

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DE UM REJEITO DE MANGANÊS VISANDO À RECUPERAÇÃO DE GRAFITA E MANGANÊS

MINERALOGICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF MANGANESE ORE TAILINGS FOR GRAPHITE AND MANGANESE RECOVERY

Lívian Soares Zão

Aluno de Graduação de Química Industrial, 7º período

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: início e ano de início a agosto de 2026

livianzao@eq.ufrj.br

Fernanda Barbosa da Silva

Orientadora, Química Industrial, D.Sc.

fbarbosa@cetem.gov.br

RESUMO

O reaproveitamento de rejeitos minerais tem se destacado como uma alternativa para a recuperação de recursos secundários e a redução dos impactos associados à atividade mineradora. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização tecnológica de um rejeito de minério de manganês visando avaliar o potencial de recuperação de grafita e manganês, além de propor uma rota conceitual de processamento. A amostra foi submetida à análise granulométrica e caracterizada por Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) com refinamento pelo método de Rietveld e determinação de carbono grafítico. Os resultados indicaram um teor de 24,9% de MnO na amostra cabeça, atingindo 27,6% na fração -300+212 μm . A caracterização mineralógica identificou como principais fases portadoras de manganês a espessartita, criptomelana, pirolusita e rodonita. O carbono grafítico apresentou maior concentração na fração -45+38 μm , com teor de 2,16%, indicando uma distribuição granulométrica preferencial nas frações intermediárias. Com base nos resultados, foi proposta uma rota conceitual composta por flotação e remoagem para concentração da grafita, seguida por atrição, deslamagem e flotação do manganês. O rejeito estudado apresenta potencial para recuperação de minerais de interesse econômico, contribuindo para o aproveitamento sustentável de recursos minerais e para a aplicação dos princípios da economia circular no setor mineral.

Palavras-chave: Economia circular, caracterização tecnológica, rejeito de manganês, flotação.

ABSTRACT

The reuse of mineral tailing has emerged as an alternative for the recovery of secondary resources and the reduction of impacts associated with mining activities. In this context, this study aimed to perform the technological characterization of manganese ore tailings to evaluate their potential for graphite and manganese recovery and to propose a conceptual processing route. The sample was subjected to particle size analysis and characterized by X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD) with Rietveld refinement, and graphitic carbon determination. The results indicated an MnO content of 24.9 wt.% in the head sample, reaching 27.6 wt.% in the -300+212 μm size fraction. Mineralogical characterization identified spessartine, cryptomelane, pyrolusite, and rhodonite as the main manganese-bearing phases. Graphitic carbon showed a higher concentration in the -45+38 μm size fraction, with a content of 2.16 wt.%, indicating a preferential distribution in the intermediate particle size fractions. Based on the results, a conceptual flowsheet was proposed, consisting of flotation and regrinding stages for graphite concentration, followed by attrition, desliming, and manganese flotation. The studied tailings present potential for the recovery of economically valuable minerals, contributing to the sustainable utilization of mineral resources and application of circular economy principles in the mineral sector.

Keywords: Circular economy, technological characterization, manganese tailing, flotation.

1. INTRODUÇÃO

A atividade mineradora é essencial para o fornecimento de matérias-primas destinadas a diversos setores industriais. Entretanto, o beneficiamento mineral gera grandes volumes de rejeitos que, em muitos casos, ainda contêm minerais de interesse econômico, tornando o seu reaproveitamento uma alternativa alinhada aos princípios da economia circular (ARAUJO et al., 2022). Além disso, diante da exaustão de depósitos de manganês de alto teor, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de processos capazes de viabilizar a recuperação de manganês a partir de minérios de baixo teor (SINGH et al., 2019). O manganês é uma matéria-prima estratégica para a indústria siderúrgica, sendo empregado como elemento de liga para melhorar propriedades dos aços, como resistência mecânica, dureza e tenacidade. Sua aplicação em compostos utilizados em materiais catódicos de baterias de íons de lítio ampliou sua relevância no contexto da transição energética (KERROUMI et al., 2025). A grafita também se destaca como um mineral estratégico, principalmente por ser empregado como ânodo em baterias de íons de lítio. Devido à sua hidrofobicidade natural, a grafita é normalmente concentrada por flotação, sendo a otimização desse processo determinante para maximizar sua recuperação (GHOSH, 2024). Nesse contexto, a caracterização tecnológica constitui uma etapa fundamental para o aproveitamento eficiente de rejeitos, pois fornece informações sobre a composição química e mineralógica, as associações entre minerais e o grau de liberação das fases de interesse em diferentes faixas granulométricas. Entre as principais técnicas empregadas, a Fluorescência de Raios X permite determinar a composição química e os teores dos elementos presentes, enquanto a Difração de Raios X possibilita identificar as fases minerais cristalinas da amostra (NEUMANN et al., 2010).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização tecnológica de um rejeito de minério de manganês para avaliar seu potencial de recuperação e propor uma rota de aproveitamento econômico.

