

Desempenho Mecânico de Rejeito de Manganês para Aplicações Geotécnicas

Paulo Victor Santos Freire

Mestrando, UnB, Brasília, Brasil, eng.paulofeire15@gmail.com

Roberto Aguiar dos Santos Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, santosr@ufv.br

Átila Geraldo Rochido dos Santos Engenheiro Civil Geotécnico Master, Vale, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil, atilarochido@gmail.com

Matheus Navarra Satuf muniz Engenheiro geotécnico senior, Vale, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, matheus.navarra@vale.com

Michéle Dal Toé Casagrande

Professora Titular, UnB, Brasília, Brasil, mdtcasagrande@unb.br

RESUMO: Os rejeitos de mineração tem sido amplamente estudados na engenharia geotécnica, com a finalidade de entender o seu comportamento global, especialmente após os desastres ocorridos em 2015 e em 2019, que geraram mudanças na gestão de barragens de rejeitos no Brasil. No entanto, o rejeito de manganês, alvo deste estudo, ainda é pouco explorado na literatura nacional e internacional, sob a perspectiva geotécnica. Esta pesquisa apresenta uma investigação do comportamento físico, químico, hidráulico, e mecânico de rejeito de manganês. Para a avaliação do comportamento mecânico foram executados ensaios triaxiais sob diferentes condições de compactação e índice de vazios. Os resultados foram satisfatórios e contribuem para uma melhor compreensão do comportamento geotécnico específico do rejeito de manganês, auxiliando na gestão mais segura e sustentável das barragens e pilhas compactadas com este material.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito, Manganês, comportamento mecânico e diferentes índices de vazios

ABSTRACT: Mining tailings have been extensively studied in geotechnical engineering in order to understand their overall behavior, especially after the dam failures that occurred in 2015 and 2019, which led to significant changes in tailings dam management practices in Brazil. However, manganese tailings, the focus of this study, remain underexplored in both national and international literature from a geotechnical perspective. This research presents an investigation into the physical, chemical, hydraulic and mechanical behavior of manganese tailings. To evaluate the mechanical behavior, triaxial compression tests were performed under different compaction conditions and void ratios. The results were satisfactory and contribute to a better understanding of the specific geotechnical behavior of manganese tailings, supporting safer and more sustainable management of dams and compacted waste piles containing this material

KEYWORDS: Tailings, Manganese, Mechanical behavior, Different void ratios

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade econômica que, no ano de 2023, gerou um faturamento de 248,2 bilhões de reais, conforme o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2025). Com um volume de material mineral beneficiado que superou 985 milhões de toneladas, conforme expresso na base de dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2024), percebe-se a dimensão do volume de rejeitos oriundos dessa atividade, que deverão ser destinados de forma segura, visto que o material beneficiado é apenas uma fração do que foi lavrado.



Logo, é necessária a destinação responsável desse material e sua disposição em locais que busquem conter esse material em estruturas resistentes e estanques, bem como o uso de novas tecnologias a favor do desenvolvimento de práticas otimizadas dentro da engenharia (IBRAM, 2021; COUTINHO, 2018).

Os rejeitos de mineração são materiais artificiais que variam sua granulometria em função dos processos a que foram submetidos até sua segregação e da rocha-mãe que lhes deu origem. Os rejeitos apresentam comportamentos distintos quando submetidos a baixas tensões e a tensões mais elevadas. Conforme o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM, 2010) ressaltam, quando esses materiais estão a baixas tensões, apresentam, em média, ângulos de atrito entre 35° e 40°; já a médias e altas tensões, apresentam uma faixa de 28° a 33°.

Para a caracterização mecânica do rejeito de manganês deste estudo, foram aplicadas tensões efetivas de 200, 400 e 800 kPa em ensaios consolidados drenados (CD). Os índices de vazios ensaiados nesta pesquisa foram, aproximadamente, 1,0 e 1,5. Os ângulos de atrito encontrados foram de 27,0° e 27,7°, e a permeabilidade obtida para esse material foi de $1,3 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ e $1,8 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$.

