



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MATERIAIS



Ataíde José Dias Júnior

**Caracterização do Rejeito Arenoso e Lama Gerados no
Processo de Beneficiamento de Minério de Ferro**

OURO PRETO
2025

Ataíde José Dias Júnior

Caracterização do Rejeito Arenoso e Lama Gerados no Processo de Beneficiamento de Minério de Ferro

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Metalúrgica da Escola de
Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenheiro Metalurgista.

Orientadora: Dr.^a Maria Aparecida Pinto

Ouro Preto
2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D541c Dias Junior, Ataíde José.

Caracterização do rejeito arenoso e lama gerados no processo de beneficiamento de minério de ferro. [manuscrito] / Ataíde José Dias Junior. - 2025.

47 f.: il.: color., gráf., tab., mapa. + Fotos.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Lama. 2. Areia - Minas e mineração. 3. Beneficiamento de minério - Caracterização. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.7:622.341

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ataíde José Dias Júnior

Caracterização do rejeito arenoso e lama gerados no processo de beneficiamento de minério de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 24 de Outubro de 2025

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto - Orientadora
Dr. Gilberto Henrique Álvares Tavares da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Jeilce Maria Abreu dos Santos - Instituto Tecnológico Vale - ITV

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/11/2025



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/11/2025, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1015612** e o código CRC **5EC11491**.

AGRADECIMENTOS

“Mas graças a Deus, que nos dá a vitória por meio de nosso Senhor Jesus Cristo. Portanto, meus amados irmãos, mantenham-se firmes, e que nada os abale. Sejam sempre dedicados à obra do Senhor, pois vocês sabem que, no Senhor, o trabalho de vocês não será inútil.” (1 Coríntios 15:57-58)

Agradeço primeiramente a Deus, por ter sustentado meus passos e me dado força, coragem e sabedoria nos momentos de dificuldades. Obrigado meu Deus por me ajudar a concluir mais uma etapa na minha vida.

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado com apoio incondicional. Sua cobrança, confiança, compreensão e incentivo foram fundamentais para que eu pudesse seguir firme nesta trajetória acadêmica. Cada, oração, gesto de apoio, palavra de motivação e demonstração de carinho foi essencial para que eu chegasse até aqui com determinação e equilíbrio.

À Yara Carneiro, meu amor e companheira nessa jornada acadêmica, expresso minha profunda gratidão por toda a ajuda, pelos dias de estudo e por caminhar ao meu lado durante toda essa trajetória. Compartilhar este momento com você tornou tudo ainda mais especial e significativo.

Com carinho e respeito, deixo um agradecimento especial à minha orientadora, Maria Aparecida, pelos ensinamentos, pela dedicação e até mesmo pelos necessários “puxões de orelha”, que foram essenciais para meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço também ao Gilberto Tavares, meu orientador de curso, pelo apoio e orientações durante a elaboração deste trabalho, contribuindo de forma significativa para sua conclusão.

Agradeço também aos amigos da faculdade pela parceria ao longo da jornada e aos professores e técnicos do DEMET que de alguma forma contribuíram para minha formação.

Expresso ainda minha gratidão à Gerência de Beneficiamento da Samarco pelo apoio e pela disponibilização dos materiais que tornaram este trabalho possível.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas de Ouro Preto pela formação acadêmica de excelência e pelo ambiente de aprendizado que contribuíram significativamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. É uma honra ter sido aluno dessas instituições que representam tradição, dedicação e excelência no ensino de engenharia no Brasil.

A todos vocês, gratidão eterna.

RESUMO

A mineração é um setor fundamental para a economia, que contribui para o desenvolvimento social quando elaborada de forma sustentável. Todavia, a operação gera impactos ambientais relevantes devido ao beneficiamento de minérios que produz um grande volume de rejeitos. Desse modo, este trabalho tem como objetivo caracterizar o rejeito arenoso e a lama, subprodutos do beneficiamento de rochas itabiríticas pela Samarco. As amostras de rejeito arenoso e lama foram submetidas à caracterização química e mineralógica por técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) associada à Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Os resultados das análises mostraram que a lama gerada pelo processo apresenta alto teor de ferro relacionado a partículas ultrafinas em sua composição e o rejeito arenoso apresenta alto teor de sílica característica típica de materiais com presença de quartzo.

Palavras-chave: Rejeito arenoso. Lama. Minério itabirítico. Caracterização.

ABSTRACT

Mining is a key sector for the economy and can contribute to social development when carried out in a sustainable manner. However, the operation generates significant environmental impacts due to the beneficiation of ores, which produces a large volume of tailings. Thus, this study aims to characterize the tailing coarse and slime which are by-products of the beneficiation of itabirite rocks by Samarco. The samples of tailings coarse and slime were subjected to chemical and mineralogical characterization using X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM) coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (EDS). The analytical results showed that the tailing slime generated in the process contains a high iron content associated with ultrafine particles in its composition, while the tailing coarse presents a high silica content, a typical characteristic of quartz-bearing materials.

Keywords: Coarse. Slime. Itabirite ore. Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Fluxograma básico das etapas de processamento mineral.....	15
Figura 3. 2 - Espessadores de rejeito, lama e concentrado da usina de beneficiamento da Samarco.....	16
Figura 3. 3 - Cava a céu aberto para disposição de lama - Mina Alegria Sul, Samarco, Mariana	21
Figura 3. 4 - Pilha de rejeito arenoso filtrado em operação na Samarco, Mariana	22
Figura 3. 5 - Planta de filtragem de filtros a vácuo na Samarco, Mariana.....	23
Figura 3. 6 - Arranjo de filtro de disco a vácuo convencional	24
Figura 3. 7 - Zonas do filtro de disco a vácuo convencional	25
Figura 4. 1 - Sequência de preparação das amostras	29
Figura 4. 2 - Equipamento de fluorescência de raios X.....	29
Figura 4. 3 - Difratorômetro de raios X.....	30
Figura 4. 4 - Amostras preparadas para análise MEV/EDS.....	31
Figura 4. 5 - Microscópio Eletrônico de Varredura com sistema EDS acoplado	31
Figura 5. 1 - Difratograma da amostra de Lama 2.....	35
Figura 5. 2 - Difratograma da amostra de Rejeito 94/6.....	35
Figura 5. 3 - Difratograma da amostra de Rejeito Arenoso.....	35
Figura 5. 4 - Mapa de Composição da amostra de Lama2	36
Figura 5. 5 - Mapa de Composição da amostra do Rejeito 94/6	37
Figura 5. 6 - Mapa de Composição da amostra de Rejeito Arenoso.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Composição química de amostras de rejeitos de minério de ferro provenientes do Quadrilátero Ferrífero	19
Tabela 5. 1 – Distribuição granulométrica das amostras.....	32
Tabela 5. 2 - Resultado da análise por fluorescência de raios X.....	33

LISTA DE SIGLAS

CANMET - Canadian Centre for Mineral and Energy Technology

CETEM - Centro de Tecnologia Mineral

CETEP – Centro Técnico de Educação Profissional

CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

DEMET - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DRX – Difração de Raio X

EDS - Espectroscopia de Energia Dispersiva

EM – Escola de Minas

FRX - Fluorescência de Raios X

ICOLD - International Commission on Large Dams

JKMRC - Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MLA - Mineral Liberation Analysis

REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais

SEM - Scanning Electron Microscopy

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo Geral.....	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Processo de Exploração do Itabirito.....	14
3.2	Espessamento.....	16
3.3	Rejeitos	17
3.3.1	Rejeito arenoso.....	18
3.3.2	Lama.....	19
3.4	Método de Disposição de Rejeitos	20
3.5	Filtragem	22
3.5.1	Filtro de disco a vácuo convencional.....	23
3.6	Análise Mineralógica via sistema MEV – EDS.....	25
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
4.1	Preparação das Amostras.....	28
4.2	Fluorescência de Raios X e Difratomia de Raios X.....	29
4.3	Caracterização Morfológica via MEV/EDS	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1	Distribuição Granulométrica.....	32
5.2	Fluorescência de Raios X (FRX).....	33
5.3	Difratomia de Raios X (DRX).....	33
5.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – Sistema EDS.....	36
6	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel essencial na economia nacional, sendo crucial para promover o bem-estar e melhorar a qualidade de vida das gerações atuais e futuras. Quando conduzida com responsabilidade social, a atividade mineradora é fundamental para o desenvolvimento de uma sociedade mais justa, alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável. O setor de mineração consome uma grande quantidade de recursos naturais e energia, resultando na geração significativa de emissões gasosas, líquidas e sólidas, que podem contaminar o meio ambiente (Lovón -Canchumani; Lima; Oliveira, 2015; Silva, 2009).

Entre os minérios extraídos, o minério de ferro destaca-se como um dos mais importantes. Segundo Carvalho *et al.* (2014), o minério de ferro extraído no Quadrilátero Ferrífero pode ser classificado em dois grupos principais: o minério itabirítico, que tem baixo teor em ferro, e o minério hematítico, que possui alto teor em ferro. A classificação desses minérios é baseada na composição mineralógica e na textura.

O itabirito é uma rocha composta por camadas predominantes de sílica (quartzo) e óxido de ferro. Para utilizá-la como fonte de minério de ferro, é necessário separar a sílica por meio de processos físico-químicos, que incluem a moagem da rocha em granulometrias finas, classificação, flotação do minério em meio aquoso e a aglomeração do minério concentrado na forma de pelotas. No entanto, esse processo de extração e beneficiamento do minério de ferro resulta na geração de grandes quantidades de resíduos constituído de sílica (quartzo) e óxidos de ferro, que não pode ser extraído, conhecidos como rejeitos (Freire, 2012).

O minério de ferro é um recurso mineral limitado, com reservas finitas, que eventualmente se esgotarão, mesmo que existam depósitos de grande volume. No momento, é necessário extrair corpos rochosos com menores teores de ferro devido à escassez de jazidas mais ricas. Como resultado do processamento dessas rochas mais empobrecidas, o volume de material a ser rejeitado durante o processo aumenta, para que seja possível obter um produto com maior concentração de ferro (Pinto, 2021).

