INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS VÍTREOS

BEATRIZ AMARAL BATALHA

Foz do Iguaçu
2025

INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)

ENGENHARIA DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS VÍTREOS

BEATRIZ AMARAL BATALHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Renato Siqueira

Foz do Iguaçu
2025

BEATRIZ AMARAL BATALHA

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS VÍTREOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

_____

Orientador: Prof. Dr. Renato Siqueira
UNILA

_____

Prof. Dr. Loic Barbara Rodier
UNILA

_____

Prof. Dra. Nora Díaz Mora
UNIOESTE

Foz do Iguaçu, 16 de fevereiro de 2025

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): Beatriz Amaral Batalha

Curso: Engenharia de Materiais

	Tipo de Documento
(**X**) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(**X**) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: Avaliação do potencial do rejeito de minério de ferro na produção de materiais vítreos.

Nome do orientador(a): Renato Siqueira

Data da Defesa: 29/11/2022

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons* **Licença 3.0 Unported.**

Foz do Iguaçu, _____ de _____ de _____.

_____

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho à minha família que, desde pequena, me ensinou a importância do conhecimento e ao meu afilhado, Vince.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Renato Siqueira pelo apoio e financiamento deste estudo.

Agradeço a Profa. Nora Díaz Mora por permitir a utilização dos laboratórios da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) para a execução da parte experimental deste estudo.

Agradeço ao Laboratório Multiusuário Engenheira Enedina Alves Marques (LEAM) do Parque Tecnológico Itaipu (PTI) pela realização dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia infravermelho.

Agradeço ao Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas (LICF) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pela realização dos ensaios de difração de raios X.

Agradeço ao Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) pela utilização da estufa, balança e realização de alguns ensaios de termogravimetria.

Agradeço aos alunos da UNIOESTE pertencentes ao Grupo Cataratas de Eficiência Energética (GCEE) pela contribuição dada no laboratório de fornos.

Agradeço aos amigos que fiz na Universidade por toda a alegria proporcionada nesses anos.

Agradeço a minha irmã por sempre me apoiar durante toda essa jornada.

Por último e, jamais menos importante, agradeço aos meus pais por serem os meus pilares e os exemplos de seres humanos que pretendo ser um dia.

BATALHA, BEATRIZ AMARAL. **Avaliação do potencial do rejeito de minério de ferro na produção de materiais vítreos**. 2022. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2024.

RESUMO

Resíduos sólidos gerados nas operações de mineração constituem um problema sério para as empresas do setor, uma vez que, estes precisam ser tratados e descartados de forma consciente, a fim de minimizar o impacto ambiental ocasionado por tais atividades, gerando custos adicionais as mineradoras, além de exigir grandes áreas para sua estocagem. Assim, encontrar métodos de aproveitamento de rejeitos produzidos durante as atividades de extração mineral têm sido uma questão essencial para as companhias, pois implica em conciliar o desenvolvimento econômico à preservação ambiental e à responsabilidade social. Em se tratando de rejeito de minério de ferro, algumas propostas já foram feitas para o seu reaproveitamento, como sua incorporação parcial em tijolos e produção de agregados para o setor de construção civil. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do rejeito de minério de ferro para a produção de materiais vítreos, sendo esta uma destinação mais nobre a este rejeito. Sua análise química indicou teores de sílica (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3) em torno de 80% e 20%, respectivamente, propiciando o seu uso como matéria-prima principal ou parcial na formulação de vidros possuindo diferencial estético, econômico e de sustentabilidade pelo uso de uma matéria-prima abundante e de baixo custo por ser descartada. O elevado teor de Fe_2O_3 demonstrou ser um diferencial, possibilitando a obtenção de vidros pretos com potencial para aplicação em projetos arquitetônicos, ornamentais e artísticos.

Palavras-chave: Minério de ferro; Rejeito de mineração; Material vítreo; Vidro negro.

BATALHA, BEATRIZ AMARAL. **Evaluation of the potential of iron ore tailings in the production of vitreous materials**. 2022. 66 p. Final paper (Bachelor's Degree in Materials Engineering) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2024.

ABSTRACT

Solid waste generated during mining operations constitute a serious problem for companies in the sector since it needs to be treated and disposed consciously in order to minimize the environmental impact caused by such activities, generating additional costs for mining companies and requiring large areas for storage. In this way, finding methods for using the tailings produced during mineral extraction activities has been an essential issue for companies, as it implies reconciling economic development with environmental preservation and social responsibility. When it comes to iron ore waste, some proposals have already been made for its reuse, such as its partial incorporation into bricks and the production of aggregates for the civil construction sector. In this context, the objective of this study was to evaluate the potential of iron ore waste for the production of vitreous materials, which is a nobler destination for this waste. Its chemical analysis indicated silica (SiO_2) and iron oxide (Fe_2O_3) contents of around 80% and 20%, respectively, allowing its use as the main or partial raw material in the formulation of glasses with an aesthetic, economic and performance differential. Sustainability through the use of an abundant raw material and low cost since it is discarded. The high content of Fe_2O_3 proved to be a differential, making it possible to obtain black glasses with potential for application in architectural, ornamental and artistic projects.