3. METODOLOGIA

A amostra de rejeito de minério de manganês utilizada neste estudo, proveniente de depósitos de manganês localizados no estado do Ceará, foi submetida às etapas de secagem ao ar, homogeneização em pilha e quarteamento em lotes de 20 kg. Em seguida, um dos lotes foi novamente homogeneizado e quarteado, originando alíquotas representativas para a realização das análises de caracterização tecnológica. A amostra foi submetida à classificação granulométrica por peneiramento nas faixas de tamanho: -300+212 μm , -212+150 μm , -150+106 μm , -106+75 μm , -75+53 μm , -53+45 μm , -45+38 μm e -38 μm . As diferentes frações granulométricas e a amostra cabeça foram submetidas às análises de composição química e mineralógica por Difração de Raios X, Fluorescência de Raios X e análise de carbono grafítico. As análises de Difração de Raios X, foram realizadas em um difratômetro Bruker-AXS D8 Advance ECO, operando com radiação Cu K α (40 kV/25 mA) e geometria θ - θ do goniômetro. A quantificação mineralógica foi realizada pelo método de refinamento de Rietveld, por meio do software Bruker Diffraction Topas. Para caracterização por FRX, as amostras foram fundidas a 1.100°C com mistura de tetraborato de lítio e metaborato de lítio como fundente e iodeto de lítio como agente desmoldante, na proporção de 1:10. O procedimento foi realizado em máquina de fusão FORJ da PANalytical, modelo Axios Max. Os ensaios de perda por calcinação (PPC) foram realizados no TGA-701 da LECO a 1.000 °C. A determinação de carbono grafítico foi realizada utilizando analisador de combustão com detecção por Infravermelho (CSA05V), pertencente à empresa SGS Geosol Laboratório S.A.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise granulométrica apresentada na Figura 1 mostra que o P_{80} da amostra é de aproximadamente 200 μm , indicando que cerca de 80% do material encontra-se abaixo dessa granulometria. A composição mineralógica por refinamento de Rietveld é apresentada na Figura 2, na qual os minerais portadores de manganês identificados foram granada, criptomelana, pirolusita e rodonita. A granada (representada pela espessartita) é o mineral mais abundante da amostra, com teores elevados nas frações mais grossas e intermediárias. A criptomelana apresentou teores crescentes nas frações mais finas, atingindo concentração máxima de 11,7% na faixa $-45+38 \mu\text{m}$. A litioforita ocorre em teores de 0,5% na fração de $-45+38 \mu\text{m}$, assim como a pirolusita (0,2%), enquanto a rodonita apresenta teor de 1,4% nessa mesma faixa granulométrica. Observa-se a presença de grafita, com teores que atingem 2,3% na fração $-45+38 \mu\text{m}$, sugerindo concentração preferencial em partículas de menor granulometria. Entre os minerais de ganga, o quartzo apresenta teores mais expressivos nas frações de granulometria mais grossas ($-300+212 \mu\text{m}$), representando 20,6% da composição mineralógica. A fração $-38 \mu\text{m}$ destacou-se pelo aumento significativo em goethita (18,6%) e caulinita (27,2%).

