
Characterization of polymetallic ore of zinc, copper and lead

Caracterização de minério polimetálico de zinco, cobre e chumbo

Received: 05-03-2024 | Accepted: 08-04-2024 | Published: 12-04-2024

Thiago Ferreira Goes

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3904-5560>

Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil

E-mail: thiagofgoes6@gmail.com

Kelly Cristina Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1803-3199>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: kelly.ferreira@ifsudestemg.edu.br

Raulim de Oliveira Galvão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5058-4743>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: engraulim@gmail.com

Stephânia da Consolação Silva Nogueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5801-8241>

Universidade Federal de Ouro Preto

E-mail: stephania.nogueira@aluno.ufop.edu.br

Carlos Alberto Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0510-0257>

Universidade Federal de Ouro Preto

E-mail: carlos.ii@ufop.edu.br

ABSTRACT

The study aimed to characterize a sample of approximately 150 kg of polymetallic zinc, copper and lead ore from the Aripuanã region, Mato Grosso. Due to the strategic importance of these minerals in the Brazilian economy and the complexity of processing. To achieve the objective, techniques such as scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive X-ray analysis (EDS), X-ray diffraction (XRD) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP) were used to identify the minerals and determine its chemical composition. Furthermore, the Bond Work Index (WI) test was performed to evaluate resistance to fragmentation, and helium gas pycnometry was used to analyze the specific mass. The results showed a specific mass of 2.89 g/cm³, a WI of 9.22 kWh/st and contents of 5.15% zinc, 0.15% copper and 1.30% lead. The presence of minerals carrying the study elements, such as galena, sphalerite and chalcopryrite, highlights the relevance of these findings for the mining and metallurgy industry, boosting sustainable development and consolidating Brazil's position as a producer of valuable mineral resources.

Keywords: Polymetallic; Zinc; Processing; Mining.

RESUMO

O estudo teve como objetivo caracterizar uma amostra de aproximadamente 150 kg de minério polimetálico de zinco, cobre e chumbo da região de Aripuanã, Mato Grosso. Devido à importância estratégica desses minerais na economia brasileira e à complexidade do beneficiamento. Para alcançar o objetivo, foram utilizadas técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análise por energia dispersiva de raios X (EDS), difração de raios X (DRX) e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP) para identificar os minerais e determinar sua composição química. Além disso, o ensaio de *Work Index* (WI) de Bond foi realizado para avaliar a resistência à fragmentação, e a picnometria a gás hélio foi utilizada para análise da massa específica. Os resultados mostraram uma massa específica de 2,89 g/cm³, um WI de 9,22 kWh/st e teores de 5,15% de zinco, 0,15% de cobre e 1,30% de chumbo. A presença de minerais portadores dos elementos do estudo, como galena, esfalerita e calcopirita, destaca a relevância desses achados para a indústria de mineração e metalurgia, impulsionando o desenvolvimento sustentável e consolidando a posição do Brasil como produtor de recursos minerais valiosos.

Palavras-chave: Polimetálico; Zinco; Beneficiamento; Mineração.

INTRODUÇÃO

O Brasil tem se destacado globalmente na indústria da mineração, tanto em termos de produção quanto de reservas, conforme apontado pelos dados do IBRAM provenientes do estudo realizado pela EY Building a Better Working World em abril de 2021. Esse destaque é impulsionado pelo potencial e pela diversidade geológica do país, além dos significativos investimentos em infraestrutura, talentos e tecnologia. Em 2019, a produção mineral brasileira representou 16,8% do PIB Industrial.

A região noroeste de Minas Gerais abriga o grupo Vazante, reconhecido pelas suas principais reservas de zinco e chumbo no Brasil, conforme indicado por Neves (2011) e Cunha et al., (2007). Este grupo mineral, estendendo-se por aproximadamente 250 km, é considerado o maior da América do Sul em termos de depósitos de zinco e chumbo. A jazida homônima, parte integrante do grupo Vazante, destaca-se como a principal fonte desses minerais no país, sendo considerada a maior jazida de minério willemítico do mundo, conforme destacado por Oliveira (2013). Atualmente, esta jazida é explorada em duas minas, Vazante e Extremo Norte, e é notável por sua rica variedade mineralógica em comparação com os depósitos da região do Extremo Norte.

Os preços do zinco e do cobre devem se manter fortes até o terceiro trimestre, segundo o presidente da Nexa, Tito Martins, impulsionados pela demanda e pelos incentivos governamentais durante a pandemia. A receita líquida da Nexa no primeiro trimestre de 2021 aumentou para 603 milhões de dólares, representando um crescimento

de 36% em relação ao ano anterior, devido aos melhores preços internacionais dos metais e ao aumento das vendas. A produção de zinco foi ligeiramente superior a 77 mil toneladas, com um aumento de 13% na produção de cobre, totalizando 8 mil toneladas, e um crescimento de 10% na produção de chumbo, alcançando 10 mil toneladas, conforme publicado pela Reuters (2021).

A caracterização mineralógica do minério de zinco é crucial para otimizar os processos de extração e beneficiamento. Conforme destacado por Porphírio et al., (2010), essa caracterização, realizada por métodos convencionais, fornece dados essenciais para o desenvolvimento eficiente de processos de beneficiamento. Além da identificação dos minerais valiosos e da ganga, é fundamental quantificar com precisão seus constituintes. Também é necessário determinar os teores de metais nocivos à saúde humana presentes na amostra, conforme as normas ambientais.