Key words: Iron ore; Mining tailings; Vitreous material; Black glass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais minerais que contém ferro: (A) Hematita (Fe_2O_3). (B) Magnetita (Fe_3O_4). (C) Goethita (FeO/OH). (D) Siderita ($FeCO_3$). (E) Pirita (FeS_2).....18
Figura 2 – Itabirito encontrado na Mina de Conceição.....20
Figura 3 – Fluxograma de um exemplo de beneficiamento a úmido.....21
Figura 4 – Volume específico *versus* temperatura a partir de materiais líquidos sob diferentes taxas de resfriamento.....30
Figura 5 – Rede tridimensional formada por tetraedros de Si^{4+} em materiais amorfos.....31
Figura 6- Alteração estrutural causada pela incorporação do óxido de sódio (Na_2O).....32
Figura 7 – Pó seco do rejeito de minério de ferro utilizado neste trabalho.....37
Figura 8 – Moinho de jarros modelo *MA 550/CF* 39
Figura 9 – Forno elétrico de fusão com atmosfera de ar.....39
Figura 10 – Moldes de grafite usados para a conformação das amostras vítreas....40
Figura 11 – Equipamento e peneiras usados durante o ensaio.....40
Figura 12 – Micrografias fornecidas pelo MEV da superfície do RMF.....44
Figura 13 - Amostras produzidas a partir de composições típicas de recipientes vítreos.....52
Figura 14 - Amostras produzidas do tipo I-1.....52
Figura 15 - Amostras produzidas do tipo P-1.....52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Investimento realizados em projetos de mineração no Brasil desde 2013.....16
Gráfico 2 – Produção brasileira de minério de ferro entre 2003 a 2020.....17
Gráfico 3 – Distribuição granulométrica do RMF calculada por análise de imagens do MEV.....45
Gráfico 4 – Espectograma por energia dispersiva de raios X do RMF.....46
Gráfico 5 – Difratogramas do porta amostra de silício amorfo e do RMF.....49
Gráfico 6 – Espectrograma no infravermelho com transformado de Fourier do RMF.....50
Gráfico 7 – Resultados obtidos a partir da análise termogravimétrica do RMF.....51
Gráfico 8 – Difratograma das amostras de soda-cal-sílica.....54
Gráfico 9 – Espectrograma no infravermelho com transformado de Fourier das amostras vítreas.....56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos que visam o aproveitamento do RMF.....28
Tabela 2 – Composições típicas de vidros para aplicações específicas (% em massa).....34
Tabela 3 – Vidros pretos do tipo soda-cal-sílica obtido a partir de diferentes percursores.....35
Tabela 4 – Reagentes usados durante a síntese dos vidros soda-cal-sílica.....38
Tabela 5 – Composição dos vidros de soda-cal-sílica (% em peso).....38
Tabela 6 – Distribuição granulométrica do RMF a partir do peneiramento.....43
Tabela 7 – Composição química do RMF (% em peso).....47
Tabela 8 – Composição química de rejeitos de minério de ferro provenientes de diferentes minas segundo autores (% em peso).....48
Tabela 9 – Atribuições dos picos apresentados no espectrograma de FTIR.....50
Tabela 10 – Densidades encontradas para os vidros I-1 e P-1.....55
Tabela 11 – Atribuições dos picos apresentados no espectrograma de FTIR.....56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	*American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
ILATIT	Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
RMF	Rejeito de minério de ferro
VALE	Companhia Vale do Rio Doce
NBR	Norma brasileira registrada
FRX	Fluorescência de raios X
DRX	Difração de raios X
TGA	Análise termogravimétrica
DTA	Análise térmica diferencial
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
IVTF	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
ρ	Densidade
g	Grama
cm	Centímetro
s	Segundo
ºC	Celsius
Fe	Ferro
m	Metro
µm	Mícron

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....12

2 OBJETIVOS.....15
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....15

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....16
3.1 A MINERAÇÃO NO BRASIL.....16
3.2 MINÉRIO DE FERRO.....18
3.3 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO.....21
3.3.1 Geração de rejeitos.....23
3.3.1.1 *Métodos de descarte do rejeito*.....24
3.4 ACIDENTES ENVOLVENDO BARRAGENS DE REJEITOS.....26
3.5 PARALISAÇÃO DAS BARRAGENS DE LARANJEIRAS E ITABIRIÇU.....27
3.6 MEIOS DE APROVEITAMENTO DO REJEITO.....28
3.7 MATERIAIS VÍTREOS.....29
3.7.1 Soda-cal-sílica.....32
3.7.2 Vidro preto.....35
3.7.2.1 Aspectos sobre a reciclagem de vidros.....36

4 MATERIAIS E MÉTODOS.....37
4.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO.....37
4.2 REAGENTES.....38
4.3 MATERIAIS VÍTREOS.....38
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....40
4.4.1 Granulometria.....40
4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura e microanálise.....41
4.4.3 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) 41
4.4.4 Difração de raios X (DRX) 41
4.4.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) 42
4.4.6 Termogravimetria (TG).....42
4.4.7 Densidade (ρ).....42

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....43
5.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF) 43
5.1.1 Granulometria.....43
5.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....44
5.1.2.1 Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS).....45
5.1.3 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) 47
5.1.4 Difração de raios X (DRX) 48
5.1.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) 50
5.1.6 Termogravimetria (TG) 51
5.2 MATERIAIS VÍTREOS.....52
5.2.1 Difração de raios X (DRX) 54
5.2.2 Densidade (ρ).....55
5.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF).....56

6 CONCLUSÕES GERAIS.......57

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS.....58

REFERÊNCIAS.....59

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados recentes do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), em 2021, a extração de ferro representou 93% do volume total de minérios extraídos no mundo, atingindo 2,6 bilhões de toneladas. Nesse mesmo ano, de acordo com o Ministério da Economia, o ferro liderou as exportações brasileiras, correspondendo a 14,19% do total. Apenas a mineradora Vale do Rio Doce extraiu cerca de 315 milhões de toneladas de minério de ferro, gerando 47,2 milhões de toneladas de rejeitos (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2022; MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2022; VALE DO RIO DOCE, 2021).