A análise química da amostra, apresentada na Figura 3, mostra a predominância dos óxidos de manganês, silício, alumínio e ferro na composição do rejeito de manganês. O teor total de óxido de manganês na amostra cabeça é de 24,9%, atingindo seu valor máximo de 27,6% na fração de $-300+212 \mu\text{m}$. O óxido de silício constitui o principal componente químico da amostra, com teores variando entre 36,9 e 44,3%, associados à presença de quartzo e silicatos, como feldspatos e granada, sendo mais expressivos na faixa granulométrica $-300+212 \mu\text{m}$ (44,3%). Os teores de óxido de ferro concentram-se nas frações mais finas ($-38 \mu\text{m}$), atingindo 9,2%.

A Tabela 1 mostra os teores de carbono grafítico para as diferentes faixas granulométricas. As frações granulométricas mais grossas apresentam menores teores de carbono grafítico, como observado na faixa $-300+212 \mu\text{m}$, que apresentou teor de 0,81%. A fração de $-45+38 \mu\text{m}$ apresentou o maior teor de carbono grafítico (2,16%), enquanto na fração de $-38 \mu\text{m}$ nota-se uma redução para 1,25%. Importante ressaltar que as análises de DRX, utilizando o método de refinamento de Rietveld, e de carbono grafítico apresentaram tendências convergentes, pois os resultados obtidos em ambas mostraram maior concentração de grafita na fração $-45+38 \mu\text{m}$.

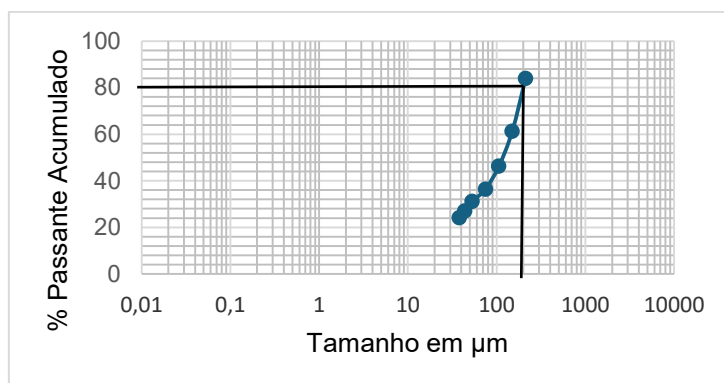


Figura 1: Distribuição granulométrica da amostra de rejeito de manganês, $P_{80} = 200 \mu\text{m}$.

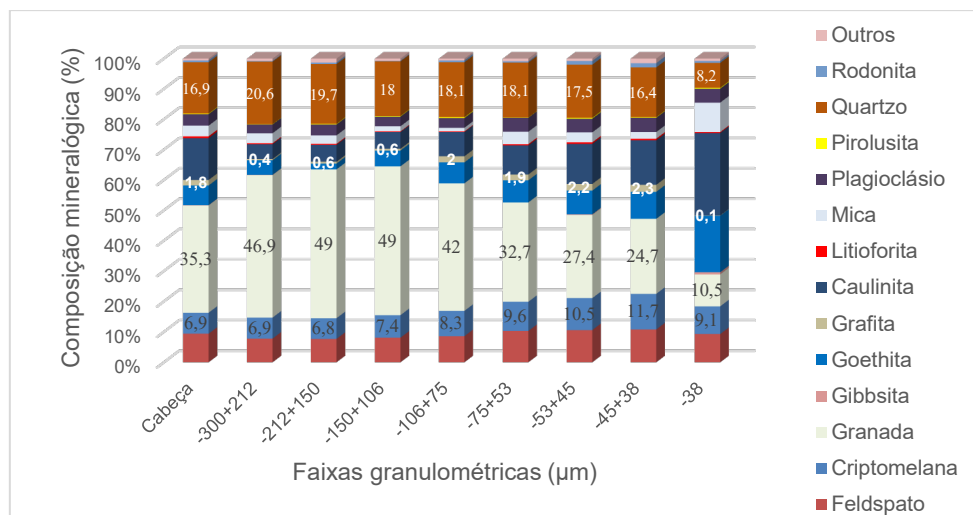


Figura 2: Composição mineralógica do rejeito de manganês determinada por difração de raios X com refinamento pelo método de Rietveld.