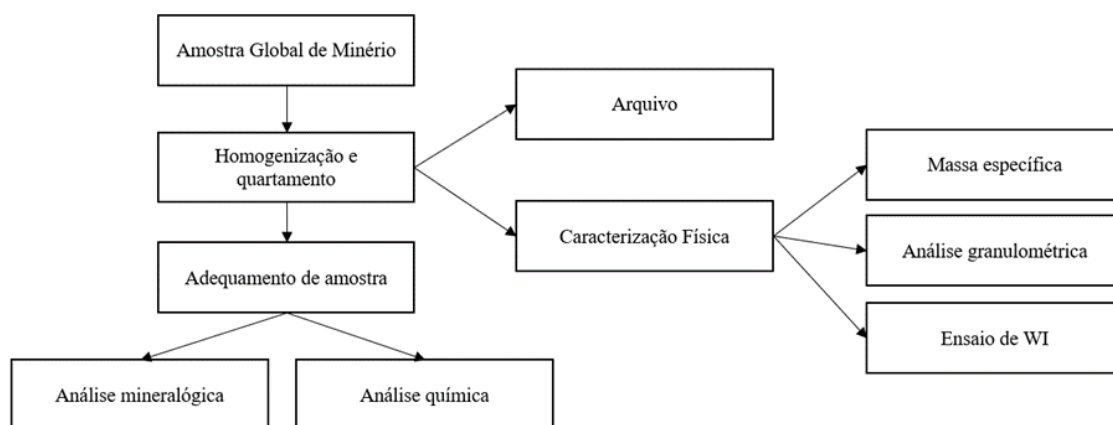
O objetivo central deste estudo consiste na caracterização de uma amostra de minério oriunda das reservas de zinco na região de Aripuanã, em Mato Grosso. Foram realizadas avaliações dos minerais presentes no minério, bem como a determinação do *Work Index* (WI) de Bond, conforme estipulado pela norma ABNT - NBR 11376 (1990). Além disso, foram conduzidas análises mineralógicas utilizando técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada com (EDS), Difração de Raios X (DRX) e análise química por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP), com o intuito de identificar a composição química do minério e avaliar o grau de liberação dos minerais de acordo com a granulometria.

Ao final deste estudo, foram alcançados resultados relevantes que contribuem não apenas para a indústria de mineração e metalurgia, mas também para o setor agrícola e para a economia como um todo. A otimização dos processos de extração, beneficiamento e transformação do zinco não só promoverá o desenvolvimento sustentável dessas atividades, mas também reforçará a posição do Brasil como um importante produtor e fornecedor desse recurso valioso.

METODOLOGIA

O mapeamento deste trabalho foi baseado em um estudo anterior de caracterização do minério de zinco realizado por (FIGUEIREDO *et al.*, 2022) Figura 1. O objetivo do presente trabalho foi caracterizar uma amostra de aproximadamente 150 kg desse minério.

Figura 1 – Metodologia para caracterização do minério



Fonte: Figueiredo *et al.*, (2022)

Inicialmente, a amostra foi submetida à homogeneização para garantir sua representatividade. Em seguida, procedeu-se ao quartamento, dividindo-a em duas partes iguais. Um dos fragmentos foi destinado ao arquivo e preservação para referências futuras e estudos complementares.

O outro fragmento da amostra foi usado para realizar testes físicos, mineralógicos e químicos. As análises físicas permitiram a determinação das propriedades mecânicas e granulométricas do minério. Os testes mineralógicos identificaram as diferentes fases minerais presentes, fornecendo informações sobre sua composição mineral.

ANÁLISE FÍSICA

A caracterização física do minério foi uma etapa crucial neste estudo, com foco na obtenção das propriedades mecânicas do material. Após conduzir o teste para determinar a massa específica do minério utilizando o procedimento via picnômetro a gás hélio pelo equipamento ULTRAPYC 1200e da marca Quantachrome, também foi realizado o ensaio de WI de Bond seguindo os procedimentos da norma ABNT - NBR 11376 (1990). Esse ensaio permitiu avaliar a resistência do minério à fragmentação, fornecendo insights essenciais sobre sua resistência mecânica.

Além disso, uma análise granulométrica detalhada foi realizada após a britagem do minério para uma granulometria abaixo de 3,35 mm. Esta análise utilizou peneiras da

série Tyler (com aberturas de 3360 µm, 2380 µm, 2000 µm, 1410 µm, 841 µm, 601 µm, 500 µm, 300 µm, 212 µm, 149 µm, 106 µm, 74 µm, 53 µm e 37 µm). Essa análise foi essencial para compreender a distribuição de tamanho por faixa granulométrica para o teste de WI de bond.