Rejeitos são materiais com granulometria e composição que variam conforme o processo de beneficiamento adotado e o teor do mineral na rocha. Como o rejeito por si só não possui valor econômico, ele é descartado através de barragens construídas com o próprio rejeito (via úmida) ou por meio de empilhamentos (via seca) (FERREIRA, M. R. A., 2020; PEREIRA, E. L., 2005). Roche et al (2017) afirma que todas as técnicas de descarte e gerenciamento de resíduos da exploração mineral possuem graus variáveis de riscos ambientais.

Recentemente, o Brasil sofreu com duas tragédias que marcaram a história da nossa mineração. O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, em 2016, resultou em 19 mortes. Subdistritos como Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo e Barra Longa foram diretamente atingidos, em questão de minutos, pela lama de rejeitos que seguiu até o Rio Doce, impactando o ecossistema do local e a vida de moradores tanto de Minas Gerais quanto do Espírito Santo. Imparável, a lama atingiu o Oceano Atlântico, afetando a vida marinha da região e tornando praias, antes lotadas por turistas, impróprias para o banho. Três anos depois, rompe-se a barragem B-I em Brumadinho. Considerado este o maior acidente coletivo de trabalho do Brasil, no qual a tragédia foi marcada pelas cenas de desespero e com um saldo de 270 mortos (MELLO, R. S. V., 2021).

Economicamente, o descarte do rejeito de mineração de ferro também é marcado por prejuízos. Em 2020, a Vale do Rio Doce deixou de extrair 20,7 milhões de toneladas no Complexo de Itabira devido a restrições na disposição de rejeitos em Itabira e Brucutu. A limitação da área e o possível risco de um novo acidente foram os motivos fornecidos pela empresa (VALE DO RIO DOCE, 2021).

Nesse âmbito, pesquisadores têm estudado medidas de aproveitamento do rejeito, visando diminuir o volume de material descartado e agregar valor econômico ao mesmo. Franco et al (2014), por exemplo, estudou a incorporação do rejeito de minério como agregado para a produção de concreto. Por outro lado, Huang et al (2013) utilizou o rejeito para substituir parte do cimento na produção de compósitos cimentícios. Outras rotas de pesquisa visaram a utilização do rejeito para a fabricação de cerâmicas vermelhas (NOCITI, D. M., 2011; LORENZINI, L., 2022). Mais recentemente, em 2021, a VALE começou a produzir areia sustentável a partir do rejeito de minério de ferro, numa pesquisa realizada desde 2014 em parceria com a Universidade Federal de Itabira (AGÊNCIA BRASIL., 2021).

Rejeitos de minério de ferro apresentados em estudos ao redor do mundo, o descrevem como um material com alto teor de sílica (acima de 50%) na sua composição, e um teor de óxido de ferro moderado (abaixo de 20%) (DUAN, P. et al. 2016; CECHIN, L. 2021; FIGUEIREDO, R. 2021; LIU, W. Y. et al 2011).

Uma vez que, os vidros mais comumente utilizados são fabricados a partir de matérias-primas que apresentam elevados teores de sílica, o rejeito de minério de ferro torna-se um excelente candidato para esse propósito. Além disso, o seu considerável teor de óxido de ferro pode conferir diferentes cores (dependendo da concentração utilizada na formulação e atmosfera de trabalho) e também atuar como agente de nucleação para a cristalização dos vidros, possibilitando a obtenção de vitrocerâmicas (WISNIEWSKI, W. et al, 2010).

A elevada capacidade da sílica de formar redes tridimensionais em materiais vítreos é algo relatado com frequência na literatura. Vidros do tipo soda-cal-sílica são amplamente fabricados no mundo devido a sua facilidade de produção e a sua versatilidade de aplicação que variam desde utensílios de cozinha até janelas de automóveis e reforços para compósitos estruturais (BACHA, M. G., 2017).

Ao contrário dos estudos apresentados anteriormente, este trabalho visou avaliar a utilização do rejeito de minério de ferro, em sua totalidade, para a produção por meio de fusão, de materiais vítreos do tipo soda-cal-sílica, que são totalmente recicláveis. Para isso, uma amostra do rejeito de minério de ferro proveniente da Mina de Conceição, em Itabira-MG, foi caracterizada por peneiramento a seco, microscopia eletrônica de varredura, espectrometria de fluorescência de raios X, difração de raios X, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier e termogravimetria. Com o rejeito caracterizado, foram testadas as condições adequadas para a sua

utilização em uma formulação de vidro tipo soda-cal-sílica, o mais empregado no mundo. Além disso o elevado teor de óxido de ferro presente no rejeito, possibilita a obtenção de vidros pretos, que podem ser reciclados integralmente sem apresentar quaisquer limitações, além de possibilitar a diminuição do volume de rejeito gerado e agregar valor econômico em um material que é abundante e barato por ser de descarte.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar o potencial do uso do rejeito de minério de ferro (RMF) para a produção de materiais vítreos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram:

- Estudar sistemas vítreos do tipo soda-cal-sílica os quais poderiam ser fundidos abaixo de 1550ºC devido a limitação do forno elétrico;
- Verificar em quais dos sistemas estudados o RMF poderia ser empregado para a obtenção de vidros pretos;
- Identificar as condições ideiais para a obtenção de vidros pretos a partir do RMF;
- Investigar o impacto da adição de RMF na densidade final do vidro, comparando-o com os vidros convencionais de soda-cal-sílica.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