Conforme dito por Nascimento (2019), as preocupações da sociedade e de órgãos reguladores em relação aos potenciais impactos sociais e ambientais nos processos de mineração têm tornado mais difícil a obtenção de novas licenças para a construção de barragens e o alteamento das já existentes, incentivando pesquisas sobre alternativas para a disposição dos resíduos gerados. Uma solução viável é a disposição de rejeitos a seco em forma de pilhas. Nesse processo, a polpa, previamente adensada, é filtrada e o material resultante é depositado em forma de pilhas.

As lamas não podem ser filtradas com a tecnologia de filtro de disco convencional, pois possuem propriedades distintas do rejeito arenoso. Por se tratar de partículas ultrafinas, ou seja, menores que 10µm, grande parte do material fica retida nos discos do filtro, comprometendo sua eficiência e inviabilizando sua utilização para essa finalidade (Nascimento, 2019). Uma alternativa viável para a disposição dos rejeitos de lama tem sido o aproveitamento de cavas exauridas, reutilizando essas áreas previamente mineradas para o depósito seguro do material, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais e otimizando o uso do espaço disponível (Portes, 2013).

A conversão de resíduos sólidos da mineração em novos produtos tem sido amplamente investigada e aplicada tanto no Brasil quanto no exterior. Estudos buscam alternativas para seu aproveitamento como areia em processos de fundição metálica, na fabricação de concreto, tijolos e pavimentos para a indústria da construção civil, além de sua aplicação como pigmentos em tintas. Esses exemplos representam estratégias eficazes para reduzir o impacto ambiental causado pelas atividades mineradoras (Figueiredo, 2017; Assis; Queiroga; Mendes, 2018; Souza; Guedes, 2017).

Nesse trabalho de conclusão de curso tem-se como objetivo a caracterização do rejeito arenoso e lama, produzidos pela Samarco, a partir da lavra e beneficiamento de rochas itabiríticas.

2 OBJETIVOS

Para a realização deste trabalho, foram determinados os seguintes objetivos:

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar o rejeito arenoso proveniente da flotação e processado pela filtragem convencional a vácuo e a lama descendente da deslamagem do processo do beneficiamento da Samarco.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização de amostras de rejeito arenoso e lama, categorizando suas propriedades mineralógicas, químicas e físicas;
- Determinar a distribuição granulométrica do rejeito arenoso e da lama;
- Analisar os constituintes do rejeito arenoso e da lama via difratometria de raios X;
- Analisar qualitativamente a composição elementar do rejeito arenoso e da lama via fluorescência de raios X;
- Analisar a composição mineralógica do rejeito arenoso e da lama via microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte referente ao processo de beneficiamento do minério de ferro e os resíduos gerados.

3.1 Processo de Exploração do Itabirito

Segundo Rosière, Chemale e Guimarães (1993), o itabirito é uma rocha caracterizada pela presença de camadas alternadas de minerais de óxidos de ferro, como hematita, magnetita e goethita, além de outros minerais, como o quartzo, dolomita e tremolita, com um teor de ferro que pode chegar a até 64%.

Devido à presença do minério de ferro combinado com o quartzo, o itabirito exige um processo de exploração em múltiplas fases, com o objetivo de concentrar o mineral desejado. Após a extração, dá-se início ao beneficiamento do minério como exibido no fluxograma da Figura 3.1, que abrange as seguintes etapas (Pormin, 2008; Dutra, 2008):

- Lavra: processo de extração do minério da mina;
- Britagem: Processo destinado a reduzir o tamanho das partículas do minério;
- Peneiramento: Separação das partículas por granulometria;
- Moagem: Cominuição e classificação das partículas com o objetivo de liberar os minerais de interesse para as etapas de concentração subsequentes;
- Classificação: Separação das partículas com base em suas propriedades físicas, como tamanho e densidade, geralmente realizada por ciclonagem em estágios de classificação;
- Deslamagem: Etapa responsável pela remoção de partículas finas e ultrafinas do minério, compreendendo partículas abaixo de 10µm;
- Concentração: Visa recuperar os minerais presentes no minério em sua forma mais concentrada possível. Esse processo pode ser feito por diversos métodos, como separação manual, gravimétrica, por meio denso, magnética, eletrostática e flotação. A flotação se destaca por gerar o resíduo arenoso em

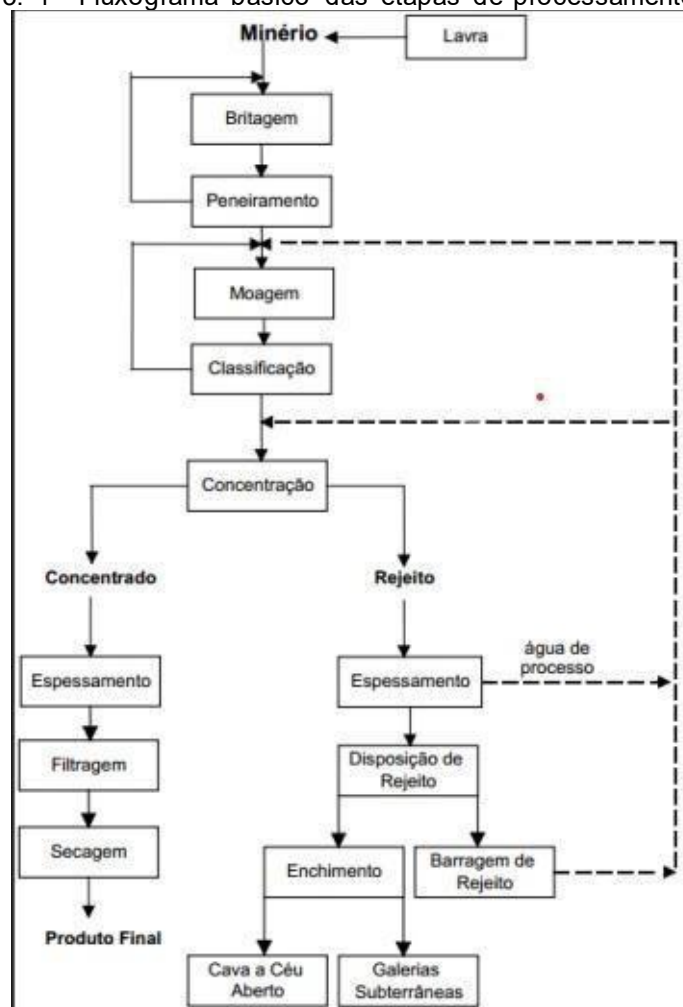
análise.

A partir da etapa de concentração, o processo se divide em duas rotas. Uma delas é a do concentrado, que representa o produto de valor agregado. Esse material segue por três etapas principais de remoção de umidade (Carmo Resende, 2009).

- Espessamento, no qual ocorre a retirada parcial da água;
- Filtragem, responsável pela remoção mais intensa da água restante;
- Secagem, que elimina a umidade residual.

Ao final dessas etapas, obtém-se o concentrado seco, que constitui o produto final do processo de beneficiamento.

Figura 3. 1 - Fluxograma básico das etapas de processamento mineral



Fonte: (Luz; Sampaio; França, 2010)

A outra rota do processo é destinada ao rejeito, que também passa pela etapa de espessamento, visando a redução do teor de água presente nesse material. Após essa etapa, o rejeito pode ser descartado de duas maneiras: (Carmo Resende, 2009).

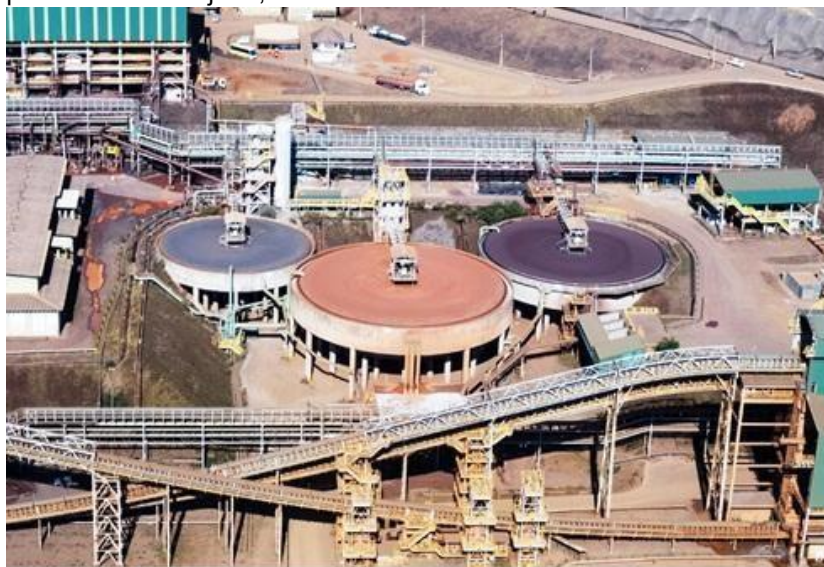
- Por enchimento, sendo utilizado para preencher cavas a céu aberto ou galerias subterrâneas;
- Ou por meio do armazenamento em barragens de rejeito, estruturas projetadas especificamente para essa finalidade.

Além disso, parte da água utilizada nesse processo — chamada de água de processo — pode ser recuperada e recirculada para as etapas iniciais da planta. Essa reutilização contribui significativamente para a economia de recursos hídricos e para a sustentabilidade ambiental do sistema (Carmo Resende, 2009).

3.2 Espessamento

Os espessadores, conforme mostrado na Figura 3.2, são amplamente utilizados e são os equipamentos mais comuns para realizar o desaguamento e a recuperação da água dos rejeitos na indústria mineral, conforme afirma Fitton e Roshdieh (2013).

