

REFERÊNCIAS

ALENCAR, A. C. A. B.; COSTA, T. P. G. D.; ALVES, C. S.; LINHARES, F. M. Diagnóstico espaço-temporal das áreas impactadas pela MPL-Mineração Pedra Lavrada (Santa Luzia-PB), na extração de vermiculita. Revista brasileira de gestão ambiental e sustentabilidade, v. 2, n. 2, p. 25-36, 2015.

CHAARI, I.; MEDHIOUB, M.; JAMOUSSE, F.; HAMZAOUI, A. H. Acid-treated clay materials (Southwestern Tunisia) for removing sodium leuco-vat dye: Characterization, adsorption study and activation mechanism. Journal of Molecular Structure, v. 1223, p. 128944, 2021.

CVEJN, D.; MARTAUSOVÁ, I.; MARTAUS, A.; PŘECH, J.; VESELÝ, O.; ČEJKA, J.; MARTÍNEK, R. Vermiculites catalyze unusual benzaldehyde and dioxane reactivity. Catalysis Today, v. 366, p. 218-226, 2021.

DIAS, R. T. V.; DE ARAÚJO, S. N. R.; MEIRA, A. S.; NETO, J. P. L. Resíduo de vermiculita na resistência à compressão em argamassas de revestimento. 2018.

FRANÇA, S. C. A.; SAMPAIO, J. A.; GARRIDO, F. M. D. S.; MEDEIROS, M. E., BERTOLINO, L. C.; PÉREZ, D. V. Estudo da aplicação de resíduos de vermiculita como fertilizante alternativo de potássio.

HASHEM, F. S.; AMIN, M. S.; EL-GAMAL, S. M. A. Chemical activation of vermiculite to produce highly efficient material for Pb^{2+} and Cd^{2+} removal. Applied Clay Science, v. 115, p. 189-200, 2015.

LI, M.; ZHAO, Y.; AI, Z., BAI, H.; ZHANG, T.; SONG, S. Preparation and application of expanded and exfoliated vermiculite: A critical review. Chemical Physics, v. 550, p. 111313, 2021.

LIU, P.; YANG, F.; ZHANG, R.; ZHOU, H.; WANG, Y.; CHENG, Y. Fabrication of superhydrophobic coating on brass based on polysiloxane and expanded vermiculite via spraying method and its excellent environmental adaptability. Progress in Organic Coatings, v. 182, p. 107670, 2023.

LIU, T.; ZHANG, C.; YUAN, J.; ZHEN, Y.; LI, Y. Two-dimensional vermiculite nanosheets-modified porous membrane for non-aqueous redox flow batteries. *Journal of Power Sources*, v. 500, p. 229987, 2021.

MA, T.; SUN, H.; PENG, T.; ZHANG, Q. Transformation process from phlogopite to vermiculite under hydrothermal conditions. *Applied Clay Science*, v. 208, p. 106094, 2021.

MAITI, S.; JAIN, N.; MALIK, J. Light Weight Plasters Containing Vermiculite and FGD Gypsum Wastes for Sustainable and Energy Efficient Building Construction Material. 2022.

MAROSZ, M.; KOWALCZYK, A.; CHMIELARZ, L. Modified vermiculites as effective catalysts for dehydration of methanol and ethanol. *Catalysis Today*, v. 355, p. 466-475, 2020.

MYSORE, D.; VIRARAGHAVAN, T.; JIN, Y. C. Treatment of oily waters using vermiculite. *Water Research*, v. 39, n. 12, p. 2643-2653, 2005.

NASREEN, S.; NAFEES, M.; JAFFAR, M. M.; QURASHI, L. A.; TABRAIZ, S. Comparison and effect of Cinder supported with Manganese and Lanthanum oxide for biodiesel production. *international journal of hydrogen energy*, v. 42, n. 29, p. 18389-18396, 2017.