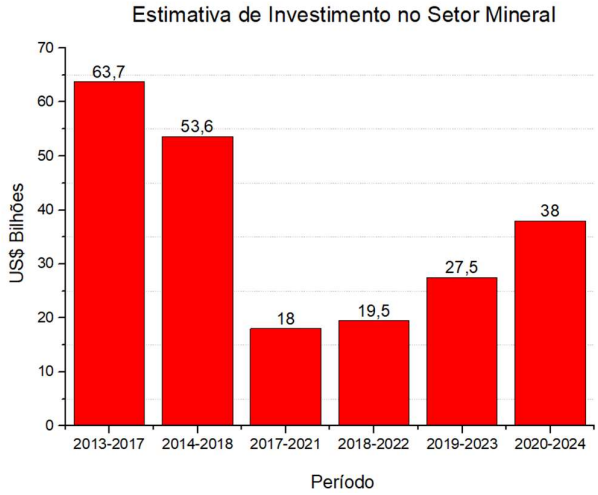
3.1 A MINERAÇÃO NO BRASIL

A mineração deu início no Brasil ainda no período colonial, quando areia, argila e cascalho eram retirados da terra em pequenas quantidades com o auxílio de ferramentas rudimentares e de baixa resistência mecânica, feitas normalmente de ferro caldeado. Mais tarde, no século XVI, em busca de ouro e diamante, bandeirantes paulistas iniciaram os primeiros garimpos no estado de São Paulo que se estenderam por Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso (GERMANY, D. J., 2002).

Até metade dos anos 1900's, a produção de ferro no Brasil era ínfima, limitando-se a pequenas forjas catalãs em Minas Gerais, quando, em 1942, funda-se a companhia Vale do Rio Doce. Naquela época, a companhia extraía pequenas quantidades de hematita das encostas da região que hoje abriga a Mina do Cauê, em Itabira. Após esse ano, a extração de minérios cresceu exponencialmente no país. Com o aumento de investimento, os processos envolvidos na extração de minério passaram a ser automatizados, facilitando a obtenção de números até então inimagináveis, como em 1997, quando foram extraídas 185 milhões de toneladas de minério de ferro. (GERMANY, D. J., 2002; UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2003).

O Gráfico 1 representa o investimento em projetos de mineração no período de 2013 a 2017 segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em 2021.

Gráfico 1 – Investimento realizados em projetos de mineração no Brasil desde 2013.



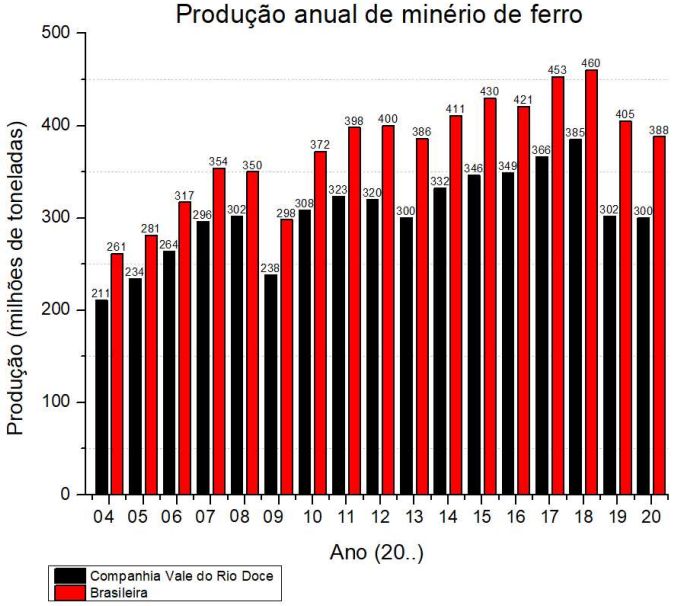
Fonte: INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM), 2021 (ADAPTADA).

Observa-se que no período entre 2013 e 2018 houve um crescimento significativo que demonstra o fortalecimento do setor mineral no país. Logo após esse pico, no entanto, houve uma queda considerável nos investimentos, em parte devido às incertezas regulatórias e aos desastres ambientais causados pelo rompimento das barragens de rejeitos de Mariana (2015) e de Brumadinho (2019) (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2021; LASCHEFSKI, K. A., 2020; GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2024).

Essa variação nos investimentos destaca a necessidade de novas estratégias que tornem a mineração mais sustentável e menos dependente de métodos tradicionais de descarte de rejeitos. Com o aumento dos investimentos, há também um crescimento na produção mineral e, consequentemente, na geração de resíduos, tornando ainda mais urgente a busca por soluções para o seu reaproveitamento (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2021; LASCHEFSKI, K. A., 2020; GOVERNO DE MINAS GERAIS, 2024).

O Gráfico 2 mostra o avanço da produção nacional de minério de ferro desde 2003 até 2020, onde, em vermelho, temos a produção total do respectivo ano e, em preto, temos a produção anual correspondente a companhia Vale do Rio Doce. Os dados foram obtidos em relatórios anuais do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e da Vale do Rio Doce (VALE).

Gráfico 2 – Produção brasileira de minério de ferro entre 2003 a 2020.



Fonte: UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2001-2018; UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2022; VALE DO RIO DOCE, 2021 (ADAPTADA).

Observando ambos gráficos, é possível notar que entre 2013 e 2018, houve um crescente volume tanto de investimento financeiro em projetos de mineração quanto na produção anual de minério de ferro.