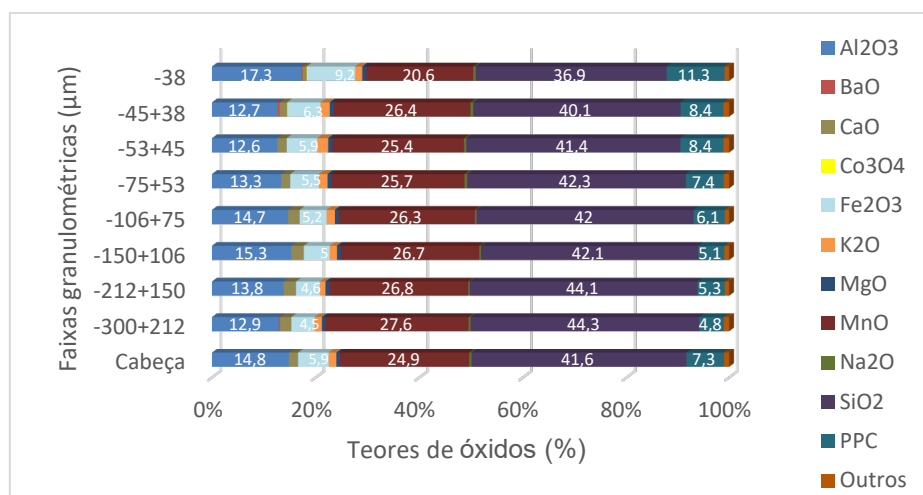


Figura 3: Análise química por Fluorescência de Raio X.

Tabela 1: Determinação de carbono grafítico.

Faixas granulométricas (µm)	Carbono grafítico (%)
Cabeça	1,46
-300+212	0,81
-212+150	1,14
-150+106	1,37
-106+75	2,07
-75+53	2,00
-53+45	1,90
-45+38	2,16
-38	1,25

A partir das análises de caracterização tecnológica da amostra, foi possível identificar que o material é composto por uma matriz mineralógica complexa, contendo como fases de interesse a grafita, óxidos de manganês e silicatados. A Figura 4 apresenta o Fluxograma proposto para o processamento da amostra de rejeito de minério de manganês.

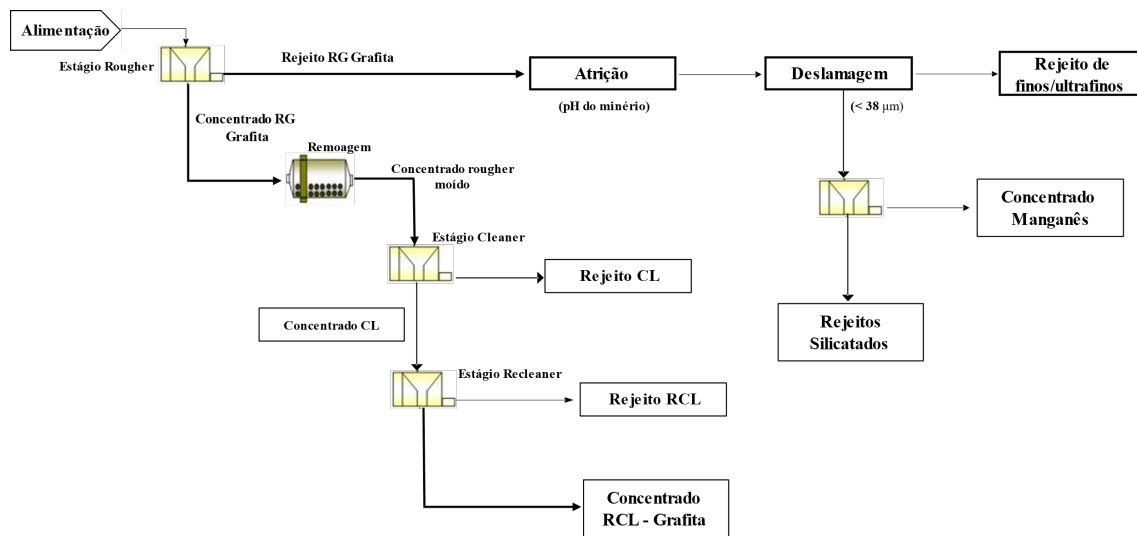


Figura 4: Fluxograma conceitual do processamento do rejeito de manganês.