Figura 3. 2 - Espessadores de rejeito, lama e concentrado da usina de beneficiamento da Samarco



Fonte: (Samarco, 2020)

De acordo com Oliveira, Luz e Lacerda (2004), o espessador pode ser dividido em três zonas distintas: clarificação, sedimentação e compressão. Na zona de clarificação, as partículas encontram-se afastadas umas das outras, com uma maior diluição da polpa. Na zona de sedimentação, há um aumento na formação de agregados, bem como uma elevação na concentração de partículas. Por fim, na zona de compressão, os sólidos são espessados ou compactados, o que resulta em um aumento da densidade da polpa.

Segundo Espósito (2000), o conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky, em 1999, e envolve o aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa e consequente elevação do teor de sólidos. Neste processo, utilizam-se espessadores que têm a função de separar os sólidos do líquido por meio da sedimentação de partículas por gravidade. Portanto, o espessamento é um processo mecânico.

Conforme Portes (2013), para otimizar o processo de sedimentação, os reagentes mais comuns no espessamento de rejeitos são os floculantes e os coagulantes. Os floculantes são polímeros, tanto naturais quanto sintéticos, com alto peso molecular que facilitam a sedimentação das partículas suspensas. Além disso, o autor ressalta que o pH também influencia o estado de agregação e dispersão das polpas nesse processo.

Um dos principais benefícios dos métodos de espessamento é a elevada taxa de recuperação de água. Essa vantagem se torna ainda mais relevante à medida que o uso sustentável da água se torna uma exigência crescente nos projetos de mineração (Alves, 2020).

3.3 Rejeitos

Como os minérios são bens não renováveis, é inevitável que a produção futura de minerais de jazidas de baixo teor aumente, resultando em uma maior geração de rejeitos. Um estudo apontou que, em 2010, a indústria de mineração produziu cerca de 14 bilhões de toneladas de rejeitos em todo o mundo. Isso ressalta a necessidade de construir, manter e monitorar estruturas sustentáveis e seguras

para o armazenamento e contenção desses resíduos (Adiansyah *et al.*, 2015).

De acordo com Freire (2012), o resíduo arenoso, que é um dos focos deste estudo, é produzido durante o processo de flotação, que faz parte da etapa de concentração do minério. Outro objeto de análise é a lama, formada na etapa de deslamagem, na qual ocorre a separação das partículas ultrafinas, conforme mencionado anteriormente.

3.3.1 Rejeito arenoso

Conforme citado por Davies (2011), os rejeitos filtrados são vistos como um material seco, que possui um nível de umidade suficiente para preencher parte dos espaços vazios entre as partículas, mas não a ponto de comprometer a compactação eficiente do material.

O processo de filtragem do rejeito arenoso tem início no espessador, cuja principal função é realizar a primeira etapa de desaguamento dos rejeitos. O *overflow* desse espessador, composto por água, retorna ao processo. Já o fluxo contendo as partículas sólidas, chamado de *underflow*, é encaminhado para o filtro de disco a vácuo (Boccamino, 2017).

O processo de desaguamento continua no filtro de disco a vácuo, no processo de filtração do rejeito arenoso, que apresenta uma taxa média unitária de filtragem da ordem 2,2t/h/m², este número é utilizado para acompanhar a produtividade da planta, esses dados foram fornecidos pela empresa (Samarco, 2025). Esse tipo de filtragem é utilizado na planta industrial em operação na Samarco.

Além disso, é fundamental compreender a composição química e granulométrica do rejeito arenoso de minério de ferro, pois essas características influenciam diretamente em seu comportamento geotécnico, na eficiência da filtragem e na possibilidade de reaproveitamento em aplicações industriais ou ambientais (Gomes; Pereira; Peres, 2012). Segundo Araújo (2006), a composição química dos rejeitos pode variar conforme o tipo de minério explorado e os reagentes utilizados nas etapas de extração metais. Com base nisso, na Tabela 3.1 são apresentados os resultados de análises químicas de rejeitos obtidos por

diferentes pesquisadores que atuaram na região do Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 3. 1 - Composição química de amostras de rejeitos de minério de ferro provenientes do Quadrilátero Ferrífero

Compostos	Massa (% em peso)				
	Oliveira, 2006	Gomes, 2009	Guimarães, 2011	Guimarães, 2011	Andrade, 2014
SiO₂	27,61	62,7	6,36	24,06	44,47
Al₂O₃	7,09	0,61	7,23	6,41	5,49
CaO				5,79	
Fe₂O₃	42,03	24,97	52,46	43,83	49,49
SO₃					
Mn			0,216	1,552	
Outros	0,069	0,016	0,224	0,075	0,55
Perda ao fogo	3,91	0,94	9,37	3,61	3,61

Fonte: (Bezerra, 2017)

3.3.2 Lama

Nos próximos anos, é esperado que a extração de minérios apresente teores cada vez mais baixos, o que resultará em um aumento do volume de rejeitos gerados pela atividade mineradora, especialmente após o beneficiamento. O processo de beneficiamento envolve várias etapas e, no caso dos minérios itabiríticos, que possuem baixo teor de ferro, há uma considerável produção de rejeitos. Uma parte significativa desse material, composta por partículas muito finas – com mais de 75% do volume tendo menos de 10µm – é conhecida como lama e é descartada como rejeito antes da etapa de concentração. Essa lama, que resulta da cominuição e de uma sedimentação lenta, é separada na fase de deslamagem, um processo de classificação essencial que precede a flotação (Gomes, 2009; Mendes, 2009; Rezende Neto *et al.*, 2016; CETEM 2017).

Conforme citado por Figueiredo (2018), em geral, a lama de minério de ferro possui até 55% de Fe, o que corresponde de 10% a 20% do mineral a ser concentrado. No entanto, sua utilização comercial ainda não é viável, pois faltam tecnologias adequadas para seu processamento. Isso se deve principalmente às dificuldades de processamento relacionadas à granulometria e às características composicionais do material.

A caracterização química da lama de minério de ferro, proveniente da Mina do Pico (MG), revelou uma composição rica em ferro e com níveis consideráveis de impurezas. Os teores médios encontrados foram: ferro (Fe) com 49,07%, sílica (SiO_2) com 9,97%, fósforo (P) com 0,228%, alumina (Al_2O_3) com 9,22%, manganês (Mn) com 0,343%, titânio na forma de TiO_2 com 0,421%, cálcio (CaO) com 0,012% e magnésio (MgO) com 0,121%. Esses dados evidenciam o potencial de aproveitamento das lamas, uma vez que apresentam teores de ferro consideráveis (Santos; Rodrigues; Rubio, 2008).

3.4 Método de Disposição de Rejeitos

O International Commission on Large Dams (ICOLD) aponta que o aumento expressivo das estruturas de armazenamento de rejeitos e os acidentes com barragens têm gerado maior preocupação quanto aos métodos de disposição desses resíduos. Em resposta, a comunidade técnico-científica, juntamente com autoridades governamentais e organizações internacionais, tem se mobilizado para buscar alternativas que permitam o reaproveitamento desses resíduos e a redução dos impactos ambientais associados (Guedes; Schneider, 2018; Soares, 2010).

Conforme o IBRAM (2016), os rejeitos podem ser dispostos de diversas maneiras, como em minas subterrâneas, em cavas exauridas, em pilhas, por empilhamento a seco, por meio da disposição em pasta ou em barragens de rejeitos.

Uma alternativa para a disposição de rejeitos são as cavas a céu aberto como apresentado na Figura 3.3. Para mineradoras que já possuem uma cava esgotada e necessitam restaurar a área degradada, essa solução torna-se uma opção viável,

permitindo a continuidade das operações do empreendimento. A disposição de rejeitos em cavas oferece diversas vantagens, como: a facilidade na recuperação das áreas mineradas, a diminuição dos impactos ambientais e visuais, a redução de riscos e a menor necessidade de investimentos operacionais. No entanto, a principal desvantagem, em comparação com barragens do tipo montante, é o espaço limitado disponível para os rejeitos, já que uma parte significativa do volume é ocupado pela própria estrutura de contenção, devido ao grande desnível da cava (Portes, 2013; Nascimento, 2019).

Figura 3. 3 - Cava a céu aberto para disposição de lama - Mina Alegria Sul, Samarco, Mariana



Fonte: (Samarco, 2020)

Após eventos importantes na indústria de mineração, tornou-se necessário reavaliar a forma como os rejeitos são dispostos em barragens no Brasil. As repercussões dos acidentes com barragens ocorridos levaram a uma maior rigidez nas legislações de monitoramento, tornando mais difícil a obtenção de licenças para alteamento e a instalação de novas estruturas. Em resposta, várias empresas começaram a explorar alternativas mais seguras para o descarte de rejeitos. As soluções em análise incluem processos que envolvem etapas de desaguamento, utilizando espessadores, peneiras desaguadoras ou hidrociclones, seguidas de

filtragem. O material gerado é, então, disposto a seco em pilhas que apresentam maior estabilidade geotécnica, o que as torna mais seguras tanto em termos de processo quanto do ponto de vista ambiental (Braga, 2021), como mostrado na Figura 3.4.

Figura 3. 4 - Pilha de rejeito arenoso filtrado em operação na Samarco, Mariana



Fonte: Próprio Autor

3.5 Filtragem

Braga (2021) define filtragem como o processo de separação de uma ou mais fases distintas, utilizando diferenças físicas entre elas, como tamanho, densidade ou carga elétrica. Nesse processo, a polpa mineral é forçada a passar através de um meio poroso e permeável, seja por meio da aplicação de pressão ou pela ação do vácuo. Durante essa etapa, as partículas sólidas ficam retidas no meio, enquanto a fase líquida, que encontra menor resistência, passa pelos poros, resultando na separação. O material sólido retido, que apresenta baixa umidade residual, é conhecido como torta, enquanto o líquido que atravessa o meio é chamado de filtrado.

A filtragem pode ocorrer por meio da pressão hidrostática da suspensão sobre o meio filtrante, conhecida como filtragem por gravidade, ou por meio de uma força externa. Nesse último caso, existem várias opções (Braga, 2021):

- Filtragem a vácuo, que utiliza pressão negativa abaixo do meio filtrante;

- Filtragem sob pressão, que aplica pressão positiva sobre o meio filtrante;
- Filtragem centrífuga, que usa a centrifugação para forçar a passagem do líquido;
- Filtragem hiperbárica, que combina filtragem a vácuo em um vaso pressurizado;
- Filtragem capilar, que emprega meios cerâmicos porosos.