Dados mais recentes apontam que, em 2021, foram exportados ao todo 357,7 milhões de toneladas de ferro, o que representou 14,19% de todas as exportações brasileiras, sendo essencial para o saldo da balança comercial nacional permanecer positivo, reafirmando, assim, a importância desse minério para a economia brasileira (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2022).

3.2 MINÉRIO DE FERRO

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre. Em 2013, a reserva mundial de minério de ferro equivalia a 170 bilhões de toneladas sendo 23 bilhões dela somente no Brasil. Com um teor médio de ferro de 49%, o Brasil representava, naquele ano, 13,6% das reservas mundiais. Dentre os estados, Minas Gerais liderava com 72,5% das reservas, seguido por Mato Grosso do Sul e o Pará, com 13,1 e 10,7%, respectivamente (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2014).

A Figura 1 apresenta os principais minerais que contêm ferro, cada um com características e texturas distintas que influenciam seu uso e beneficiamento.

Figura 1 – Principais minerais que contém ferro. (A) Hematita (Fe_2O_3). (B) Magnetita (Fe_3O_4). (C) Goethita (FeO/OH). (D) Siderita ($FeCO_3$). (E) Pirita (FeS_2).

Fonte: (A) e (D) AMARAL, L., MENEZES, L.; (B); LAVINSKY, R. M., 2010. (C) UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SÃO PAULO (USP). (E) DESCOUENS, D., 2015.

A hematita (Fe_2O_3) é um dos minérios de ferro mais explorados devido ao seu alto teor de ferro, que pode atingir cerca de 70%. Esse mineral pode apresentar diferentes texturas, como maciça, botrioidal (semelhante a cachos de uva) ou reniforme (em forma de rim), além de uma coloração que varia do cinza aço ao preto, geralmente com um brilho metálico característico (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2021). A magnetita (Fe_3O_4), por sua vez, possui um teor ainda maior, cerca de 72,4%, e se destaca por suas propriedades magnética, sendo encontrada normalmente em forma de cristais octaédricos ou agregados maciços, apresentando coloração preta ou marrom-escura e brilho metálico (GEOLOGY SCIENCE, 2023). Já a goethita (α-FeOOH) é um oxi-hidróxido de ferro amplamente encontrado na superfície terrestre, muitas vezes resultante do intemperismo de minerais como hematita e magnetita. Diferente dos óxidos, a goethita apresenta texturas fibrosas ou terrosas, com coloração que pode variar do amarelo ao marrom-avermelhado (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2021).

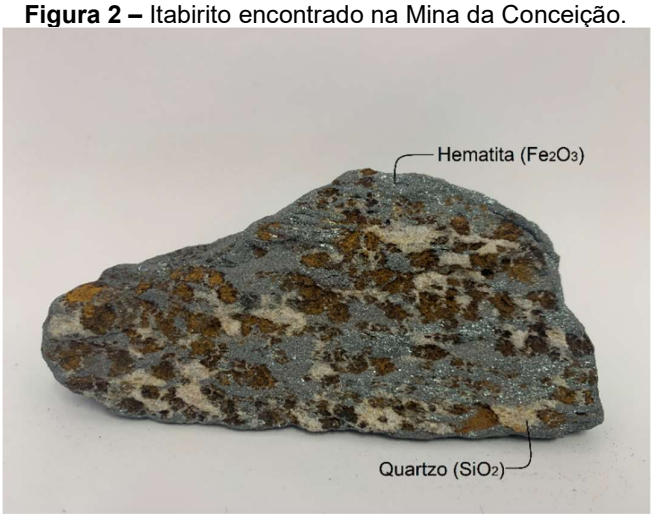
A siderita ($FeCO_3$) é um carbonato com baixo teor de ferro, cerca de 48,3%. Sua textura é tipicamente maciça ou romboédrica, com coloração variando entre amarelo-acastanhado e branco-acinzentado (GEOLOGY SCIENCE, 2023).

Por fim, a pirita (FeS_2), apesar de conter ferro, não é uma fonte relevante para sua extração devido à presença de enxofre. Popularmente conhecida como “ouro dos tolos” por seu brilho metálico dourado, a pirita forma cristais cúbicos ou octaédricos, frequentemente com superfícies estriadas (GEOLOGY SCIENCE, 2023).

No Brasil, os depósitos minerais são principalmente formados por "itabiritos" e hematita. Encontrados predominantemente no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, os itabiritos são compostos por bandas alternadas de quartzo (SiO_2) e óxidos de ferro, como hematita e magnetita. O teor de ferro nesses minérios pode variar de 20% a 50% (CARVALHO, P. S. L. et al., 2014).

A Figura 2 ilustra um itabirito retirado da Mina da Conceição, em Itabira, Minas Gerais, onde é possível observar bandas de quartzo e hematita. Dependendo da intensidade do processo de decomposição superficial, os itabiritos podem ser compactos ou pulverulentos (CARVALHO, P. S. L. et al., 2014).

Figura 2 – Itabirito encontrado na Mina da Conceição.



Fonte: Autor, 2022.

Por outro lado, no Pará, são mais abundantes os depósitos majoritariamente compostos por hematita. Com estrutura que pode ser compacta, pulverulenta, foliada ou granular, a hematita é um mineral mais homogêneo, capaz de atingir teores de ferro acima de 64%. (CARVALHO, P. S. L. et al., 2014).

Além do óxido de ferro e da sílica, os minérios de ferro podem, no geral, possuir elementos como óxidos, carbonatos e sulfatos de alumínio, manganês, fósforo, magnésio, sódio, cálcio, titânio, dentre outros. Como é encontrado em rochas dispersas pela natureza e que passam por processos naturais de decomposição, o minério de ferro também pode apresentar matéria orgânica na sua composição.