2 METODOLOGIA

O programa experimental foi realizado com rejeito de manganês de uma mina da região norte do país. Os ensaios foram realizados seguindo a metodologia descrita em literatura para solos, visto que não há norma exclusiva para rejeitos. Além disso, o modelo do comportamento de resistência para esse material foi o de *Mohr-Coulomb* para obter os parâmetros de resistência do material.

Em um outro momento, será necessário um teste em *in-situ* com aterros experimentais instrumentados, para simular o comportamento em uma escala maior onde questões operacionais como: a correção de umidade do rejeito em campo para a umidade ótima, compactação com maquinários, trabalhabilidade do material e uma retroanálise de amostras indeformadas poderá trazer um entendimento muito mais assertivo do comportamento do material nas barragens de rejeito compactado.

2.1 Caracterização Química

A caracterização química foi realizada através do ensaio de difração de raio-x (DRX) realizado em parceria com o Instituto de Geociência da Universidade de Brasília (IG-UnB) com o intuito de identificar quais são as estruturas minerais presentes após o beneficiamento.

2.2 Caracterização Física

2.2.1 Limites de Atterberg

Os de Limites de Liquidez (LL) e Limites de Plasticidade (IP), foi usado a metodologia desenvolvida para solos nos rejeitos. O método do ensaio seguido nesta pesquisa foi o descrito pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6459:2017 e NBR 7180:2016 para os ensaios de LL e LP, respectivamente.

2.2.2 Massa específica:

A determinação de densidade real dos grãos foi obtida usando picnômetros convencionais de vidro seguindo a metodologia proposta na NBR 6458:2021 da ABNT

2.2.3 Granulometria

O ensaio de compactação foi realizado pelo laboratório da Vale seguindo a metodologia proposta pela norma ABNT NBR 7182:2016. Foi usada energia normal e não houve reuso de material.

2.2.4 Ensaio de Compactação:

A preparação dos corpos de prova para os ensaios triaxiais CD foram moldados tendo como base a umidade ótima da curva normal em cilindros do mini-MCV com corpos de prova 100 mm x 50 mm. Os índices de vazios ensaiados foram por volta de 1,0 e 1,5.

Os ensaios de permeabilidade foram executados após a amostra atingir o parâmetro B de *skempton* maior que 0,94, nessas condições foi adotado que a amostra estava saturada. Na etapa seguinte, houve a consolidação das amostras em tensões confinantes de 200, 400 e 800 kPa, o tempo médio para o término, por volta, de 40 minutos para as amostras mais densas e 20 minutos para as amostras mais fofas. Por fim, as amostras foram postas para cisalhar, deformação máxima adotada foi de 20%.

2.3 Caracterização Hidráulica e Mecânica

A preparação dos corpos de prova para os ensaios triaxiais CD foram moldados tendo como base a umidade ótima da curva normal em cilindros do mini-MCV com corpos de prova 100 mm x 50 mm. Os índices de vazios ensaiados foram por volta de 1,0 e 1,5.

Os ensaios de permeabilidade foram executados após a amostra atingir o parâmetro B de *skempton* maior que 0,94, nessas condições foi adotado que a amostra estava saturada. Na etapa seguinte, houve a consolidação das amostras em tensões confinantes de 200, 400 e 800 kPa, o tempo médio para o término, por volta, de 40 minutos para as amostras mais densas e 20 minutos para as amostras mais fofas. Por fim, as amostras foram postas para cisalhar, deformação máxima adotada foi de 20%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As formações cristalinas que havia nessa região que continham manganês, segundo o Departamento Nacional de Petróleo (DNPM, 2005), criptomelana, hollandita, litoiforita, nsutita, todorokita e pirolusita. Tendo como base a Figura 1, que contém o resultado do DRX desta pesquisa, é possível observar que, salvo a todorokita, nenhuma outra formação cristalina contendo manganês foi encontrada. Os outros minerais encontrados no ensaio foram caulinita, quartzo, ilita, todorokita, gibbsita, hematita, magnetita e apofonita.