No processamento de minério de ferro, as tecnologias mais utilizadas para filtrar concentrados, rejeitos ou preparar materiais para etapas seguintes incluem filtros a vácuo convencionais, como mostrado na Figura 3.5, filtros tipo prensa e filtros cerâmicos (Braga, 2021).

Figura 3. 5 - Planta de filtragem de filtros a vácuo na Samarco, Mariana



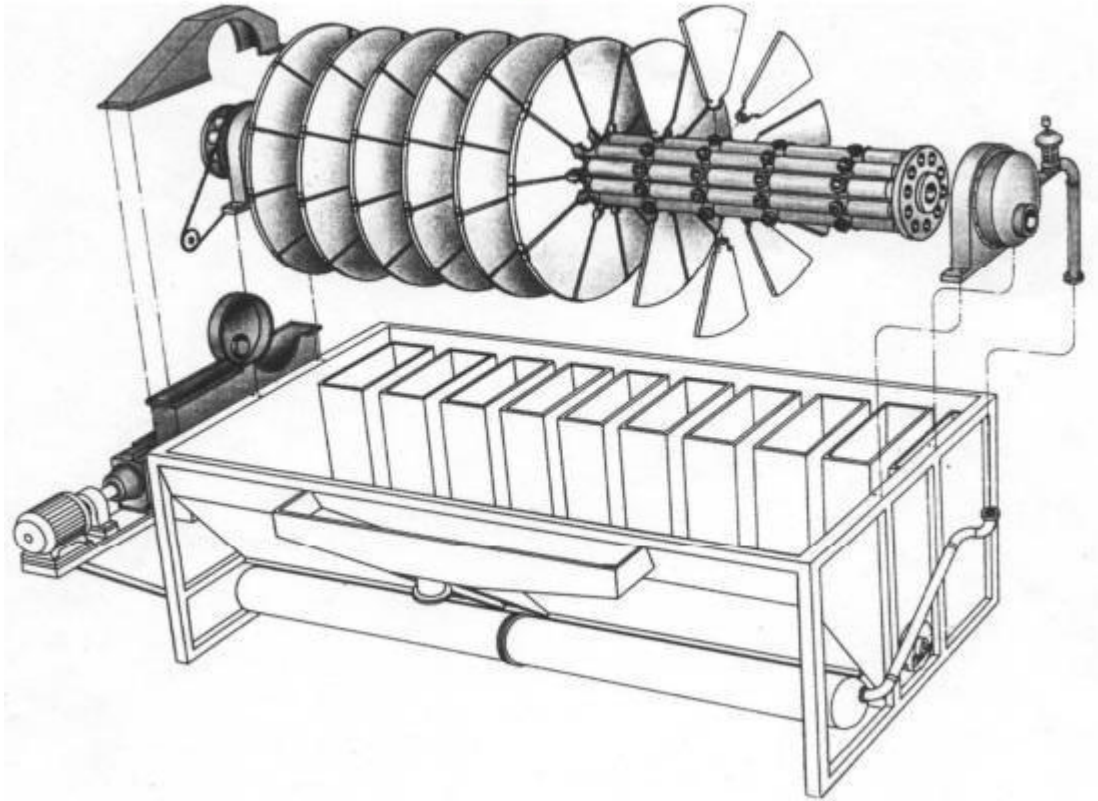
Fonte: (Samarco, 2020)

3.5.1 Filtro de disco a vácuo convencional

O filtro de disco a vácuo convencional é uma das tecnologias de filtragem mais empregadas nas indústrias de beneficiamento de minério de ferro em todo o mundo. Essa tecnologia oferece várias vantagens, como uma ampla área de filtragem em um único equipamento, facilidade de operação e versatilidade na manutenção. O projeto do equipamento consiste em vários discos dispostos em

paralelo em um eixo horizontal (Tarleton, 2015). A Figura 3.6 ilustra um arranjo do filtro de disco a vácuo.

Figura 3. 6 - Arranjo de filtro de disco a vácuo convencional

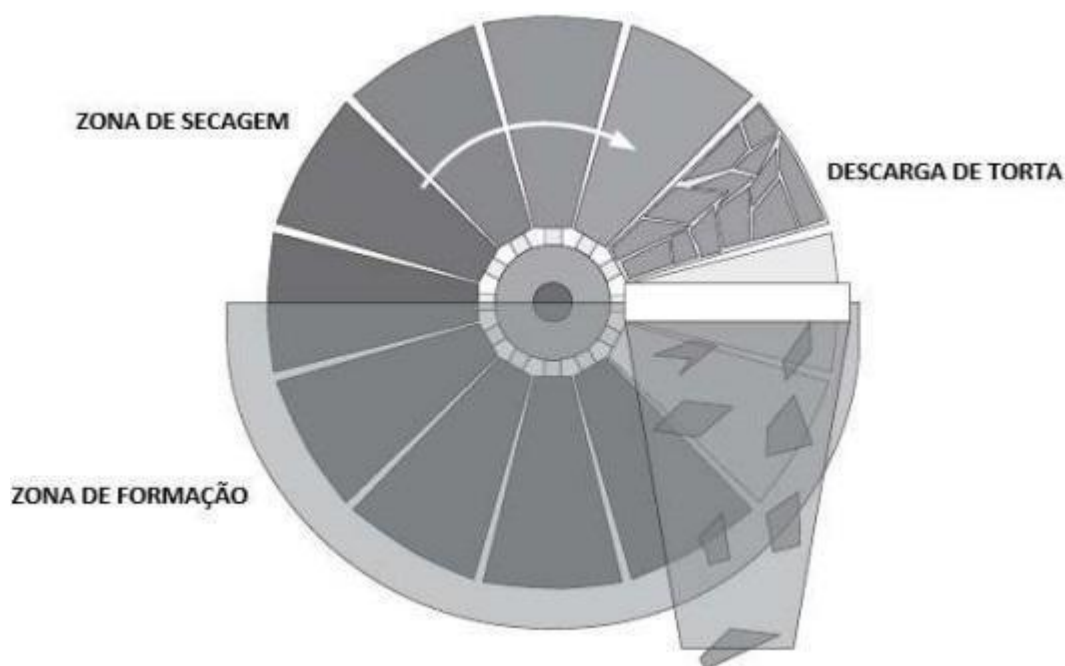


Fonte: (Braga, 2021)

De acordo com Guimarães, Valadão e Peres (2012), no sistema de filtro de disco a vácuo convencional a polpa é succionada através das telas, enquanto o sólido retido é descarregado de forma contínua. A operação é realizada por uma bomba de vácuo, determinando a formação de três zonas no percurso do processo, conforme ilustrado na Figura 3.7. O percurso do processo é o seguinte:

- Formação da torta: A polpa entra em contato com o meio poroso sob a ação do vácuo;
- Secagem: Sob a influência do vácuo, a água retida na estrutura da torta é aspirada;
- Descarga: Na etapa final, a torta formada é expurgada, o que pode ser feito de várias maneiras. Nos filtros de disco convencionais, o fluxo de ar é invertido e ocorre um sopro na tela, desprendendo a torta do meio filtrante.

Figura 3. 7 - Zonas do filtro de disco a vácuo convencional



Fonte: (Braga, 2021)

Conforme Chaves (2013), quando a operação envolve partículas muito finas, como é o caso da lama, a filtragem pode se tornar desafiadora, levando à obstrução do meio filtrante. Por essa razão, essa tecnologia é mais adequada para o desaguamento de rejeitos arenosos, que apresentam uma granulometria maior. O meio filtrante é frequentemente composto por tecido ou nylon, e a escolha do material dependerá das características do material a ser filtrado. O ideal é optar por um material que tenha boa permeabilidade e que seja durável e efetivo na retenção das partículas sólidas (Guimarães; Valadão; Peres, 2012).

3.6 Análise Mineralógica via sistema MEV – EDS

Os primeiros sistemas automatizados de caracterização mineralógica começaram a ser desenvolvidos nas décadas de 1970 e 1980, com destaque para centros de pesquisa como o Imperial College (Reino Unido), o CANMET (Canadá) e a CSIRO (Austrália). No entanto, foi em 1996 que o Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), na Austrália, desenvolveu o Mineral Liberation Analyser (MLA), uma ferramenta que revolucionou a caracterização mineralógica

automatizada, integrando imagens de elétrons retroespalhados e espectroscopia de raios X. Essa técnica tem sido amplamente aplicada por indústrias minerais, instituições de pesquisa e órgãos reguladores em todo o mundo (Gu, 2003; Burrows; Gu, 2006).

De acordo com Sampaio (2016), além das técnicas tradicionais de análise mineralógica, os sistemas automatizados integrados de análise mineral por microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram desenvolvidos especificamente para a indústria de mineração, permitindo a realização de análises mineralógicas quantitativas rápidas de rochas, minérios, concentrados, rejeitos, resíduos de lixiviação e produtos de fundição. Esses sistemas consistem em um *software* de controle de varredura e análise de dados minerais, além de um *hardware* SEM/FEG-EDS integrado. A identificação da fase mineral é realizada no software de controle, por meio da comparação das intensidades dos picos dos elementos químicos do espectro obtido com os dados computados no programa, possibilitando a construção pontual de uma imagem da partícula em questão. Esse sistema é mais sofisticado e nem sempre disponível.

Entretanto, conforme Faria (2025), uma análise qualitativa mais simplificada pode ser obtida via microscopia eletrônica de varredura. O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento bastante versátil, amplamente utilizado na análise microestrutural de materiais sólidos. Embora o processo de formação da imagem envolva mecanismos complexos, as imagens geradas são de fácil interpretação.