Por não possuir valor econômico na forma bruta, devido ao alto teor de outros componentes químicos na sua composição, o minério de ferro deve passar por um processo de “beneficiamento” para, em 99% dos casos, obter-se o ferro primário, principal componente do aço ou para a utilização como carga na indústria de ferro-liga (QUARESMA, L. F., 2001).

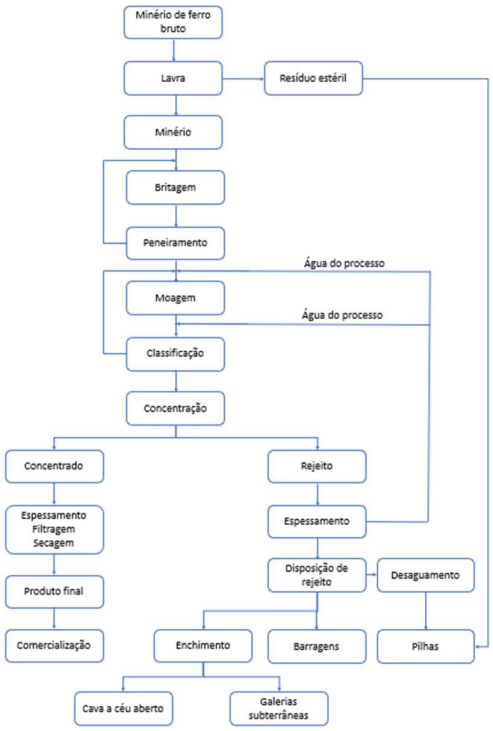
3.3 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO

O beneficiamento trata-se de um conjunto de processos que visam alterar a granulometria e a concentração de cada elemento presente no mineral com o objetivo de obter o máximo teor do elemento desejado, agregando valor econômico a ele. A escolha do tipo de processo de beneficiamento a ser adotado depende da composição, das propriedades físicas e do grau de liberação dos minerais ferrosos da ganga (NAKHAEI, F., IRANNAJAD, M., 2018).

Quando o minério possui um alto teor de ferro, normalmente, é realizada somente a moagem e a separação por tamanho de material, obtendo-se assim um produto pronto para venda. Porém, em casos onde o teor é relativamente baixo, são necessários outros processos para gerar produtos com altos teores de ferro. Sendo assim, a extensão e a complexidade do beneficiamento depende das características específicas dos minérios extraídos de cada mina (MORAES, S., RIBEIRO, T. R., 2019; LORENZINI, L., 2022).

Para facilitar o entendimento do processo, a Figura 3 apresenta um fluxograma de um exemplo típico de beneficiamento por via úmida.

Figura 3 – Fluxograma de um exemplo de beneficiamento por via úmida.



Fonte: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010 (ADAPTADA).

A primeira fase do beneficiamento é a britagem, onde o minério bruto é reduzido a partículas menores para facilitar o seu processamento. Em seguida, o material passa pelo peneiramento, que separa as partículas conforme sua granulometria, garantindo uma distribuição adequada para as etapas seguintes (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010).

A etapa de moagem é responsável por reduzir ainda mais o tamanho das partículas, promovendo a liberação dos minerais valiosos da ganga. Após a ela, ocorre a classificação, na qual as partículas são separadas com base no tamanho e densidade, direcionando-as para os métodos mais adequados de concentração (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010).

A concentração é a etapa em que se aumenta o teor do mineral de interesse no material processado, utilizando diferentes técnicas, como flotação, separação magnética ou gravimétrica. Esse processo resulta em duas frações: o concentrado, que segue para beneficiamento posterior, e o rejeito que será descartado (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010).

O concentrado obtido passa então por um processo de desaguamento para reduzir o seu teor de umidade. Esse processo é formado pelas etapas de espessamento, filtragem e secagem. Por fim, o material é transportado, estocado e vendido para utilização na indústria siderúrgica ou em outros setores (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010).

O rejeito, por sua vez, passa por etapas específicas, determinadas pelo método de disposição adotado. Diferente do concentrado, ele não possui valor comercial e demanda um manejo adequado para minimizar impactos. Para compreender melhor esse processo, é fundamental diferenciar os tipos de resíduos gerados durante o beneficiamento, suas origens e as formas apropriadas de destinação (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A., 2010).

3.3.1 Geração De Rejeitos

Em geral, durante o beneficiamento formam-se dois tipos de resíduos. O estéril, como é chamado segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, é proveniente da “lavra”, etapa onde ocorre a extração do minério através de escavações no solo ou de desmonte de rochas. Como trata-se de um resíduo seco deve ser disposto em pilhas. Após a etapa de concentração, gera-se o denominado “rejeito de mineração” que, por sua vez, é úmido (CAMPANHA, Â., 2015; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011; LUZ, A. B. et al., 2004).

Os rejeitos de minério de ferro contêm teores elevados de alguns elementos que são considerados indesejáveis nos processos de aglomeração (sinterização e pelotização), na fabricação do aço e na operação de fornos. A sílica, o fósforo, a alumina e o manganês, por exemplo, em quantidades acima do especificado, alteram as propriedades do ferro gusa, do aço e da escória. O fósforo torna o aço quebradiço em alta temperatura, além de facilitar a existência de rachaduras e corrosões. A alumina e o manganês também podem diminuir a ductilidade do aço. Sendo assim, os rejeitos devem ser separados do minério de ferro para evitar dificuldades tanto no processo de obtenção quanto no produto final da mineração (WOLFF, A. P., 2009).