ANÁLISE QUÍMICA

A análise química utilizou o ICP (*Inductively Coupled Plasma*) para determinação química de elementos presentes no minério. O procedimento experimental de análise química por ICP foi conduzido com rigoroso controle para garantir precisão nos resultados, visando determinar a composição elementar das amostras em estudo. Inicialmente, foram selecionadas amostras representativas do minério em diferentes tamanhos de partículas (1410 µm, 601 µm, 300 µm, 212 µm, 150 µm, 106 µm, 75 µm, 53 µm, 37 µm e -37 µm), cada uma foi meticulosamente pesada (0,250 g). Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de abertura, utilizando uma mistura concentrada de ácido nítrico (HNO₃) e ácido clorídrico (HCl) para solubilizar os componentes sólidos. Após a abertura, as soluções foram transferidas para balões volumétricos de 250 mL sendo essa a primeira diluição, posteriormente, essas soluções foram submetidas a novas diluições em balões volumétricos de 25 mL, 50 mL e 100 mL. Essas diluições foram realizadas para ajustar a concentração dos elementos presentes nas amostras, permitindo uma análise mais adequada no equipamento de ICP.

ANÁLISE MINERALÓGICA

A análise mineralógica utilizou dois métodos complementares: DRX (Difratometria de raio X) e MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) com EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*).

Para aumentar a eficiência da técnica de DRX, inicialmente a amostra passou por um processo de concentração utilizando uma mesa vibratória, resultando nos produtos concentrado, misto e rejeito. Em seguida, cada produto foi preparado para análise de DRX, incluindo a redução da amostra para um tamanho entre 0,002 mm e 0,050 mm e a confecção de pastilhas. Posteriormente, as amostras preparadas foram submetidas ao teste de DRX, onde foram irradiadas com raios X em diversos ângulos. Os padrões de difração resultantes foram registrados, fornecendo informações sobre as estruturas cristalinas dos minerais presentes em cada produto. Isso permitiu correlacionar os minerais com os picos de difração gerados pelo equipamento.

Para análise mineralógica através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Raios-X por Dispersão de Energia (EDS), as amostras foram preparadas meticulosamente em várias etapas. Primeiramente, selecionamos amostras com diferentes granulometrias (2380 μm , 2000 μm , 1410 μm , 595 μm , 500 μm , 354 μm , 212 μm , 149 μm , 106 μm , 74 μm , 53 μm , 37 μm e – 37 μm).

Cada amostra foi embutida em resina apropriada e submetida a um processo de lixamento cuidadoso em sete etapas. Utilizamos lixas de granulometrias 120, 180, 240, 320, 400, 600 e 1200. A direção do lixamento foi alterada a cada troca de lixa para eliminar as marcas das etapas anteriores, assegurando uma superfície uniforme. Após o lixamento, cada amostra passou por um processo de polimento por cerca de 5 minutos em cada pasta, inicialmente com pasta de alumina de granulometria 1 μm , seguido por um polimento adicional com pasta de diamante de granulometria 0,25 μm .

Posteriormente, as amostras foram inspecionadas em um microscópio óptico para detectar possíveis imperfeições. Após essa verificação, as amostras foram limpas com álcool e secas em um secador, antes de serem colocadas em um dessecador. Em seguida, as amostras foram metalizadas com uma fina camada de carbono para torná-las condutoras.

Por fim, as 13 amostras preparadas e metalizadas foram analisadas no MEV, onde um feixe de elétrons foi utilizado para varrer suas superfícies e gerar imagens em alta resolução.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados foi conduzida de acordo com a metodologia empregada nos ensaios, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Etapas da caracterização



Fonte: Próprios autores (2024)

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização física foi desdobrada em três ensaios distintos: a determinação da massa específica através do método da Picnometria a gás, a análise granulométrica utilizando as peneiras da série Tyler e, por fim, o ensaio de índice de trabalho de Bond.

Ensaio de picnometria a gás hélio

Os ensaios de picnometria a gás, conduzidos em cinco amostras, permitiram a determinação do valor médio da densidade do minério polimetálico. O resultado médio da massa específica do minério foi $2,89 \pm 0,007 \text{ g/cm}^3$. O valor baixo da densidade se justifica pelo teor elevado de talco.

Ensaio de *Work Index (WI)* de Bond

A determinação do índice de trabalho do minério polimetálico permitiu avaliar sua resistência à fragmentação. Como apresentado no Quadro 1, o minério registrou um índice de trabalho de 9,22 kWh/st. Este valor encontra-se dentro da faixa de valores definida por Beraldo (1987) para minérios de zinco e chumbo, que varia de 7 a 26 kWh/st.

Conforme destacado por Ferreira et al., (2015), é importante observar que a presença de partículas com dimensões menores que 0,15 mm na alimentação do ensaio pode levar a um aumento nos valores do índice de trabalho (WI) do minério em até 35,13%. No entanto, dado que apenas 8,69% da massa total da amostra em estudo consiste em partículas menores que 0,15 mm, podemos presumir que essa fração, embora representativa, não exerceu uma influência significativa nos valores de WI que foram determinados.

Quadro 1 – Dados do ensaio de WI

ÍNDICE DE TRABALHO (WI) = 10,16 Kwh/t							
ÍNDICE DE TRABALHO (WI) (907 kg) = 9,22 Kwh/st							
MAi = 1255,64 g							
AAR = 358,76 g							
1	2	3	4	5	6	7	8
Ciclos	Nº Rotação	Mai (g)	MARi (g)	MAPi (g)	MALi (g)	Desvio (g)	Mob (g/rot)
1	200,00	109,08	770,71	484,93	375,85	-126,18	1,88
2	168,49	42,13	824,89	430,75	388,62	-72,00	2,31
3	139,31	37,42	856,29	399,35	361,93	-40,60	2,60
4	124,74	34,69	903,53	352,11	317,42	6,64	2,54
5	128,96	30,59	908,71	346,93	316,34	11,82	2,45
6	133,96	30,14	889,90	365,74	335,60	-6,99	2,51
7	130,52	31,77	906,62	349,02	317,25	9,73	2,43
M = massa da alimentação inicial. (MA)i = massa da alimentação passante no início o ciclo i. (MAP)i = massa do produto passante em Am. NR = número de rotações.				AAR = massa a ser adicionada no sistema. (MAR)i = massa do produto retida em Am. (MAL)i = massa líquido do produto passante gerado em cada ciclo i. Mob = moabilidade.			

