



MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE SULFATO DE ALUMÍNIO COM ESTRUTURAS EM ROSETA OBTIDO DE REJEITOS DE BAUXITA DA AMAZONIA

Gerlana Vidal¹; Bruno A. M. Figueira²; Alcy F. Ribeiro²; Gildson R. Carmo³; Fernando B. Aracati², Cleide S. T. Mescouto², Patricia T. S. da Luz⁴

¹Instituição do autor principal, Cidade, Estado, Brasil

²Universidade Federal do Pará, Ananindeua, Pará, Brasil

³Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, Pará, Brasil

⁴Instituto Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil

[e-mail do autor principal]

Palavras-Chave: Amazonia, rejeitos de bauxita, sulfato de Alumínio

Introdução

Os rejeitos provenientes das atividades de mineração constituem um importante desafio ambiental e tecnológico, devido ao grande volume gerado, à necessidade de disposição adequada e à possibilidade de liberação de elementos potencialmente móveis para o solo e os recursos hídricos.

No caso do beneficiamento de bauxita gibbsítica, esses materiais permanecem enriquecidos em constituintes minerais de interesse, especialmente aqueles associados ao alumínio e ao ferro. Dessa forma, embora sejam tradicionalmente tratados como resíduos, os rejeitos de bauxita podem ser considerados matérias-primas secundárias para a recuperação de elementos e para a produção de novos materiais, contribuindo para estratégias de valorização de resíduos e economia circular [1–3].

A lixiviação sulfúrica constitui uma alternativa hidrometalúrgica promissora para a transformação desses rejeitos, pois pode promover a dissolução de fases minerais e a formação de soluções precursoras de sulfatos metálicos. Entre os produtos possíveis, destaca-se a millosevichita, uma fase sulfatada de alumínio com participação de ferro, cuja formação apresenta interesse para a mineralogia aplicada e para a compreensão dos processos de cristalização em sistemas ricos em sulfato. A obtenção desse tipo de fase também permite relacionar a valorização de rejeitos minerais com o desenvolvimento de produtos cristalinos de identidade mineralógica e morfologia definida.

Os sulfatos de alumínio possuem ainda relevância tecnológica, ambiental e geoquímica. Industrialmente, compostos dessa classe podem ser empregados em processos de coagulação e tratamento de águas e efluentes. Em sistemas naturais e tecnogênicos, sulfatos de alumínio e ferro podem se formar em condições ácidas, nas quais a acidez, a disponibilidade de sulfato, a presença de água e a composição da solução controlam a estabilidade, a hidratação e a precipitação das fases minerais. Esses processos podem influenciar a mobilidade e a retenção de elementos metálicos, além de registrar fenômenos de intemperismo, oxidação e interação entre fluidos e materiais geológicos [5–7].

O presente trabalho teve como objetivo investigar a formação e a morfologia do sulfato de alumínio obtido a partir de rejeitos de bauxita gibbsítica da Amazônia, correlacionando as estruturas observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com a composição elementar determinada por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) e com a identificação mineralógica realizada por difração de raios X (DRX). O enfoque principal foi compreender a organização dos agregados lamelares e das estruturas semelhantes a rosetas associadas à formação da millosevichita.