OLIVEIRA, J. L. F.; BATISTA, L. M.; DOS SANTOS, N. A.; ARAÚJO, A. M.; FERNANDES JR, V. J.; ARAUJO, A. S.; GONDIM, A. D. Clay-supported zinc oxide as catalyst in pyrolysis and deoxygenation of licuri (*Syagrus coronata*) oil. *Renewable Energy*, v. 168, p. 1377-1387, 2021.

ONEN, U.; ERCENK, E.; YILMAZ, S. An investigation about crystallization properties of vermiculite based machinable glass-ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, v. 276, p. 125369, 2022.

PEREIRA, A. S., SHITSUKA, D. M., PARREIRA, F. J., & SHITSUKA, R. Metodologia da pesquisa científica. 2018.

PETERSEN, R. R.; CHRISTENSEN, J. F.; JØRGENSEN, N. T.; GUSTAFSON, S., LINDBJERG, L. A.; YUE, Y. Preparation and thermal properties of commercial vermiculite bonded with potassium silicate. *Thermochimica Acta*, v. 699, p. 178926, 2021.

RABELLO, L. G.; DA CONCEIÇÃO RIBEIRO, R. CA novel vermiculite/vegetable polyurethane resin-composite for thermal insulation eco-brick production. *Composites Part B: Engineering*, v. 221, p. 109035, 2021.

REED, J. S. Principles of ceramics processing. 1996.

ROJAS-RAMÍREZ, R. A.; MACIEL, M. H.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; COELHO, A. C. V. Impacto do uso de resíduo de vermiculita no estado endurecido de argamassas (Impact of the use of vermiculite residue in the hardened properties of mortar). *Cerâmica*, v. 65, p. 107-116, 2019.

SILVA, R. M. G.; ROCHA, J. L. A.; DIAS, V. B.; COSTA, R. C. D.; SANTOS, E. D. N. Influência do enxofre elementar adicionado em um resíduo da mineração visando à liberação de nutrientes no solo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 26, p. 309-316, 2021.

STAWIŃSKI, W.; WEGRZYN, A.; MORDARSKI, G.; SKIBA, M.; FREITAS, O.; FIGUEIREDO, S. Sustainable adsorbents formed from by-product of acid activation of vermiculite and leached-vermiculite-LDH hybrids for removal of industrial dyes and metal cations. *Applied Clay Science*, v. 161, p. 6-14, 2018.

DE VARGAS BRIÃO, G.; DA SILVA, M. G.; VIEIRA, M. G. A. Expanded vermiculite as an alternative adsorbent for the dysprosium recovery. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 127, p. 228-235, 2021.

WEGRZYN, A.; STAWIŃSKI, W.; FREITAS, O.; KOMĘDERA, K.; BŁACHOWSKI, A.; JĘCZMIONEK, L.; FIGUEIREDO, S. Study of adsorptive materials obtained by wet fine milling and acid activation of vermiculite. *Applied Clay Science*, v. 155, p. 37-49, 2018.

YANG, Z.; LI, J.; LUAN, X.; SONG, S. Effects of acid leaching and organic intercalation on the thermophysical properties of paraffin/expanded vermiculite composite phase change materials. *Applied Clay Science*, v. 196, p. 105754, 2020.

YOU, H.; HOU, J.; SHEN, Y.; ZHANG, X.; CAI, J.; ZHANG, Y.; ZHANG, K. Vermiculite-derived cationic molecular-intercalated fluorescent MgAl-LDHs for assembling ultrathin solid-state light-emitting films. *Chemical Engineering Journal*, p. 144030, 2023.

XU, M.; WU, J.; WANG, J.; LIU, W.; SUN, L.; ZHOU, W.; LI, H. Covalent organic framework modified vermiculite for total Cr removal and subsequent recycling for efficient ciprofloxacin and NO photooxidation. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 652, p. 218-230, 2023.

ZHANG, P.; XIANG, M.; JIANG, W.; LIU, H.; CHEN, Y.; FANG, Y.; WANG, Y. Configuration modulation of vermiculite by exfoliation coupled Cu (II) anchoring for boosting removal of tetracycline via synergy of adsorption and photocatalysis. *Chemical Engineering Journal*, v. 473, p. 145143, 2023.