Fonte: Próprios autores (2024)

A Figura 3 apresenta a análise granulométrica da alimentação e do produto final resultante do processo de moagem em um moinho Bond para a determinação do Índice de Trabalho (WI), no qual foram obtidos um F80 de 2576 μm e um P80 de 103 μm .

O Índice de Trabalho (WI) determinado a partir desses resultados refletirá a energia necessária para realizar essa redução no tamanho das partículas. Um valor de WI mais alto indicaria que uma quantidade significativa de energia foi consumida na moagem para atingir o tamanho de partícula desejado. Isso é fundamental para avaliar a eficiência do processo de moagem e otimizar as condições operacionais do moinho Bond, visando a obtenção do tamanho de partícula desejado para o produto final.

A Equação 1 revela uma razão de redução do minério em 25, indicando que a quantidade inicial de material na alimentação foi reduzida em 25 vezes. Essa considerável redução está em concordância com o fato de o índice de trabalho do material não alcançar valores significativamente elevados.

$$R_r = \frac{F80}{P80} = \frac{2576 \mu\text{m}}{103 \mu\text{m}} = 25 \quad (\text{Eq. 1})$$

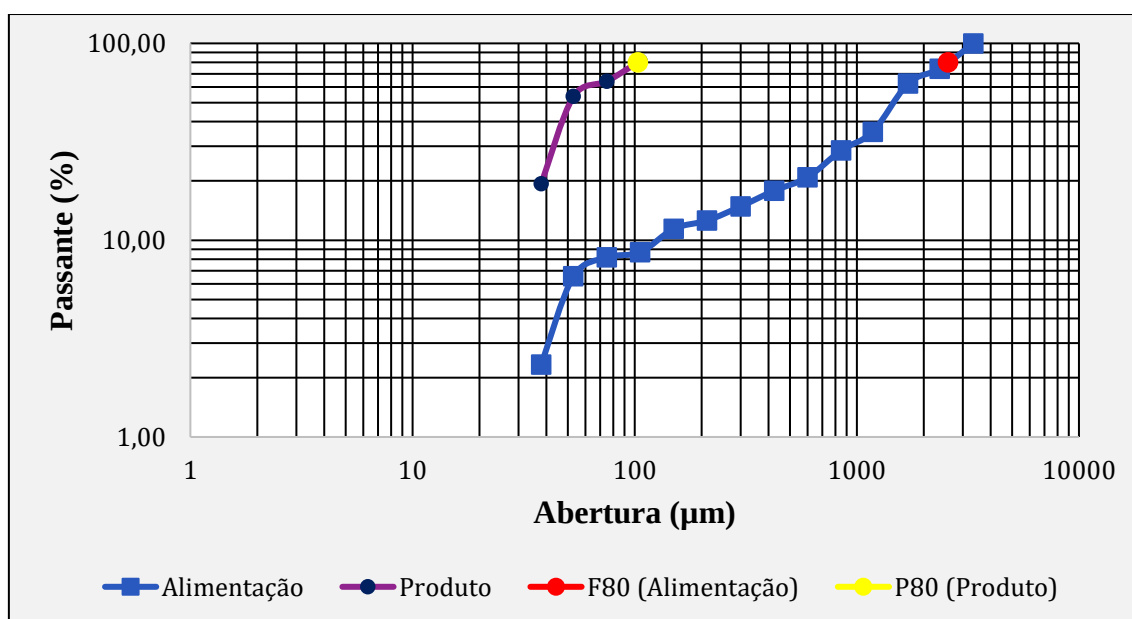
em que:

Rr: razão de redução;

F80: abertura de peneira na qual passam 80% da alimentação;

P80: abertura de peneira na qual passam 80% do produto.

Figura 3 – Resultados da análise granulométrica da alimentação e do produto final resultante da moagem em moinho Bond para determinação do WI