Os estudos de concentração da grafita preveem ensaios de flotação com amostras alimentadas a uma granulometria em torno de 200 µm, visando avaliar os seguintes parâmetros: o valor do pH da polpa e as concentrações do sistema de reagentes de flotação. Diferentes tipos de coletores e espumantes serão avaliados nesta etapa. A primeira bateria de ensaios de flotação abrangerá os estágios, *rougher* (RG) e *cleaner* (CL), no qual o concentrado obtido na etapa rougher será a alimentação da etapa cleaner. O concentrado RG da grafita obtido será encaminhado a uma etapa de remoagem, com a finalidade de se atingir a liberação do mineral e para desagregar as partículas mistas de grafita e ganga. O concentrado moído alimentará o estágio *cleaner*, obtendo-se o concentrado CL e o rejeito CL, que poderá ser destinado à estudos complementares. Em seguida, o concentrado CL passará pela etapa *recleaner* para purificação final, produzindo o concentrado RCL da Grafita. Devido a grandes frações de ultrafinos que podem interferir na eficiência de flotação, o circuito passará por um pré-tratamento de atrição e deslamagem da amostra do rejeito RG. O material será submetido à atrição mecânica intensa, em pH natural, para promover a limpeza da superfície das partículas, seguido de deslamagem por decantação controlada, com corte granulométrico <38 µm, para remoção das partículas finas que formam lamas e podem prejudicar a etapa de flotação do manganês. A fração deslamada alimentará a flotação reversa do manganês, visando à obtenção dos concentrados de manganês e um rejeito contendo os minerais silicatados.

5. CONCLUSÕES

A caracterização tecnológica mostrou que o rejeito de minério de manganês apresenta teor de 24,9% de MnO na amostra cabeça, atingindo 27,6% na fração granulométrica de -300+212 µm, e concentrações mais elevadas de carbono grafítico na fração -45+38 µm (2,16%), indicando potencial para a recuperação de ambos os minerais. As análises químicas e mineralógicas permitiram identificar as principais fases portadoras de manganês e sua distribuição granulométrica, possibilitando a proposição de uma rota conceitual de beneficiamento baseada na flotação da grafita, seguida por etapas de atrição, deslamagem e flotação do manganês. Os resultados demonstram que o rejeito estudado apresenta características favoráveis à recuperação de grafita e minerais portadores de manganês, indicando possibilidade de transformação de um passivo mineral em fonte secundária de recursos.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Fernanda Barbosa da Silva pelos ensinamentos e pelas contribuições para a realização deste estudo, à pesquisadora Marisa Bezerra de Mello Monte assim como ao pesquisador Felipe Emerson por todo apoio na caracterização tecnológica da amostra. Agradeço ao CNPq, pelo apoio financeiro e estendo meus agradecimentos à equipe do CETEM pelo suporte técnico, pela colaboração e pela infraestrutura disponibilizada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, F.S.M.; TABORDA-LLANO, I.; NUNES, E.B.; SANTOS, R.M. Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications. **Geosciences**, 12, 319, 2022.

GHOSH, A.K. Literature quest and survey on graphite beneficiation through flotation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.189, 113980, 2024.

KERROUMI, M; KARBAK, M; AFARYATE, H; EL-BCHIRI, A; AQIL, M; MANOUN, B; TAMRAOUI, Y; GIRAULT, H; GHAMOUISS, F. Unveiling electrochemical insights of lithium manganese oxide cathodes from manganese ore for enhanced lithium-ion battery performance. **Electrochimica Acta**; volume 509(33):145286, 2025.

SINGH, V.; CHAKRABORTY, T.; TRIPATHY, S. K. A Review of Low Grade Manganese Ore Upgradation Processes. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 41, n. 6, p. 417-438, 2019.