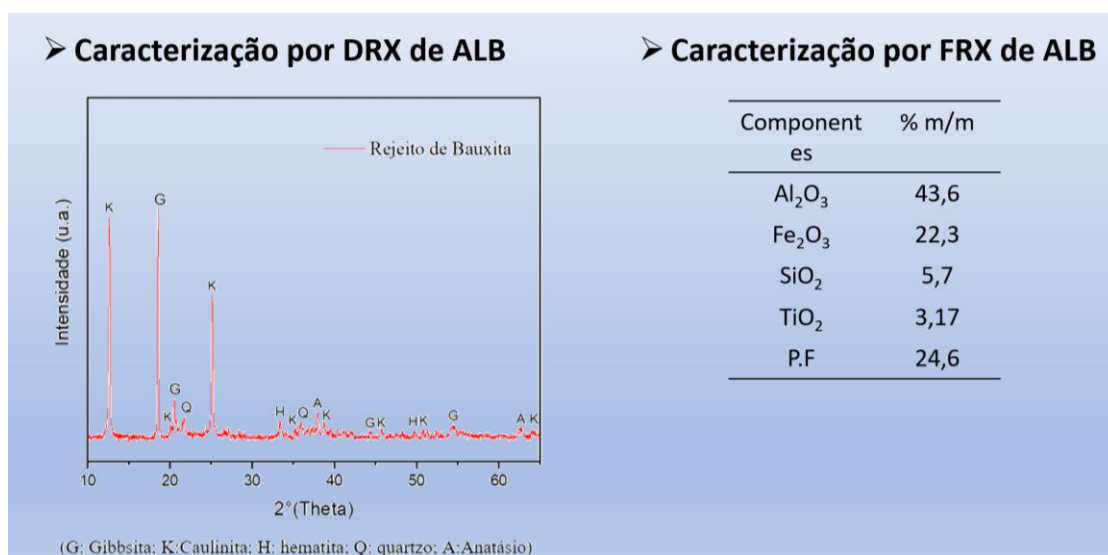
Material e Métodos

O rejeito de bauxita gibbsítica foi submetido à lixiviação com solução de H_2SO_4 em elevada temperatura por 24 h. Após a lixiviação, o liquor foi filtrado, e evaporado lentamente a 90°C por 12 h. A identificação da fase cristalina foi realizada por DRX. A morfologia foi investigada por MEV, utilizando imagens obtidas com ampliações de 4,00 kx e 5,00 kx, ambas com barra de escala de 10 μm . A composição elementar foi determinada por EDS em análise de mapa/espectro de soma. A interpretação morfológica foi realizada em conjunto com os resultados de DRX e EDS, uma vez que a forma dos cristais, isoladamente, não é suficiente para confirmar uma fase mineral.

Resultados e Discussão

A caracterização química do rejeito por FRX revelou 43,6% de Al_2O_3 , 22,3% de Fe_2O_3 , 5,7% de SiO_2 , 3,17% de TiO_2 e perda ao fogo de 24,6%. A elevada concentração de Al_2O_3 confirma o potencial do rejeito como fonte secundária de alumínio, enquanto o teor de Fe_2O_3 é relevante para a composição do sulfato formado. A análise por DRX identificou gibbsita, caulinita, hematita, quartzo e anatásio, fases que explicam a disponibilidade de Al, Fe, Si e Ti na matéria-prima (Fig. 1).

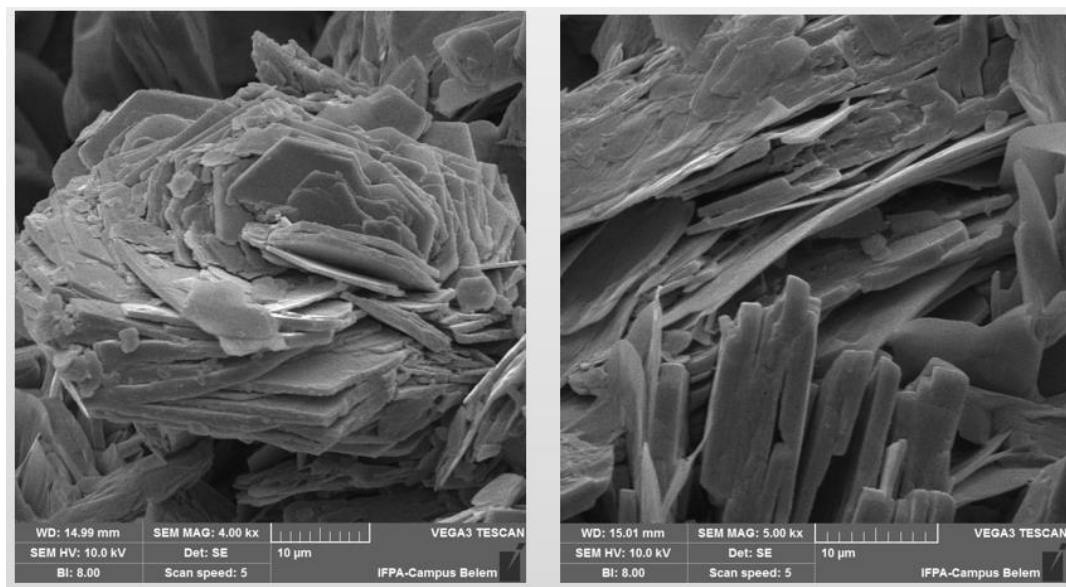
Figura 1. Caracterização química e mineralógica do rejeito de bauxita.