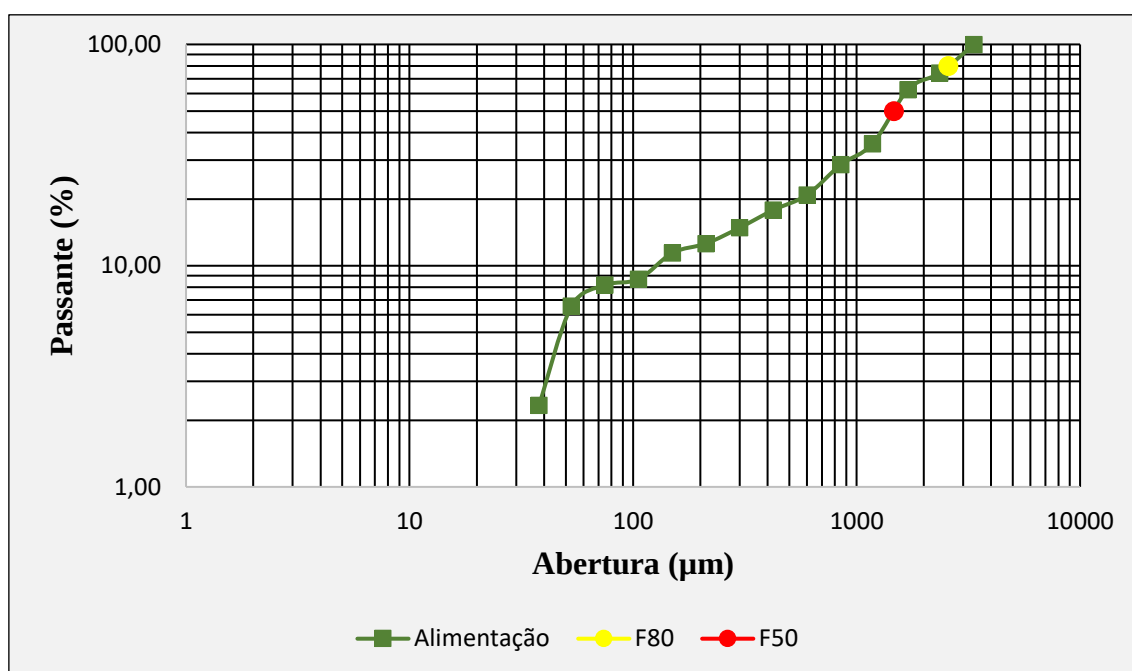


Fonte: Próprios autores (2024)

Análise granulométrica da alimentação do ensaio de WI

Como ilustrado na Figura 4, a amostra exibiu valores de F80 iguais a 2576 μm e um F50 de 1471 μm . A análise granulométrica da amostra de alimentação revelou uma distribuição heterogênea das partículas em relação ao tamanho. À medida que as malhas das peneiras se tornavam mais finas, notou-se uma diminuição na quantidade de material retido, evidenciada pela redução do percentual acumulado retido. Isso indica que a maior parte da massa estava concentrada nas frações mais grossas da amostra.

Figura 4 – Análise granulométrica da alimentação do ensaio de WI



Fonte: Próprios autores (2024)

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A Tabela 1 fornece uma análise detalhada da composição do minério polimetálico em questão. Entre os minerais de interesse presentes neste minério, os teores de zinco, cobre e chumbo são significativos, registrando respectivamente 5,15%, 0,15% e 1,30%. Além disso, observa-se a presença considerável de elementos como ferro, magnésio, alumínio, cálcio e cádmio, juntamente com o enxofre.

Essa diversidade na composição sugere a presença de minerais como hematita, dolomita, arsenopirita, talco e clorita. A hematita é indicada pela presença de ferro, a dolomita e o talco pelo magnésio e cálcio, a arsenopirita pelo cádmio e enxofre, e a clorita pode estar presente devido aos elementos alumínio e magnésio.

Tabela 1 – Composição química do minério polimetálico via ICP

Elementos	Teor (%)
Al	7,29
As	0,43
Ca	1,20
Cd	2,06
Co	0,00
Cr	0,00
Cu	0,15
Fe	29,97
K	0,00
Li	0,74
Mg	10,91
Mn	1,76
Ni	0,34
P	0,00
Pb	1,30
S	18,82
Sb	2,35
Zn	5,15

Fonte: Próprios autores (2024)

A Tabela 2 fornecida oferece uma visão abrangente dos teores de minerais presentes na amostra de minério polimetálico, com uma atenção especial voltada para os elementos cobre (Cu), chumbo (Pb) e zinco (Zn). Uma característica notável dessa análise é a variação nos teores entre diferentes elementos, o que é uma característica comum em depósitos de minérios polimetálicos.

Uma observação de destaque é a presença dominante de zinco (Zn) e chumbo (Pb) nas frações mais grosseiras do minério, especialmente na faixa de 1180 μm , onde aproximadamente 34,27% de Zn e 34,28% de Pb foram identificados. Em contrapartida, o cobre (Cu) exibe uma distribuição mais uniforme em várias faixas granulométricas.

Tabela 2 – Análise granuloquímica do minério polimetálico com ênfase em Zn, Pb e Cu

Faixa de tamanho (um)	Massa Retida simples (%)	Teor			Teores globais (%)		
		(ppm)	(%)	(%)			
		Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
1180	51,29	0,04	0,06	0,23	13,11	34,28	34,27
+1180 -601	14,71	0,00	0,13	0,39	0,00	20,06	16,50
+601 -300	5,74	0,53	0,13	0,48	18,87	7,64	8,10
+300 -212	4,30	0,27	0,11	0,51	7,10	4,93	6,44
+212 -150	2,22	0,05	0,18	0,65	0,70	4,17	4,21
+150 -106	5,20	0,64	0,11	0,51	20,55	6,33	7,66
+106 -75	0,98	1,09	0,21	1,04	6,60	2,21	2,95
+75 -53	3,08	0,26	0,09	0,49	4,89	2,98	4,38
+53 -38	8,03	0,23	0,11	0,42	11,35	9,61	9,91
-38	4,44	0,61	0,17	0,43	16,84	7,79	5,59
Total	100,00				100,00	100,00	100,00

Fonte: Próprios autores (2024)

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Na caracterização mineralógica, foram empregados métodos como difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, acoplada com EDS, para identificar e descrever os minerais presentes.