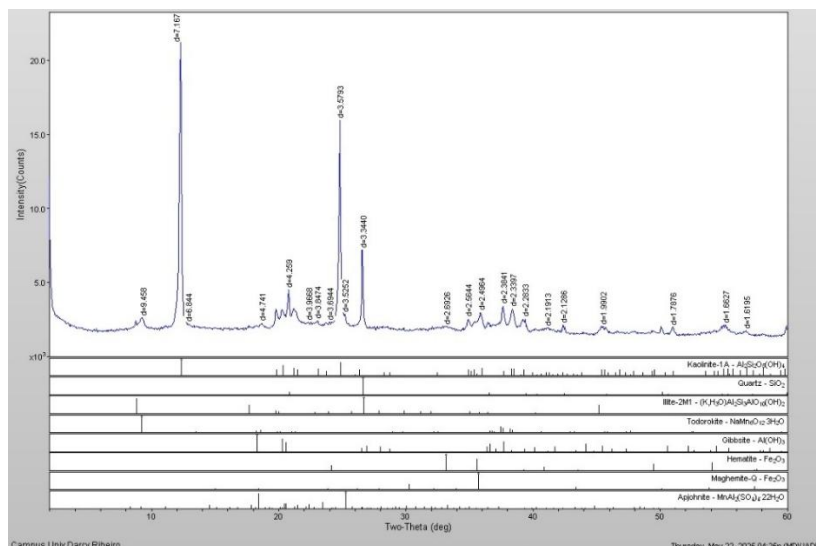
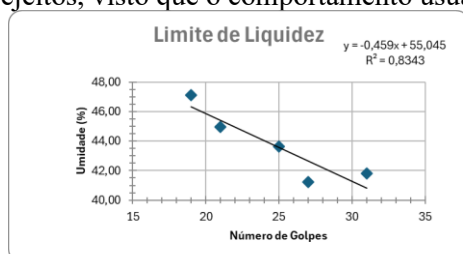
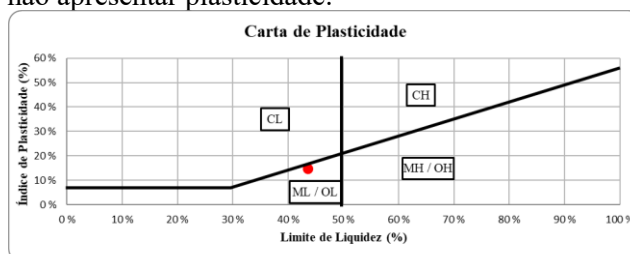


Figura 1. Resultado da mineralogia do rejeito pela DRX.

Por sua vez, a Figura 2-A, ilustra o resultado do ensaio do LL onde é possível observar o valor de 43,6%, já a Figura 2-B a classificação. O material demonstrou um LP de 28,8%, valor esse que não é comum para rejeitos, visto que o comportamento usual é não apresentar plasticidade.



A



B

Figura 2-A. Regressão Linear para obter o LL; Figura 2-B. Classificação do Rejeito na Carta de Plasticidade

O rejeito de manganês estudado neste trabalho foi beneficiado com processos de britagem, moagem, peneiramento e centrifugação. Dessa forma, ele foi submetido por processos físicos e por ter havido a etapa de moagem desse material é esperado que a dimensão dos grãos seja mais fina do que rejeitos que foram apenas britados.

Logo, a distribuição granulométrica desse material possui dimensões correspondente a areias, siltes e argila, como está exposto na Tabela 01, bem como está ilustrado a densidade real dos grãos (ρ_s).