Após a lixiviação e a formação do produto sulfatado, as micrografias de MEV (Fig. 2) revelaram agregados cristalinos constituídos por placas e lamelas sobrepostas, com orientação preferencial e crescimento organizado em estruturas semelhantes a rosetas. Na imagem obtida a 4,00 kx, observa-se um agregado compacto formado por unidades lamelares empilhadas, enquanto a imagem a 5,00 kx evidencia placas alongadas e parcialmente interdigitadas na superfície do agregado. A presença de bordas bem definidas, superfícies tabulares e empilhamento de unidades cristalinas sugere um processo de nucleação e crescimento agregativo durante a formação do sulfato.



Figura 2. Micrografias de MEV do sulfato de alumínio: (a) 4,00 kx e (b) 5,00 kx; barras de escala de 10 μm .



A análise por EDS (Fig. 3) apresentou 58,25% de O, 24,61% de S, 8,82% de Fe e 8,32% de Al, totalizando 100%. A presença simultânea de Al, Fe, S e O é compatível com uma fase sulfatada de alumínio e ferro e reforça, em conjunto com o DRX (Fig. 4), a identificação do produto como millosevichita. O elevado teor relativo de oxigênio é coerente com a presença de grupos sulfato e de oxigênio estrutural, enquanto a ocorrência de ferro indica substituição ou associação de Fe na estrutura do sulfato.

Figura 3. Espectro de EDS e composição elementar do sulfato de alumínio.

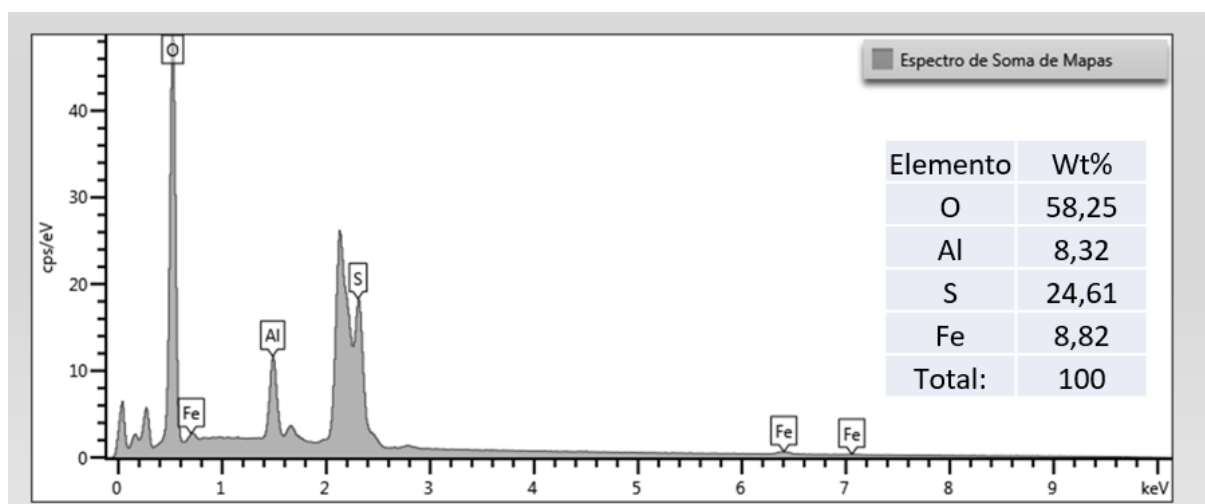
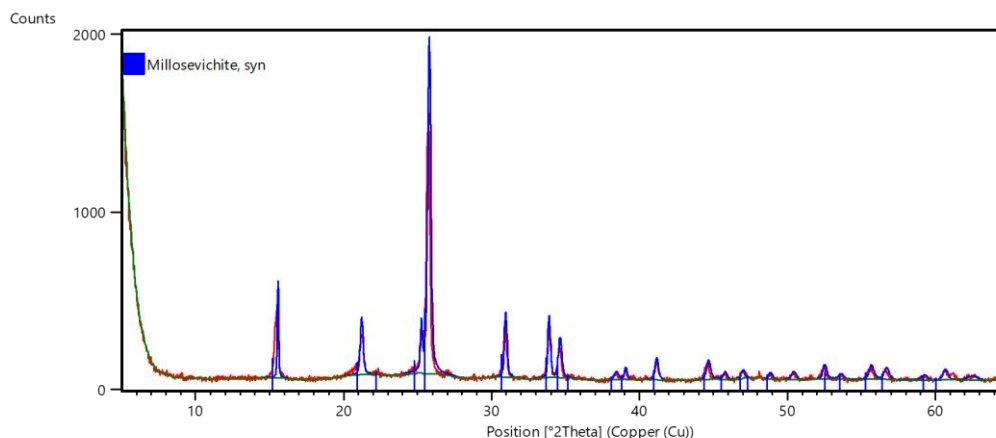