Difratometria de Raios X (DRX)

Os três difratogramas foram obtidos a partir das amostras coletadas da mesa vibratória, representando uma amostra concentrada, uma mista e um rejeito. A análise por difração de raios X revelou a presença de pirrotita, quartzo, esfarelita, flogopita, pirita e clinoclóro.

Os resultados do ensaio indicam que os limites de detecção estão próximos a 5%, o que implica que os minerais de chumbo e cobre presentes no minério, em frações inferiores a 2%, não foram identificados pela técnica utilizada. É relevante mencionar que, dado que todos os picos foram encontrados, não houve necessidade de forçar a identificação de outros minerais, uma vez que o estudo já empregou outras técnicas para a identificação mineralógica.

Quanto aos resultados específicos dos difratogramas das amostras concentrada, mista e de rejeitos, estes foram apresentados na Tabela 3. Os difratogramas foram essenciais para fornecer informações sobre a composição mineralógica das amostras, destacando as fases presentes e suas proporções relativas.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de DRX

Produtos	Minerais
Concentrado	Pirrotita $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$, quartzo SiO_2 , esfalerita ZnFeS , flogopita $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$ e Clinocloro $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
Misto	Quartzo SiO_2 , clinocloro $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ e flogopita $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$
Rejeito	Quartzo SiO_2 , clinocloro $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ e pirita FeS_2

Fonte: Próprios autores (2024)

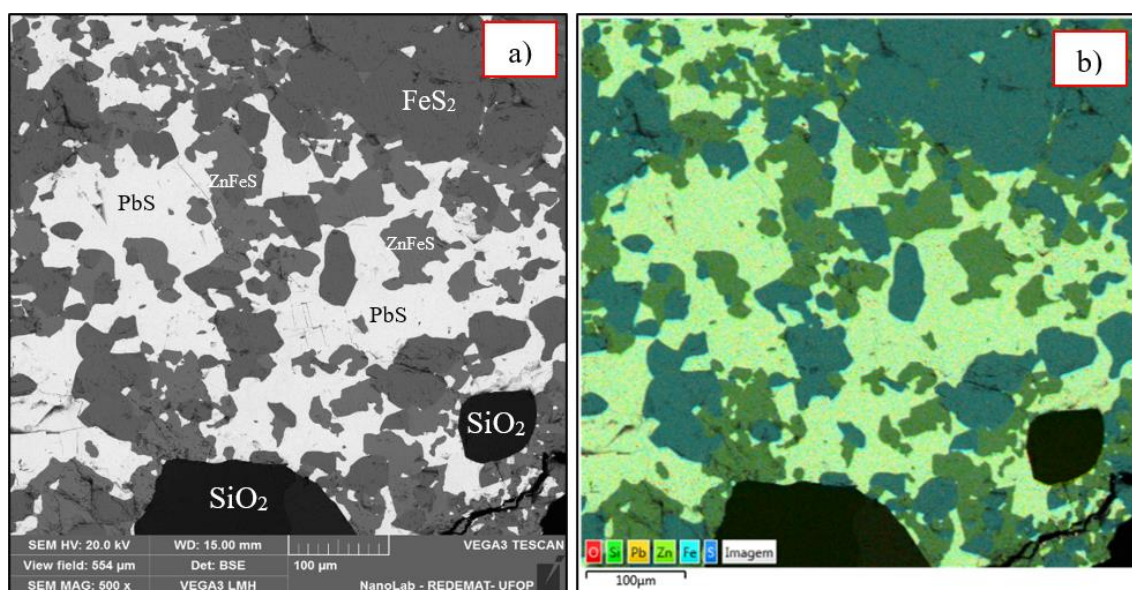
MEV – EDS

Ao realizar a análise das amostras por meio de imagens obtidas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e subsequentemente processadas pelo software ImageJ, observou-se que os elementos químicos apresentam contraste proporcional ao número atômico. Nas imagens, as regiões mais claras indicam a presença de elementos químicos mais pesados.

Durante a análise das amostras, constatou-se que a maior parte dos minerais de interesse estavam localizados nas áreas mais claras das imagens. Através do software, utilizando técnicas de realce de contraste, foi possível quantificar a porcentagem dos minerais de interesse em diferentes faixas granulométricas.

A Figura 5 confirma a observação de que os principais minerais de interesse estão concentrados nas frações de cinzas mais claras. Esta constatação é reforçada ao utilizar a técnica de elétrons retroespalhados. Como abordado por Neumann et al., (2010) neste método, o nível de cinza em cada pixel da imagem reflete o peso atômico médio dos elementos presentes, possibilitando uma análise composicional indireta. A relevância dessas imagens é notável devido à capacidade de distinguir diferentes fases minerais com base em suas características no detector. Nessa imagem específica, a distribuição por elementos revela a presença predominante dos minerais de esfalerita, galena, pirita e quartzo.