Na análise de partículas minerais, a microscopia eletrônica de varredura (MEV), associada à técnica de EDS tem como objetivo principal de visualizar e investigar a morfologia e o tamanho das partículas da lama de rejeito de minério de ferro. A técnica de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) fornece informações da composição química de pontos específicos da amostra, ou seja, identificar quais elementos químicos encontram-se presentes em pontos determinados da amostra (Faria, 2025; Bezerra, 2017).

O espectrômetro EDS funciona com base no princípio de que a energia de um fóton (E) está relacionada à frequência da radiação eletromagnética (ν), de acordo

com a equação $E = h\nu$, sendo h a constante de Planck. Fótons com diferentes energias, abrangendo todo o espectro de raios X, atingem quase simultaneamente o detector do EDS. Cada grupo de fótons é então convertido em um sinal elétrico, cuja voltagem depende da energia dos fótons incidentes. Ao final, os dados coletados são processados para gerar um gráfico que relaciona a intensidade à energia dos fótons. Os picos presentes nesse espectro correspondem diretamente aos elementos químicos presentes na amostra analisada (Faria, 2025).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O rejeito arenoso e a lama utilizados neste trabalho são originárias do rejeito da flotação, sendo: o rejeito arenoso, o rejeito arenoso com uma proporção de lama adicionada e a lama proveniente da deslamagem. Todos os materiais foram fornecidos pela Samarco Mineração S.A. e aqui classificados em 3 classes:

- 1) Rejeito arenoso natural;
- 2) Rejeito arenoso com 6% de lama, identificado como Rejeito 94/6;
- 3) Lama – identificada como Lama 2.

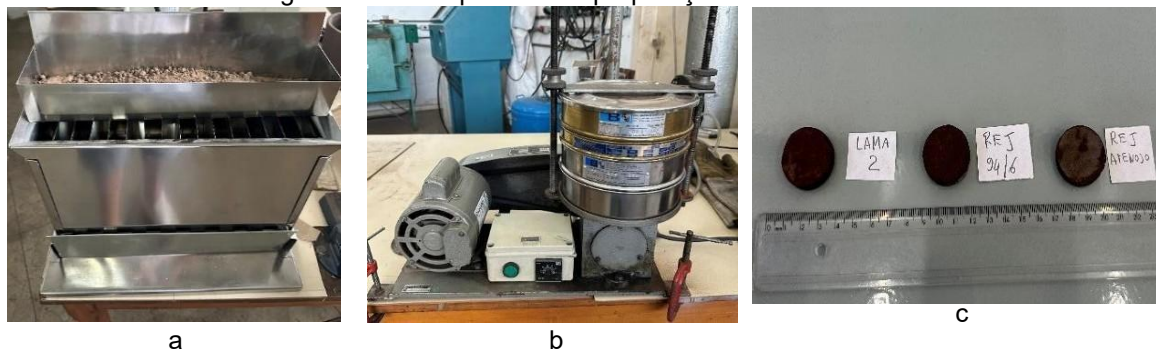
4.1 Preparação das Amostras

Conforme mencionado, para a análise e caracterização dos materiais, foram preparadas amostras a partir do rejeito arenoso e da lama. Os materiais foram quarteados, homogeneizados e peneirados a seco na sequência de peneiras de malha 100#, 200# e 325# para, posteriormente, serem confeccionadas as amostras na forma de pastilhas para análise. As pastilhas foram produzidas embutindo o material passante na peneira de 325# em resina epóxi.

Após a confecção das pastilhas foi realizada a preparação da superfície, seguindo o padrão de preparação de amostras para metalografia, com o lixamento em lixa d'água até 1200#.

As pastilhas, assim preparadas, foram submetidas às análises por difratometria de raios X e fluorescência de raios X. Após essas análises, as pastilhas foram, então, revestidas com uma fina camada de ouro para garantir a condução elétrica para análise via MEV/EDS. Na Figura 4.1 apresenta-se o quarteador (Figura 4.1a), o sistema de peneiramento (Figura 4.1b), utilizados na preparação dos materiais, e as pastilhas confeccionadas (Figura 4.1c).

Figura 4. 1 - Sequência de preparação das amostras



Fonte: Próprio autor

4.2 Fluorescência de Raios X e Difratometria de Raios X

A caracterização química qualitativa das amostras foi conduzida utilizando a técnica de fluorescência de raios X (FRX), empregando o equipamento EDX-720, marca Shimadzu, apresentado na Figura 4.2, do NanoLab REDEMAT/UFOP, localizado no prédio dos Laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Figura 4. 2 - Equipamento de fluorescência de raios X

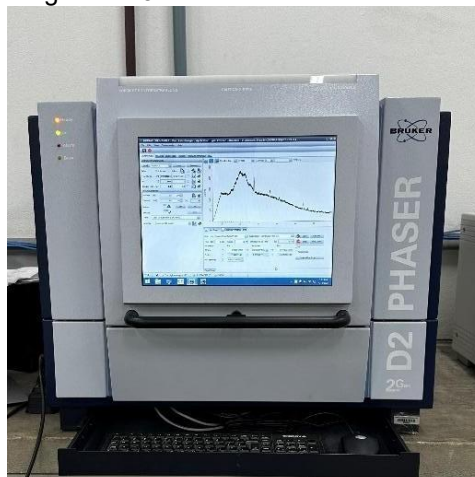


Fonte: Próprio autor

Já a identificação dos minerais presentes foi feita por meio de difração de raios X (DRX), adotando o método do pó total. O difratômetro de raios X Bruker D2PHASER, com radiação $\text{CuK}\alpha$, foi utilizado para realizar a varredura na faixa de 2θ entre 6° e 80° . O tubo de raios X operou sob condições de 30kV e 10mA em temperatura ambiente. Os difratogramas foram processados no programa X' Pert

HighScore Plus. O equipamento do NanoLab REDEMAT/UFOP, localizado no prédio dos Laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), é apresentado na Figura 4.3.

Figura 4. 3 - Difratorômetro de raios X



Fonte: Próprio autor

4.3 Caracterização Morfológica via MEV/EDS

As análises para uma avaliação qualitativa da morfologia e composição química das pastilhas foram obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Foram realizadas imagens das amostras em diferentes áreas para se ter uma maior representatividade dos resultados.

As patilhas (Figura 4.4), revestidas com uma fina camada de ouro para assegurar a condução elétrica, foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura VEGA III – Tescan, com sistema EDS acoplado, do NanoLab REDEMAT/UFOP, localizado no prédio dos Laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), conforme apresentado na Figura 4.5.

A técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), baseada em microscopia eletrônica de varredura, foi utilizada para avaliar a distribuição de elementos químicos e determinação semiquantitativa do teor desses elementos nas amostras em estudo. O microscópio eletrônico de varredura utilizado

para as análises consistiu em um MEV Tescan Vega3 LMH, com resolução de 3,0NM. Esse MEV é equipado com um detector de elétrons retroespalhados bem como de elétrons secundários, além de detectores acessórios de EDS e EBSD. Para as análises de EDS foi utilizado um detector XAct - Oxford Instruments, equipado com uma janela de 10mm². A coleta automatizada de dados, bem como o processamento desses, foi realizada utilizando o procedimento operacional para mapas de Raios X no programa Aztec - Oxford Instruments. As principais configurações do MEV e do EDS para análises foram: voltagem de 20kV, distância de trabalho de 15mm entre a peça polar do microscópio e a superfície de interação do feixe-amostra, *dead time* 6.

Figura 4. 4 - Amostras preparadas para análise MEV/EDS



Fonte: Próprio autor

Figura 4. 5 - Microscópio Eletrônico de Varredura com sistema EDS acoplado



Fonte: Próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo reúne os resultados obtidos nos experimentos conduzidos neste estudo para as amostras de Lama 2, Rejeito 94/6 e Rejeito Arenoso, quais sejam: Distribuição granulométrica, análise por fluorescência de raios X, análise por difratometria de raios X e análise microscopia eletrônica de varredura, buscando estabelecer correlações com informações disponíveis na literatura.

5.1 Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica realizada no Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola de Minas e o resultado é apresentado na Tabela 5.1. Verificou-se uma quantidade grande de retido da lama na sequência de peneiras o que não era esperado, mas isso pode ter sido ocasionado pela baixa eficiência do peneiramento a seco de partículas ultrafinas, como é o caso da lama, devido ao fator de agregação promovido pela umidade ainda presente na amostra.

Tabela 5. 1 – Distribuição granulométrica das amostras

Amostras	Massa Alimentada (g)	Perdas (g)	Malha (Tyler)	Abertura (µm)	Retido (g)
Lama 2	385,51	1,88	#100	149	266,93
			#200	74	59,10
			#325	44	48,09
			Passante	-	9,51
Rejeito 94/6	371,68	2,32	#100	149	24,10
			#200	74	137,43
			#325	44	162,21
			Passante	-	45,62
Rejeito Arenoso	260,47	1,31	#100	149	23,01
			#200	74	110,07
			#325	44	83,79
			Passante	-	42,29

Fonte: Próprio autor

5.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

Na análise por fluorescência de raios X foram identificadas as composições dos elementos presentes nas amostras. Os resultados semiquantitativos apresentados na Tabela 5.2, na forma de óxidos, mostram que a Lama 2 apresenta alto teor de Fe_2O_3 (acima de 83%), confirmando sua origem rica em ferro, em conformidade com os valores encontrados na literatura citados por Santos, Rodrigues e Rubio (2008) e Tavares (2012).

O Rejeito Arenoso tem baixo teor de ferro (23,94%) e alta concentração de SiO_2 (75,79%), característica comum em rejeitos arenosos do Quadrilátero Ferrífero, conforme resultados apresentados na Tabela 3.1. A amostra 94/6 apresenta composição intermediária, com cerca de 54% de Fe_2O_3 e 45% de SiO_2 , indicando a mistura dos materiais rejeito arenoso e lama.

Elementos-traço como CuO , SrO , ZrO_2 e SeO_2 aparecem em baixos teores, mas podem refletir variações mineralógicas.