Figura 4. Difratoograma de raios X do produto, com padrão de referência indicado como Millosevichite, syn.



A associação entre a morfologia em roseta e a composição Al–Fe–S–O é o aspecto mais expressivo do material obtido. Diferentemente de uma simples precipitação amorfa, o produto apresenta organização em unidades lamelares e agregados com geometria definida, o que indica que as condições de lixiviação, concentração da solução e secagem/cristalização favoreceram o desenvolvimento de uma fase mineral estruturada. A identificação de millosevichita deve ser apresentada como resultado integrado de DRX, MEV e EDS, evitando atribuir a fase exclusivamente à aparência dos cristais. O difratograma experimental apresentou reflexões coincidentes com o padrão de referência indicado como “Millosevichite, syn”, fortalecendo a atribuição da fase cristalina ao produto sulfatado.

Conclusões

O sulfato de alumínio obtido de rejeitos de bauxita gibbsítica apresentou morfologia cristalina marcante, formada por placas e lamelas sobrepostas organizadas em agregados semelhantes a rosetas. A composição determinada por EDS com O (58,25%), S (24,61%), Fe (8,82%) e Al (8,32%), confirmou a associação elementar Al–Fe–S–O, compatível com a identificação, por DRX, da millosevichita. Os resultados demonstram que o rejeito amazônico pode ser convertido não apenas em uma fonte de alumínio, mas em um produto sulfatado com organização morfológica definida e interesse mineralógico e tecnológico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Apoio a Projetos de Pesquisa Multicampi INTEGRA-UFGA 2026 pelo apoio financeiro e institucional para a realização deste estudo.

Referências

- GAO, S.; SONG, B.; WANG, S.; VAUGHAN, J.; ZHU, Z.; PENG, H. A low-cost process for complete utilization of bauxite residue. *Journal of Environmental Management*, v. 356, 120751, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120751>
- TOLI, A.; KOTSANIS, D.; PSOMA, M.; MARINOS, D.; DAVRIS, P.; BALOMENOS, E.; PANIAS, D. The efficient use of sulfuric acid in bauxite residue leaching. *Materials Proceedings*, v. 15, n. 1, 53, 2023. <https://doi.org/10.3390/materproc2023015053>



3. SHALCHIAN, H.; NAVAKH, M. H.; BIRLOAGA, I.; BABAKHANI, A.; VEGLIÒ, F. A comparison study on the recovery of REEs from red mud by sulfation roasting–water leaching and citric acid leaching. *Minerals*, v. 14, n. 10, 1044, 2024. <https://doi.org/10.3390/min14101044>
4. WEBMINERAL. Millosevichite mineral data. Disponível em: <http://webmineral.com/data/Millosevichite.shtml>. Acesso em: 4 set. 2026.
5. TAHRAOUI, H. et al. Evaluating the effectiveness of coagulation–flocculation treatment using aluminum sulfate on a polluted surface water source: a year-long study. *Water*, v. 16, n. 3, art. 400, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16030400>
6. HAMMARSTROM, J. M.; SEAL II, R. R.; MEIER, A. L.; KORNFELD, J. M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments. *Chemical Geology*, v. 215, p. 407–431, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.053>
7. BIGHAM, J. M.; NORDSTROM, D. K. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 40, n. 1, p. 351–403, 2000. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.7>