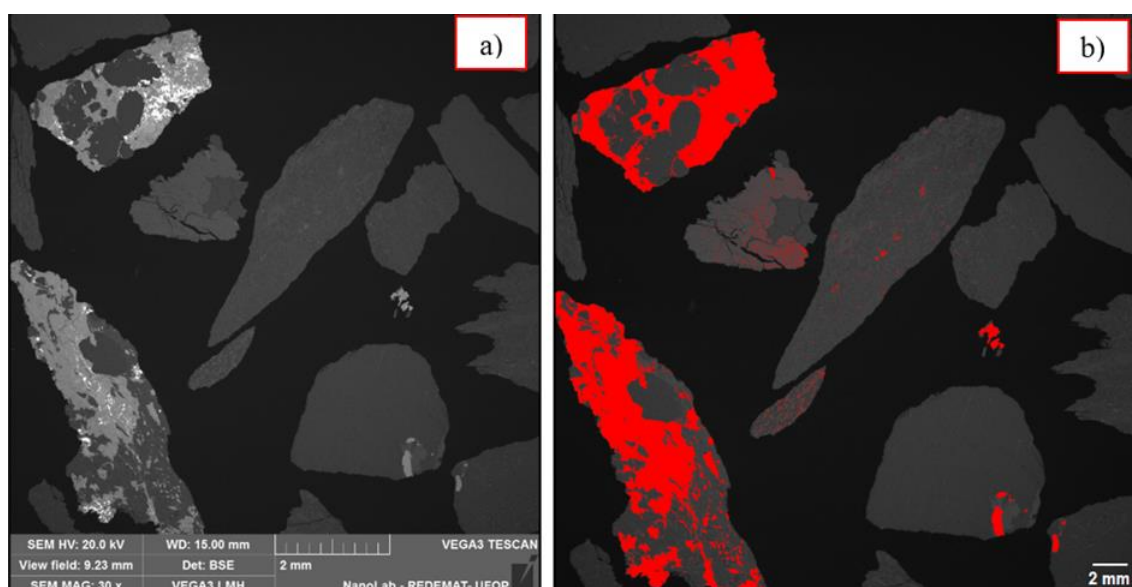
Figura 5 – (a) Imagem do MEV (BSE) – 2000 μm (b) Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) – 2000 μm



Fonte: Próprios autores (2024)

Ao analisar por meio de contraste utilizando o software ImageJ, foi possível isolar as frações mais escuras das mais claras como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – (a) Imagem do MEV (BSE) - (2000 μm) (b) Imagem processada pelo software ImageJ (2000 μm)



Fonte: Próprios autores (2024)

Corroborando com a análise granulométrica, nota-se que os minerais de interesse demonstram uma maior presença nas faixas granulométricas associadas a partículas mais grosseiras Tabela 4. À medida que a granulação diminui, observa-se uma tendência à homogeneização na distribuição desses minerais.

É importante destacar que a técnica empregada para mensurar a proporção de minerais de interesse e ganga pode conter margens de erro. Sua utilização foi realizada com o propósito de obter uma compreensão superficial. Caso se deseje uma análise mais detalhada, é recomendável a adoção da técnica de MLA.

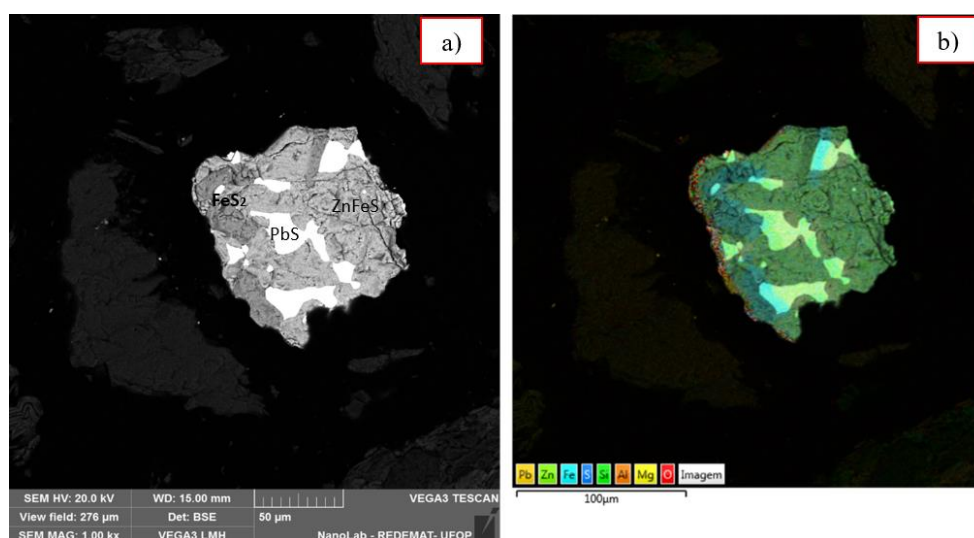
Tabela 4 – Distribuição dos minerais de interesse por faixa granulométrica

Abertura da peneira (µm)	Minerais de Interesse (%)	Minerais de Ganga (%)
2000	7,289	92,711
1410	5,996	94,004
600	5,417	94,583
500	2,789	97,211
300	2,081	97,919
212	2,932	97,068
149	2,619	97,381
106	2,452	97,548
74	2,889	97,111
53	2,866	97,134
37	2,555	97,445

Fonte: Próprios autores (2024)

A observação das imagens obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) acoplado com Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) revelou que a liberação dos minerais de interesse ocorre a partir da faixa granulométrica de 106 µm Figura 7. Ao varrer a amostra contendo partículas de 106 µm, percebeu-se que, na maioria das vezes, os minerais de interesse não estavam associados aos minerais de ganga.