Tabela 5. 2 - Resultado da análise por fluorescência de raios X

Composição Química das Amostras (% em peso)												
Amostra	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MnO	CaO	CuO	SrO	ZrO_2	SO_3	GeO_2	SeO_2	ZnO
Lama 2	83,43	11,65	4,604	0,271	0,015	0,014	0,6	0,6	-	-	-	-
Rejeito 94/6	54,38	45,33	-	0,101	0,125	0,022	-	-	0,044	-	-	-
Rejeito Arenoso	23,94	75,79	-	0,033	0,115	-	-	0,8	0,067	0,02	0,014	0,012

Fonte: Próprio autor

5.3 Difractometria de Raios X (DRX)

Nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 são apresentados os difratogramas de raios X dos três materiais analisados, ou seja, Lama2, Rejeito 94/6 e Rejeito Arenoso. Na análise por difratometria de raios X, verificou-se a presença de quartzo, goethita e hematita e, para a Lama2 e o Rejeito Arenoso, também a presença de silicatos de alumínio na forma de caulinita. Esses resultados estão de acordo com os trabalhos

de Wolff (2009) e Silva (2016) que analisaram rejeitos de minério de ferro. Outras fases minoritárias podem estar presentes, mas estão fora dos limites de detecção por DRX.

Os resultados reforçam que, embora todos sejam classificados como rejeitos de minério de ferro, os diferentes processos de beneficiamento exercem influência direta sobre suas propriedades, evidenciando as diferenças entre esses materiais, conforme observado também por Martinatto *et al.* (2024). De modo geral, o material que sai pela parte superior do hidrociclone (*overflow*) apresenta granulometria fina, constituindo os rejeitos finos e ultrafinos, denominados neste estudo como Lama 2. A amostra denominada Rejeito Arenoso corresponde ao rejeito granular filtrado, proveniente de etapas finais do beneficiamento do minério de ferro. Já a amostra Rejeito 94/6 refere-se ao mesmo rejeito granular, porém incorporado à fração de lama, resultando em características distintas em relação aos demais.

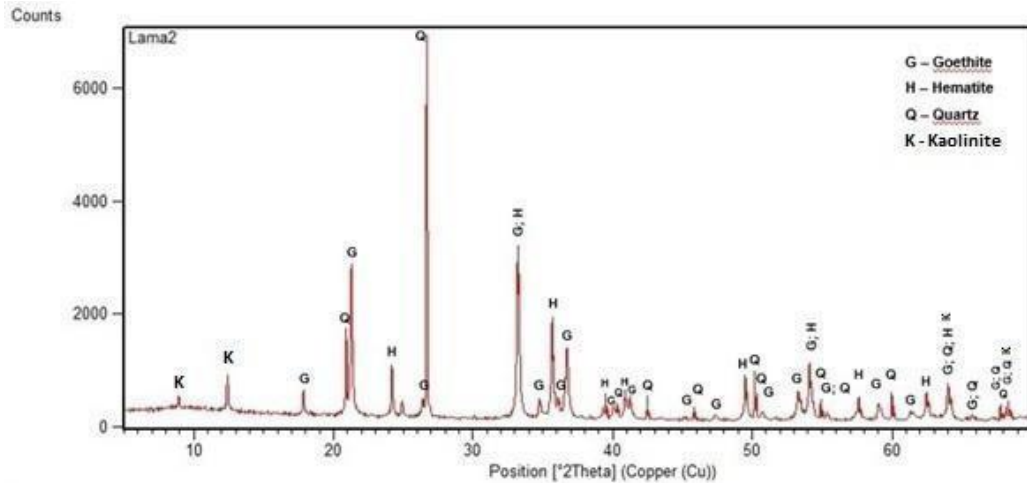
Esses resultados foram confirmados pelas análises de FRX e estão em concordância com a literatura (Duarte, 2019, Pereira, 2024, Silva, 2016), uma vez que os picos de hematita estão relacionados ao óxido de ferro, a caulinita ao óxido de alumínio e o quartzo ao óxido de silício (Martinatto *et al.*, 2024).

No caso da Lama 2, observa-se picos caracterizando a presença maciça dos minerais como goethita e hematita, típicos do resíduo mais fino proveniente do beneficiamento de minérios itabiríticos. Essa análise é corroborada pelo resultado da análise química, determinada por fluorescência de raios X e apresentada na Tabela 5.2, com 84,43% de Fe_2O_3 . Essa alta concentração de Fe_2O_3 pode viabilizar o processo de recuperação do ferro por separação magnética de alta intensidade como apresentado por Vieira e Ramos Neto (2008), criando um novo produto (pellet feed concentrado) de considerável valor econômico citado por Wolff (2009).

Para o Rejeito 94/6 a presença de alto teor de ferro, na forma de Fe_2O_3 (53,38% Tabela 5.2), é devido à adição de parte da lama (6%) que apresenta alto teor de ferro que se concentra na porção mais fina do material.

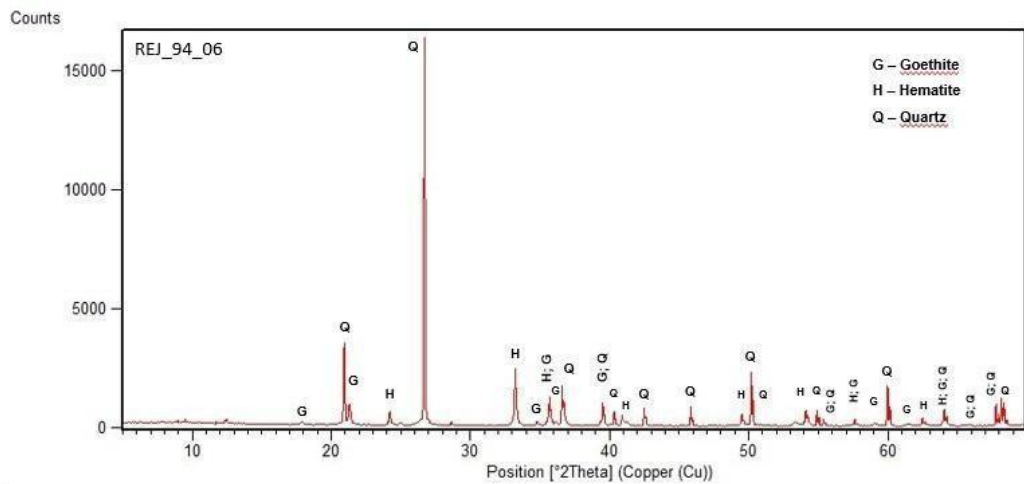
O Rejeito Arenoso tem-se a presença majoritária do quartzo, na forma de SiO_2 , com menor incidência dos minerais goethita e hematita.