Tabela 1. Características Físicas do Rejeito

Pedregulho (%)	0
Areia (%)	25
Silte (%)	54
Argila (%)	21
ρ_s (g.cm ⁻³)	3,07
LL (%)	43,6
LP (%)	28,8

A compactação do rejeito foi realizada na energia normal em um cilindro de 1000 cm³, foi adotado o reuso do material devido a sua disponibilidade, indo do ramo seco até atingir o ramo úmido. A densidade ótima ($\rho_{d.máx}$) encontrada foi de 1,535 g.cm⁻³ com uma umidade ótima (w_{ot}) de 30,75%. Os pontos obtidos para a curva de compactação estão ilustrados na Figura 3.

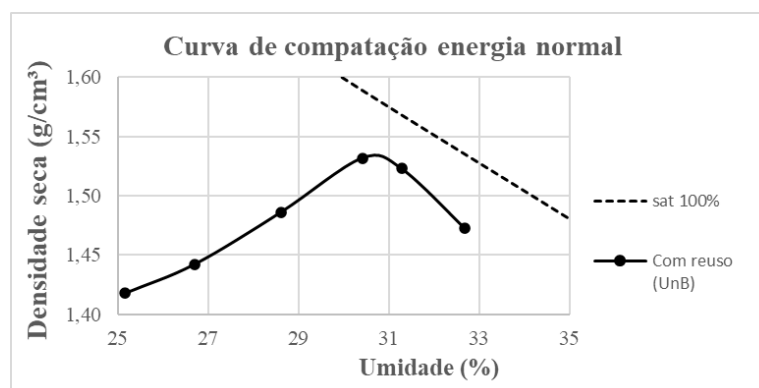


Figura 3. Curva de Compactação na Energia Normal.

Tendo como base o ρ_s de 3,07 e o $\rho_{d.máx}$ de 1,535 o índice de vazios das amostras moldadas na energia normal foi de 1 (e_1). Para o índice de vazios menos denso (e_2), foi moldado na mesma w_{ot} de modo a atingir um valor de 1,5.

3.1 Análise do Comportamento Hidráulico

O ensaio de permeabilidade foi executado durante o ensaio triaxial, antes da fase de consolidação. Onde foi possível observar influência do índice de vazios com diferença de uma ordem de grandeza, em média, entre as duas estruturas.

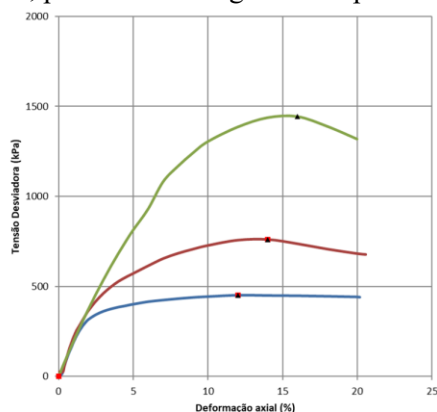
Tabela 2: Permeabilidade do rejeito em função do índice de vazios.

	k_1 (cm.s ⁻¹)	k_2 (cm.s ⁻¹)	k_3 (cm.s ⁻¹)	$k_{méd}$ (cm.s ⁻¹)
e_1	$9,7 \cdot 10^{-06}$	$1,2 \cdot 10^{-05}$	$1,8 \cdot 10^{-05}$	$1,3 \cdot 10^{-05}$
e_2	$1,7 \cdot 10^{-04}$	$1,5 \cdot 10^{-04}$	$2,2 \cdot 10^{-04}$	$1,8 \cdot 10^{-04}$