Figura 7 – (a) Imagem do MEV – 106 µm (BSE) (b) Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) – 106 µm



Fonte: Próprios autores (2024)

Os principais minerais encontrados por meio da combinação das técnicas de análise química ICP, DRX e MEV-EDS incluem talco, esfalerita, galena, pirita, calcopirita, quartzo, arsenopirita, ilmenita, mica, dolomita, willemita, clorita (Zn), clinoclóro, flogopita e pirrotita.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos dados obtidos, conclui-se que a amostra do minério polimetálico proveniente de uma reserva em Aripuanã, Mato Grosso, possui uma massa específica de 2,89 g/cm³. Essa densidade relativamente baixa pode ser atribuída ao teor expressivo de magnésio, possivelmente associado à presença de talco na amostra. O Índice de Trabalho (WI) de 9,22 kWh/st indica uma resistência à fragmentação moderada do minério, situando-se dentro da faixa estabelecida por Beraldo (1987) para minérios de zinco e chumbo.

A análise química revelou teores significativos de zinco (5,15%), cobre (0,15%) e chumbo (1,30%), além da presença de outros elementos como ferro, magnésio, alumínio, cálcio e cádmio. Essa diversidade na composição sugere a presença de diversos minerais, como hematita, dolomita, arsenopirita, talco e clorita.

A difratometria de raios X identificou minerais como pirrotita, quartzo, esfalerita, flogopita, pirita e clinoclóro. Já a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada com EDS evidenciou uma liberação significativa a partir da faixa granulométrica de 106 µm.

Os principais minerais encontrados por meio da combinação das técnicas de análise química ICP, DRX e MEV-EDS incluem talco, esfalerita, galena, pirita, calcopirita, quartzo, arsenopirita, ilmenita, mica, dolomita, willemita, clorita (Zn), clinoclóro, flogopita e pirrotita.

Neste contexto, munido dessas informações, torna-se possível desenvolver rotas tecnológicas mais eficientes, considerando as características físicas, químicas e mineralógicas do minério. Esses dados são cruciais para a formulação de estratégias bem fundamentadas e a implementação de práticas operacionais mais eficazes na extração e concentração dos minerais desejados, contribuindo assim para a melhoria global do processo de beneficiamento mineral. Os resultados apresentados proporcionam uma base sólida para futuras decisões e otimizações na cadeia produtiva do minério polimetálico em questão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento Fapemig, CNPq, CAPES, Finep e à UFOP pelo apoio financeiro e institucional fornecido durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11376: **Moinho de Bolas, Determinação do Índice de Trabalho**. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 4p.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Edgard Blucher, 1987.

CUNHA, I.A., MISI, A., BABINSKY, M., S. IYER, S.S. **Lead isotope constraints on the genesis of Pb-Zn deposits in the Neoproterozoic Vazante Group, Minas Gerais, Brazil. Gondwana Research**, v. 11, n. 3, p. 382-395, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.02.008>. Acesso em: 30 mar. 2024.

EY; IBRAM. **Riscos e Oportunidades de Negócios em Mineração e Metais no Brasil** [s.l.], 2021. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/04/Estudo-Mineracao-e-Metais_EY-e-IBRAM_Versao_050421.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.

FERREIRA, K. C., GALERY, R., MONTENEGRO, L. C. M., & PERES, A. E. C. (2015). **Efeito do escalpe no work index de bond**. HOLOS, 7, 59–64. <https://doi.org/10.15628/holos.2015.3703>

FIGUEIREDO, T. D., RODRIGUES, G. H. G., SILVA, P. H. L. DA., NOGUEIRA, F. C., PEREIRA, C. A., & RODRIGUES, K. F. (2022). **Caracterização do Minério de Zinco, Chumbo e Prata da Mina do Extremo Norte**. HOLOS, 4. <https://doi.org/10.15628/holos.2022.11276>

NEUMANN, R.; SCHNEIDER, C. L.; NETO, A. A. **Caracterização Tecnológica de Minérios Parte II**. In: LUZ, A. D.; SAMPAIO, J. A. E FRANÇA. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 3, p. 85-137.

NEVES, L. P. **Características Descritivas e Genéticas do Depósito de Zn Pb Morro Agudo, Grupo Vazante**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nacional de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2011.

OLIVEIRA, G. D. **Reconstrução paleoambiental e quimioestratigrafia dos Carbonatos Hospedeiros do Depósito de Zinco Silicatado de Vazante, MG**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2013.

PORPHÍRIO, N.H.; BARBOSA, M.I.M.; BERTOLINO, L.C. **Caracterização Mineralógica de Minérios Parte I**. In: LUZ, A.D.; SAMPAIO, J.A. e FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, Cap. 3, p. 57-81.

REUTERS. **Preços de zinco e cobre devem permanecer em patamares altos no 3º tri, diz CEO da Nexa**. Money Times, 30 abr. 2021. Disponível em: <https://www.moneytimes.com.br/precos-de-zinco-e-cobre-devem-permanecer-em-patamares-altos-no-3o-tri-diz-ceo-da-nexa/>. Acesso em: 21 mar. 2024.