Abrão, em 1987, estudou as razões médias entre o produto final obtido e a geração de rejeitos durante o beneficiamento. Para o ferro, ele encontrou uma proporção 2:1, ou seja, a cada 100% de minério de ferro extraídos, 66,67% corresponderão ao ferro (produto final) e os outros 33,33% representarão os rejeitos gerados no processo. Porém, na realidade esse número pode ser um pouco diferente.

Baseando-se nos dados de produção e geração de resíduos, fornecidos pela Vale do Rio Doce, no ano de 2021, foram produzidos 315,6 milhões de toneladas de minério de ferro. Nesse mesmo ano, foram gerados 45,6 milhões de toneladas de rejeitos, além de 191,6 milhões de toneladas de resíduo (estéril). Por esses números, é possível afirmar que do volume total extraído, somente 57,11% foi transformado minério de ferro, ou seja, 42,89% do material virou rejeito e teve de ser descartado (VALE DO RIO DOCE, 2021). Quando projetamos esse número para as produções relativa aos anos anteriores e as dos anos futuros, é possível observar a necessidade de haver áreas imensas para a disposição dos rejeitos.

3.3.1.1 *Métodos de descarte do rejeito*

Como o rejeito não possui valor econômico significativo, o seu descarte é, normalmente, realizado nas proximidades ou dentro do próprio complexo industrial, evitando gastos desnecessários com o seu transporte, considerando o grande volume de material gerado (PEREIRA, E. L., 2005).

O modo de transporte do rejeito vai depender da forma como ele se encontra. No Brasil, temos a disposição de rejeitos na forma de sólidos e na forma de polpa. O segundo é o mais usado pelas indústrias devido ao seu baixo custo de operação, uma vez que, a polpa é transportada por tubulações (rejeito dutos) que carregam o material por gravidade ou com o auxílio de sistemas de bombeamento. Por outro lado, o rejeito sólido costuma ser transportado através de caminhões e correias transportadoras que elevam o custo do seu processo de disposição (PEREIRA, E. L., 2005).

No geral, a disposição do rejeito pode ser feita de quatro maneiras diferentes, sendo elas: o enchimento de cavidades a céu aberto, subaquáticas, na forma de pilhas (empilhamento) ou através de barragens (ABRÃO, 1987).

Como o nome indica, o enchimento de cavidades a céu aberto consiste no lançamento direto dos rejeitos e dos estéreis em cavas expostas a superfície. Em contrapartida, a disposição subaquática é caracterizada pelo lançamento do rejeito no fundo de mares, lagos ou reservatórios projetados para essa função. Devido as restrições ambientais, ambos os casos não são comuns no Brasil (PEREIRA, E. L., 2005).

O empilhamento é, normalmente, realizado com rejeitos na forma de pó (secos). Para isso, é necessário realizar o desaguamento do rejeito que, muitas vezes, costuma ser um processo caro. Outra opção é a de empilhar o rejeito ainda na forma de polpa com um sistema de dispositivos de drenagem, garantindo que não haja o acúmulo de líquidos (FERRAZ, F. 1993; GOMES, R. C. et al, 1999).

Finalmente, o método de disposição em barragens que se trata do lançamento do rejeito, sob a forma de polpa, em diques construídos com terra compactada ou enrocamentos. Esse é o método mais aplicado no Brasil devido a sua facilidade de execução e ao seu baixo custo operacional, uma vez que, o próprio rejeito é o material de construção da barragem. Além disso, as barragens são capazes de suportar grandes volumes de material, podendo atingir 55 milhões de metros cúbicos e 106m de altura, como a barragem do Fundão em Marina (MG) (PEREIRA, E. L., 2005).

Atualmente, a VALE, maior mineradora do país, opta por descartar o seu rejeito por empilhamento a seco, a fim de evitar novos desastres ambientais. Para isso, a companhia visa descaracterizar 14 barragens do tipo “à montante” até 2035. Apesar disso, de um modo geral, todas as técnicas de descarte de rejeitos apresentam um ponto em comum. Todas, sem exceção, apresentam riscos socioambientais como: alteração da paisagem local e das propriedades do solo, erosão, assoreamento de cursos, alteração da dinâmica hídrica e das qualidades do ar e da água. Além disso, a existência de finos e de aditivos, provenientes do beneficiamento, e o excesso de água podem facilitar a liquefação, prejudicando a estabilidade da barragem, provocando o seu rompimento. Esses riscos são agravados conforme a proximidade da barragem e dos centros populacionais (VALE DO RIO DOCE; ANDRADE, 2014; EDRAKI et al., 2014; ALMADA, B. S., 2021).

Por isso, a portaria da ANM nº 70.389 de 2017, afirma que todas as barragens devem são supervisionadas e classificadas conforme o seu volume, o seu risco e o dano potencial associado. Todavia, dois casos recentes marcaram a história do Brasil e expuseram a má fiscalização e o descaso das mineradoras com as leis e as populações locais (BRASIL., 2017).

3.4 ACIDENTES ENVOLVENDO BARRAGENS DE REJEITOS

No dia de 05 de novembro de 2015, rompe a barragem de Fundão em Mariana (MG). A barragem fazia parte de um complexo de mineração juntamente com as barragens de Germano e de Santarém. Ao todo foram 19 mortos e 43 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério despejados em mais de 700 quilômetros de distância, atingindo 2 estados brasileiros. Bento Rodrigues, subdistrito de Mariana que ficava a 6 quilômetros de distância da barragem, viu seus 321 anos de cidade encobertos por 15 metros de lama (SERRA, C., 2018; MELLO, R. S. V., 2021). A Força-Tarefa do Ministério Público estimou, em 2016, que o valor dos danos causados pelo desastre eram de R$155.000.000.000,00 (cento e cinquenta e cinco bilhões de reais) (SERRA, C., 2018; CASO SAMARCO., 2020).