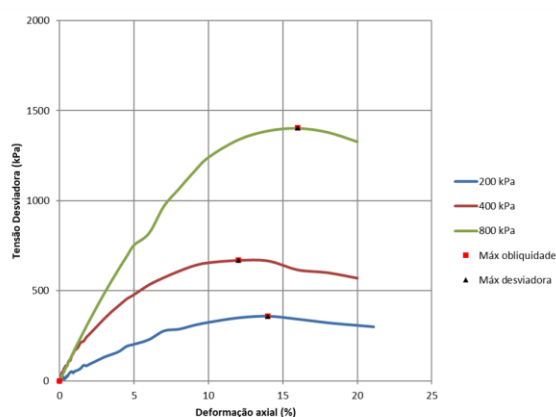
O índice de vazios compactado na energia normal apresentou permeabilidade média ($k_{méd}$) de $1,3 \cdot 10^{-05} \text{ cm.s}^{-1}$ já o menos denso foi de, que ambos correspondem a permeabilidade encontrada em siltes.

3.2 Análise do Comportamento Mecânico

Os ensaios de resistência do rejeito em estudo foram realizados em um equipamento triaxial com condições CD com tensões confinantes de 200, 400 e 800 kPa. O comportamento tensão-deformação está ilustrado da Figura 04, onde a Figura 4-A está exposto os resultados dos corpos de prova (CP) do índice de vazios e_1 , por sua vez a Figura 4-B apresenta os resultados ensaiados dos CP's com índice de vazios e_2 .



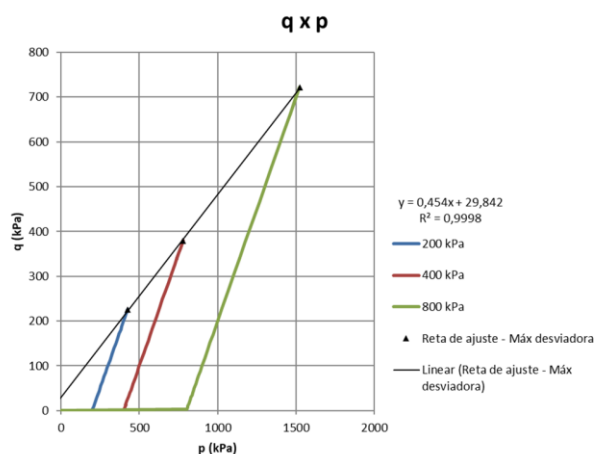
A



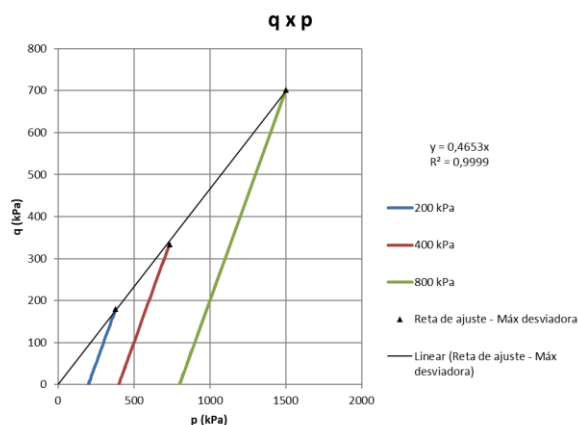
B

Figura 4-A. Comportamento Tensão Deformação do e_1 ; Figura 4-B. Comportamento Tensão Deformação do e_2 .

Com base nos 6 ensaios realizados foram traçadas as envoltórias de ruptura para ambos os índices de vazios, ilustrado na Figura 5.



A



B

Legenda Figura 5. Envoltória de Ruptura Ambos Índices de Vazios; Figura 5-A. Envoltória de Ruptura A Para CP Moldado na Energia Normal; Figura 5-B- Envoltória de Ruptura B Para CP Moldado na Condição Menos Densa;

Onde,

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (1)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (2)$$

que possui um equacionamento para a envoltória de ruptura dado por

$$q = \operatorname{sen} \alpha \cdot p' + a \quad (3)$$

Onde há uma relação trigonométrica entre o ângulo de atrito (φ) com a equação (3) dada por

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{sen} \alpha \quad (4)$$

$$c = a / \cos \varphi \quad (5)$$

Sendo “c” é o intercepto coesivo do material. Desta forma, foi possível encontrar os parâmetros de resistência do material nas duas condições, que está exposto da Tabela 03.