Figura 5. 1 - Difratoograma da amostra de Lama 2



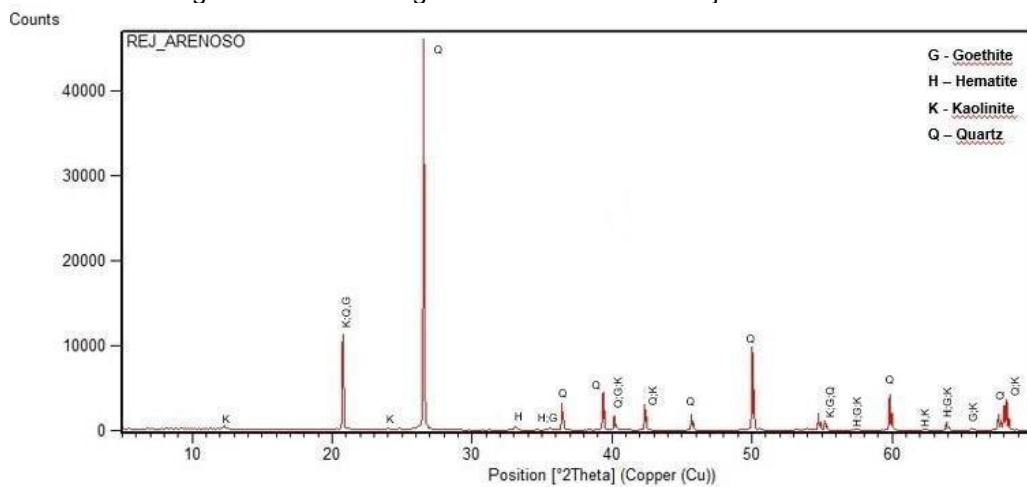
Fonte: Próprio autor

Figura 5. 2 - Difratoograma da amostra de Rejeito 94/6



Fonte: Próprio autor

Figura 5. 3 - Difratoograma da amostra de Rejeito Arenoso



Fonte: Próprio autor

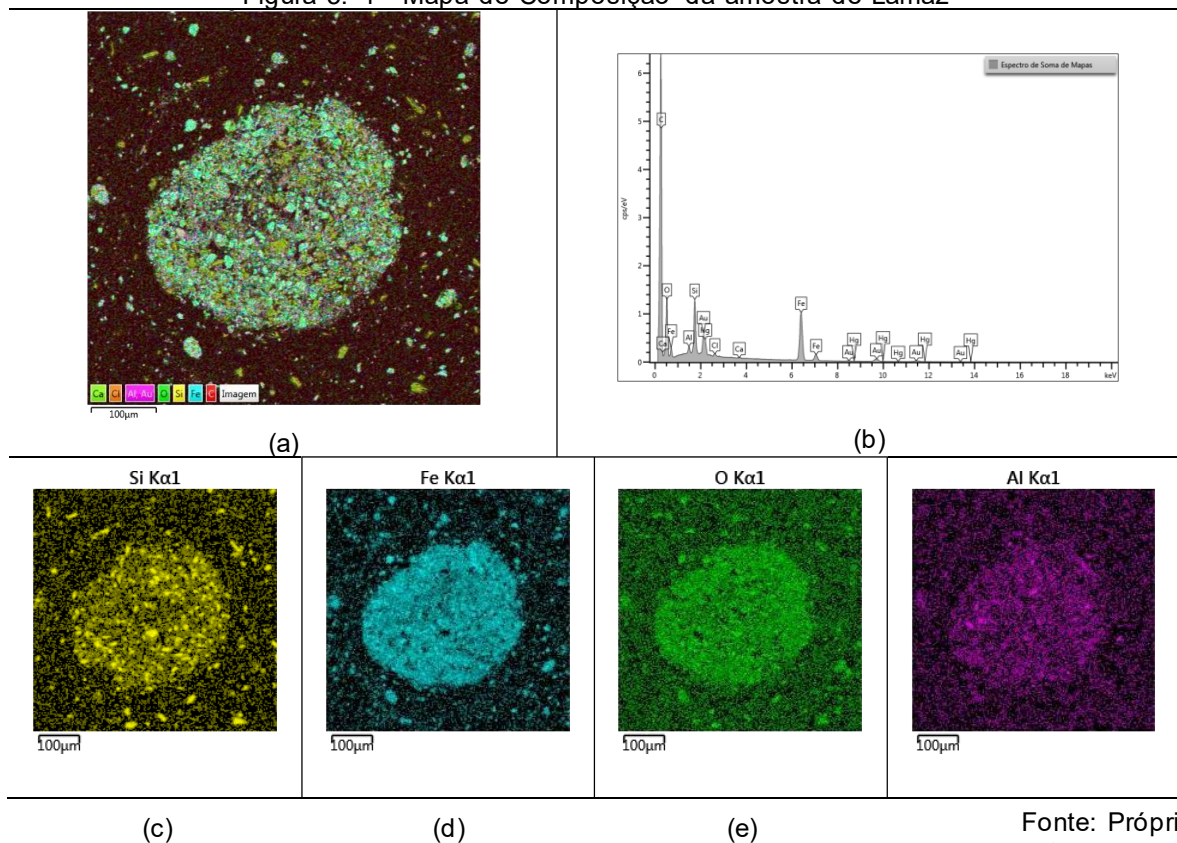
5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) – Sistema EDS

Na análise por microscopia eletrônica de varredura, foram executados os mapas de composição das amostras. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os resultados relativos às amostras de Lama 2, Rejeito 94/6 e Rejeito Arenoso, respectivamente. Verifica-se que há um alto grau de liberação das partículas caracterizando um material final do processamento do minério itabirítico. Os picos referentes ao ouro são consequência da metalização das amostras.

Na análise da amostra de Lama 2, Figura 5.4, pode-se observar a presença de maior quantidade de partículas de Fe_2O_3 , como destacado na Figura 5.4d.

Tanto no Rejeito 94/6 quanto no Rejeito Arenoso, Figuras 5.5 e 5.6, verificou-se a predominância de partículas de quartzo com grãos bem limpos, sendo que no Rejeito Arenoso essas partículas apresentam tamanho ligeiramente superior com relação ao Rejeito 94/6. O fato desses materiais apresentarem grãos limpos pode facilitar seus usos, por exemplo em materiais cerâmicos (Silva, 2016) ou como areia de fundição (Figueiredo, 2017), necessitando apenas de uma classificação granulométrica mais adequada para a eliminação de partículas ultrafinas.

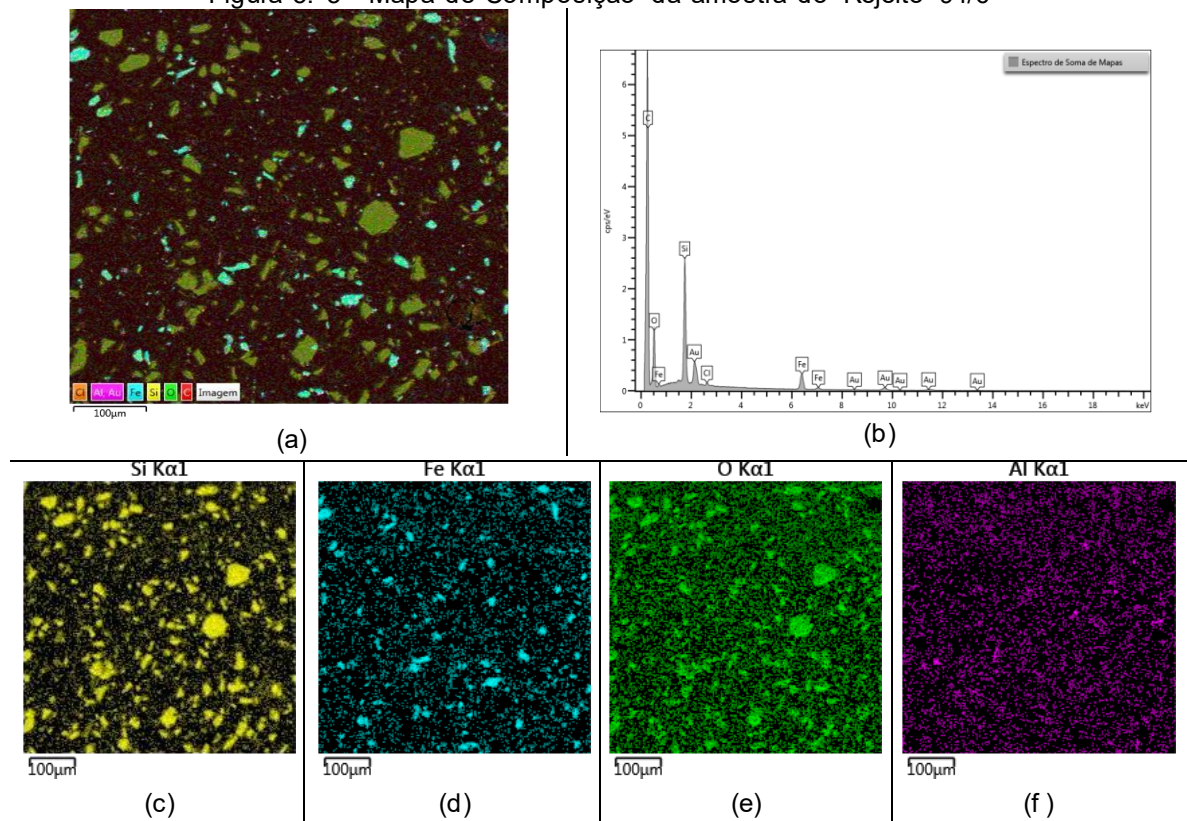
Figura 5. 4 - Mapa de Composição da amostra de Lama2



Fonte: Próprio autor

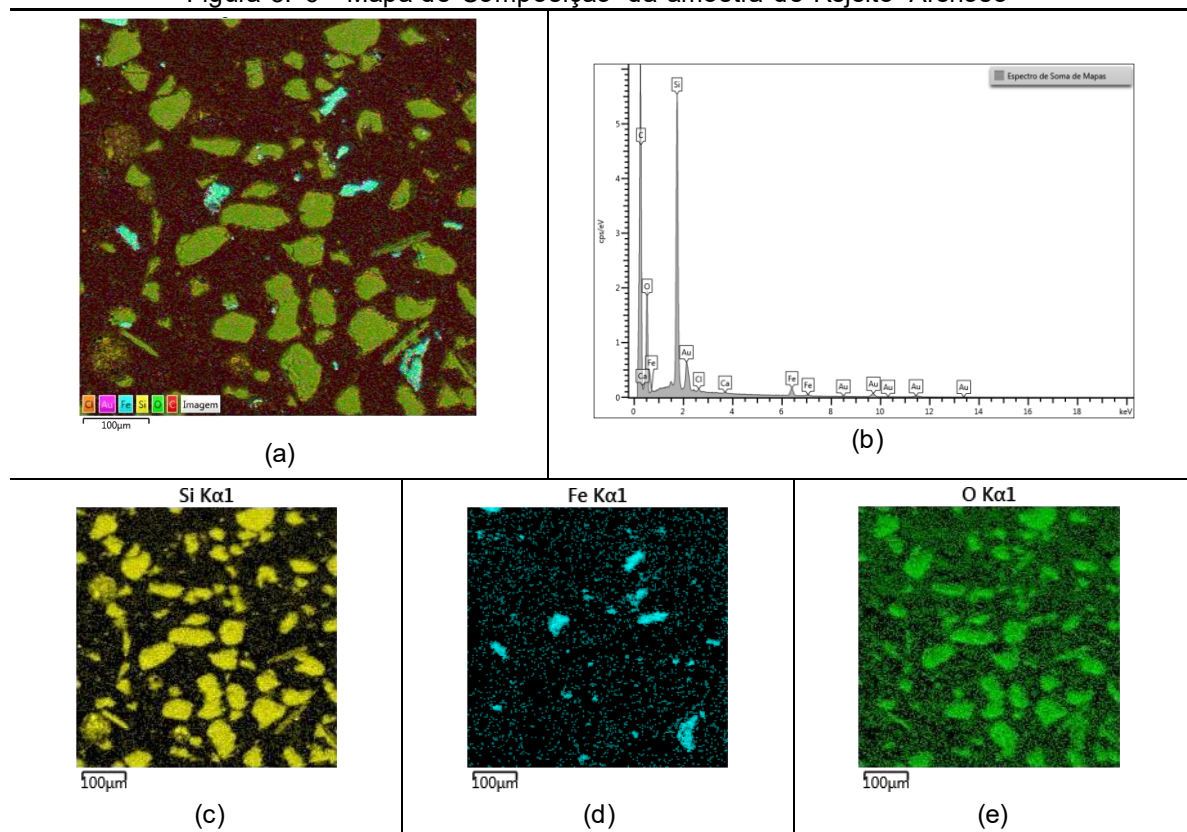
(f)

Figura 5. 5 - Mapa de Composição da amostra do Rejeito 94/6



Fonte: Próprio autor

Figura 5. 6 - Mapa de Composição da amostra de Rejeito Arenoso



Fonte: Próprio autor

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, caracterizou-se o rejeito de flotação processado pela filtragem convencional a vácuo e a lama proveniente da etapa de deslamagem do processo de beneficiamento da Samarco S.A.