Tabela 3: Parâmetros de resistência para ambos os índices de vazios ensaiados.

	φ	Coesão kPa
e1*	27,0	33,5
e2**	27,7	0
*	índice de vazios igual a 1	
**	índice de vazios igual a 1,5	

4 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível identificar que o rejeito de manganês, objeto do estudo, é um material que possui a maior parte de suas partículas com dimensões correspondentes a silte e argila. Além disso, foi obtido uma umidade ótima na energia normal de 30,75% e para uma futura aplicação deste estudo será necessária uma investigação da umidade ao final do processo de filtragem do rejeito, visto que a umidade de rejeitos após esse processo possui uma variabilidade de 15-25%, como mencionado por Guimarães (2011).

Segundo Balbino (2022), dos rejeitos estudados pelo pesquisador, que possuíam uma quantidade maior de finos apresentaram ângulo de atrito próximos a 27°. Um comportamento semelhante a esse foi encontrado no rejeito de manganês estudado, que por meio dos resultados dos ensaios triaxiais CD estimou-se ângulo de atrito de 27,0° e 27,7°.

Outro ponto importante é que a variação de índices de vazios não apresentou uma diferença significativa, com uma variação menor que 1° no ângulo de atrito. Por sua vez, o comportamento hidráulico demonstrou uma mudança significativa variando de $1,3 \times 10^{-5} \text{ cm.s}^{-1}$ para $1,8 \times 10^{-4} \text{ cm.s}^{-1}$ entre as duas densidades ensaiados.

Embora o objetivo deste trabalho não tenha sido investigar a viabilidade de reprocessamento do rejeito, foi realizado um comparativo entre o DRX do material estudado e o DRX do minério bruto. Observou-se que a maior parte das formações cristalinas de manganês não estavam mais presentes após o beneficiamento.

Por fim, como já exposto no tópico 2 deste trabalho, é necessário a continuidade deste estudo em uma escala maior do que a laboratorial para aperfeiçoar o entendimento mecânico e aplicação futuro em barragens de rejeito compactado. A fim de construir estruturas onde se conhece o material, de modo a contribuir com a segurança da estrutura, tanto para a empresa que opera o construto quanto para a sociedade circunvizinha, que muitas vezes é afetada direta ou indiretamente a quaisquer avarias na estrutura.

Esses resultados contribuem para o entendimento geotécnico do rejeito de manganês e indicam a necessidade de estudos adicionais quanto ao potencial de reaproveitamento mineral e aplicação de técnicas de rejeitos compactados para a destinação dos rejeitos da mineração de manganês da mina de origem.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio neste artigo, ao Laboratório de Novos Materiais Geotécnicos da UnB, aos colegas de laboratório, diretamente ou indiretamente, para o bom andamento dos ensaios. Além disso, agradecemos aos órgãos de fomento a pesquisa, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)



e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) por terem apoiado esta pesquisa por meio de Bolsas de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508: Grãos de solo – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BALBINO, Jonathas de Brito. Caracterização geotécnica de um rejeito clay-like do Quadrilátero Ferífero. 2022. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Coordenação: Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio, Silvia Cristina Alves França.
- DNPM. O depósito de manganês do Azul, Carajás. In: COSTA, Marcondes Lima da; ANGEIRAS, Agenor G. (Orgs.). Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia. Belém: ADIMB, 2005. p. 228-331.
- GUIMARÃES, Nilton Caixeta. *Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). Setor mineral: valores de produção, de exportações e de tributos quase dobram no 1º semestre de 2021. 2021. Disponível em: Acesso em: julho. 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Setor Mineral; Organizador: Instituto Brasileiro de Mineração. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2025. 28 p.