A partir da caracterização das amostras, os resultados de distribuição granulométrica evidenciaram um comportamento não esperado entre as frações estudadas, destacando-se a elevada retenção de material fino na amostra Lama 2, fenômeno relacionado à agregação de partículas ultrafinas em função da umidade residual, o que compromete a eficiência do peneiramento a seco.

A análise por fluorescência de raios X demonstrou que a Lama 2 possui elevado teor de Fe_2O_3 (superior a 83%), confirmando sua origem rica em ferro. Em contrapartida, o Rejeito Arenoso apresentou predominância de SiO_2 , característica típica de rejeitos granulados do Quadrilátero Ferrífero. A amostra Rejeito 94/6 exibiu composição intermediária, evidenciando a mistura entre a lama e o rejeito arenoso.

Os resultados da difração de raios X confirmam que as amostras possuem mineralogias distintas, influenciadas diretamente pelas etapas do beneficiamento. A Lama 2 apresenta predominância de Fe_2O_3 com 84,43%. O Rejeito Arenoso, por sua vez, é majoritariamente composto por quartzo, típico das frações mais grossas filtradas nas etapas finais do processo. Já o Rejeito 94/6 apresenta composição intermediária, resultado da mistura entre lama e rejeito arenoso.

A análise realizada por MEV-EDS no Lama 2, como destacado no mapa de composição, evidencia a presença de partículas finas de ferro. Já no Rejeito Arenoso, verificou-se a predominância de partículas de quartzo com grãos bem limpos. No Rejeito Arenoso essas partículas apresentam tamanho ligeiramente superior com relação ao Rejeito 94/6.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os materiais avaliados, tradicionalmente classificados apenas como rejeitos, apresentam potencial de reaproveitamento tecnológico, seja por meio da recuperação de ferro nas frações finas, seja pela inserção das frações arenosas em cadeias produtivas industriais.

Assim, este estudo evidencia a relevância de abordagens de caracterização detalhada como etapa fundamental para a promoção de práticas de mineração mais sustentável, alinhadas aos princípios de economia circular e redução de passivos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIANSYAH, J. S.; ROSANO, M.; VINK, S.; KEIR, G. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1050–1062, 2015.

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2020.

ANDRADE, L. C. R. D. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 2014.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

ASSIS, D. M.; QUEIROGA, F. O. C. S.; MENDES, J. C. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na fabricação de tijolos maciços. **Agora - A revista científica da FASAR**, v. 3, n. 1, p. 191-200, 2018.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

BOCCAMINO, G. D. **Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro – estudo de caso para os rejeitos gerados na ITM-I da Mina do Pico**. 2017. 110f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2017.

BRAGA, F. Y. A. **Utilização de tecnologias de filtragem de rejeitos para empilhamento a seco**. 2021. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2021.

BURROWS, D.; GU, Y. JKMRC Mineral Liberation Analyzer – a modern tool for ore characterization and plant optimization. In: METALLURGICAL PLANT DESIGN AND OPERATING STRATEGIES (MetPlant 2006), 2006, Perth, Western Australia. **Proceedings [...]** Carlton, Victoria: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2006. p. 125–139.

CARMO RESENDE, A. J. **Influência da perda por calcinação na sedimentação de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A.** 2009. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2009.

CARVALHO, P.S.L.; SILVA, M.M.; ROCIO, M.A.R.; MOSZKOWICZ, J. **Minério de Ferro**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, n. 39, p. 197-234, 2014. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4802/1/BS%2039%20min%c3%a9rio%20de%20ferro_P.pdf. Acesso em: 23 set. 2014

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. **Notícias**. Disponível em: www.cetem.gov.br/noticias/cetem-desenvolve-processo-para-agregar-valor-as-lamas-de-minerios-de-ferro, 2017. Acesso em: 23 set. 2024.

CHAVES, A. P. **A Flotação no Brasil**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 212p.

DAVIES, M. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. In: PROCEEDINGS TAILINGS AND MINE WASTE, 2011, Vancouver. **Proceedings [...]**. Vancouver, 2011. 9 p.

DUARTE, A. H. FERRO – Um elemento químico estratégico que permeia História, Economia e Sociedade. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1146-1153, 2019.

DUTRA, R. Beneficiamento de minerais industriais. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS. 4. 2008, Ponta Grossa. **Anais [...]** Ponta Grossa, 2008.

ESPÓSITO, T. D. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 2000.

FARIA, G. L. Notas de aulas da disciplina MET155 – Técnicas de Análise. Curso de Engenharia Metalúrgica. Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto, MG, 2025.

FIGUEIREDO, R. A. M. **Caracterização de areias silicosas e de rejeitos de mineração para uso em processo de fundição**. 2017. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2017.

FIGUEIREDO, V. C. **Estudo da adição de lama de minério de ferro no processo de pelotização**. 2018. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2018.

FITTON, T.G.; ROSHDIEH A. Filtered tailings versus thickened slurry: four case studies. In: PASTE, 2013, Belo Horizonte. **Proceedings [...]** Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 275 – 288.

FREIRE, C. B. **Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravados**. 2012. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2012.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) -

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeitos de minério de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 65, n. 1, p. 109–115, jan./mar. 2012.

GU, Y. Automated scanning electron microscopy based mineral liberation analysis: an introduction to JKMRC/FEI Mineral Liberation Analyzer. **Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering**, v. 2, n. 1, p. 33–41, 2003.

GUEDES, G. B., SCHNEIDER, C. L. **Disposição de rejeitos de mineração: as opções tecnológicas para a redução dos riscos em barragens**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTIC, 2018. 26p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2229/1/SED-95.pdf>. Acesso em: 23 set. 2024.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 4, p. 543-548, 2012.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2011.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016. 128p. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 23 set. 2024.

LOVÓN-CANCHUMANI, G. A.; LIMA, F. M. R. S.; OLIVEIRA, P. P. **Avaliação do Ciclo de Vida na Mineração: Estudos da produção de minério de ferro**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015, p. 80. Disponível em:

<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1923/1/sed-89.pdf>. Acesso em:
Acesso em: 23 set. 2024.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965p.

MARTINATTO, C. S.; MEDINA, G. S.; FARENZENA, H. P.; SOUSA ROCHA, M. M.; CONSOLI, N. C. Caracterização física, química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2024, Balneário Camboriú. **Anais [...]**. Balneário Camboriú: ABMS, 2024.

MENDES, J. J. **Influência da adição de lama fina de aciaria a oxigênio nas características físicas e microestruturais de pelotas queimadas de minério de ferro**. 2009. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.

NASCIMENTO, T. **Disposição de rejeito de minério de ferro a seco utilizando tecnologia de filtragem**. 2019. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Faculdade Adjetivo CETEP, Mariana, MG, Brasil, 2019.

OLIVEIRA, M. L. M. de; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e filtragem**. Ministério da Educação - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2004. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/webby/up/596/o/apostila_ufop.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

OLIVEIRA, P. S. **Rotas para recuperação de ferro fino contido no *underflow* do espessador de lama da Usina de Conceição**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2006.

PEREIRA, L. M. M. **Estudo de propriedades geotécnicas de um rejeito de minério de ferro filtrado compactado para empilhamento a seco**. 2024. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2024.

PINTO, F. S. **Caracterização de rejeito arenoso beneficiado por Mineralogia Quantitativa Eletrônica - Sistema TIMA**. 2021. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2021.

PORMIN. Portal de apoio ao pequeno produtor mineral. **Disposição do Resíduo**, 2008. Disponível em: http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/disposicao_do_residuo.pdf. Acesso em: 23 set. 2024.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 180f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transporte) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013.

REZENDE NETO, M. C.; OLIVEIRA, M. F. M.; FERREIRA, K. C.; VALADÃO, G. E. S. Características de pastas minerais obtidas a partir do espessamento de lamas. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM. São Paulo, v. 13, n.3, p. 260-264, 2016.

ROBINSKY, E.I. **Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry**. Quebecor Printpak, Ontario, Canada. 1999. 209 p.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE Jr., F.; GUIMARÃES, M. L. V. Um Modelo Para a Evolução Microestrutural dos Minérios de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Parte I - Estruturas e Recristalização. **Revista Geonomos**. v. 1. p. 64-84, fev. 1993.

SAMARCO S. A. **Aproveitamento de rejeitos**. 2020. Disponível em: <https://www.samarco.com/aproveitamento-de-rejeitos>. Acesso em: 22 set. 2024.

SAMARCO. **Informação interna sobre a Taxa Unitária de Filtragem**, 2025.

SAMPAIO, N. P. **Construção de Banco de Dados de Minerais Brasileiros para Analisador Mineral Integrado, acoplado a um Sistema MEV-EDS Automatizado**. 2016. 286f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2016.

SANTOS, E. P.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. Caracterização e tratamento de lamas de minério de ferro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23., 2008, Porto Alegre - RS. **Anais [...]** 2008.

SILVA, F. M. F. **Quantificação de éter-aminas em rejeitos da flotação de minério de ferro em função da granulometria**. 2009. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.

SILVA, V. C. **Caracterização química e mineralógica de rejeito de minério de ferro proveniente do rompimento da barragem do Fundão em Mariana – MG**. 2016. 65p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitarista) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2016.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2010. cap 19. p. 831-888.

SOUZA, J. V. S.; GUEDES, J. S. M. **O rejeito de minério de ferro e suas aplicações na construção civil**. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, XV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL E III FÓRUM LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE, num. 2, 2017. **Anais eletrônicos [...]** Belo Horizonte: 2017. p. 14.

TARLETON, S. **Progress in Filtration and Separation**. 5 ed. Waltham: Elsevier, 2015. 698 p.

TAVARES, P. H. C. P. **Obtenção de pigmentos de óxido de ferro a partir da lama gerada no beneficiamento de itabirito**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2012.

VIEIRA, J. E.; RAMOS NETO, A. N. Recuperation of ultra-fine iron ore from tailing ponds as an economically and technically feasible and environmentally correct alternative method. In: 38º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 9º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro, São Luís – MA. **Anais [...]**, ABM, 2008. p. 408-415.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 2009. 90f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.