A investigação escancarou o descaso das mineradoras com a população. Foi provado que a barragem de Fundão iniciou as suas operações de forma apressada, sem apresentar os relatórios que mostrariam a interferência causada na barragem pela pilha de estéril da VALE que ficava próxima ao local. Também foi provado que a VALE depositava rejeito na barragem que, até então, era da Samarco. O último e pior fator, a Samarco não possuía qualquer plano de emergência caso houvesse um rompimento (SERRA, C., 2018).

Após 3 anos, em 2019, rompe a barragem B-I, em Brumadinho (MG). A barragem fazia parte de um complexo de mineração da Ferteco Mineração S/A, mas foi adquirida pela VALE em 2001. Com o impacto, outras duas barragens, B-IV e B-IV-A, também se romperam. Novamente, nenhuma sirene foi disparada e, ao todo, 10,5 milhões de metros cúbicos de lama foram despejados na cidade, matando 270 pessoas, sendo 90 delas, funcionários que estavam no refeitório no momento do acidente. A investigação revelou que a tragédia poderia ter sido evitada, uma vez que, desde 2017 a VALE era avisada sobre a instabilidade da barragem acerca de um acúmulo de água e a possível presença de efeitos de liquefação que poderiam ocasionar o rompimento da mesma. Apesar disso, a VALE ainda conseguiu obter a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) emitida pela Tractabel, o que permitia o funcionamento normal da barragem (RAGAZZI, L., ROCHA, M., 2019).

Com somente 3 anos separando a maior tragédia ambiental e o maior acidente de trabalho já registrado no país, as populações que viviam próximas a complexos minerários se viram no dever de pressionar as autoridades para que as fiscalizações das barragens fossem mais intensas. Por outro lado, as mineradoras, com medo de novos acidentes, se viram na obrigação de cumprirem rigorosamente as leis estabelecidas. Sendo assim, em caso de pequenas elevações no risco de ruptura, o funcionamento de algumas barragens passou a ser interrompido imediatamente.

3.5 PARALISAÇÃO DAS BARRAGENS DE LARANJEIRAS E ITABIRIÇU

Em 2019, a Vale do Rio Doce informou a suspensão temporária a disposição de rejeitos nas barragens de Laranjeiras, advindos da mina de Brucutu, e de Itabiriçu, pertencente ao complexo de Itabira. Ambas situadas em Minas Gerais. A paralisação foi feita para avaliar as características geotécnicas da barragem e garantir a estabilidade das mesmas. Enquanto paralisadas, as duas barragens somaram um prejuízo de 20,7 milhões de toneladas de produção de minério de ferro (VALE DO RIO DOCE, 2021).

Portanto, é possível afirmar que o descarte e a produção de rejeitos não apresenta qualquer vantagem social, ambiental e econômica, gerando prejuízos e gastos considerados elevados para as mineradoras perante um material que não possui valor econômico. Sabendo disso, diversos pesquisadores estudaram maneiras de aproveitamento do rejeito, visando diminuir o volume dos rejeitos depositados nos complexos minerários.

3.6 MEIOS DE APROVEITAMENTO DO REJEITO

Do ponto de vista econômico, o desenvolvimento de projetos que visam o aproveitamento de resíduos (rejeitos e estéreis) em outras aplicações, proporciona, para a empresa, uma fonte adicional de receita, diminuindo os custos de transporte, construção e até mesmo de manutenção do local de armazenamento (COELHO, E. F. F., 2008).

A Tabela 1 apresenta estudos que visaram o aproveitamento do rejeito de minério de ferro (RMF) em diferentes áreas de atuação, como: no tratamento de águas, na indústria cerâmica e na construção civil.

Tabela 1 – Estudos que visam o aproveitamento do RMF.

Área de estudo	**Referência**
Incorporação em materiais cimentícios	
Pastas de cimento com RMF	BEZERRA, C. G. (2017)
Incorporação de RMF no concreto	PROTASIO, F. N. M. (2019)
RMF como adição mineral em microconcretos	ALMADA, B. S. (2021)
Pavimentos intercalados feitos com resíduos de mineração de ferro	FREIRE, C. B. (2012)
Obtenção de materiais cerâmicos	
Cerâmicas vermelhas com RMF	NOCITI. D. M. (2011)
Pavers e cerâmicas com resíduos de mineração de ferro	SILVA, F. L. (2014)
RMF como matéria-prima para revestimentos cerâmicos e hidráulicos	NASCIMENTO, D. W. (2018)
Produção de areia para a construção civil	**AGÊNCIA BRASIL (2021)**
Outros	
Compósitos de RMF com fibras sintéticas	COELHO, E. F. F. (2008)
Obtenção de cloreto férrico a partir do RMF para tratamento de esgoto sanitário	SILVA, A. M. L. (2019)
Obtenção de silicato de potássio a partir do RMF para a produção de geopolímeros	LORENZINI, L. (2022)

Fonte: Autor, 2022.

Em todas as pesquisas apresentadas acima, o RMF foi utilizado parcialmente, ou seja, como um material a ser adicionado ou incorporado a outros. Destacado, em negrito, temos a areia sustentável produzida desde 2021 pela Vale do Rio Doce. Esse projeto surgiu em 2014 em parceria com a Universidade Federal de Itajubá e, apesar de ser extremamente promissor e importante para a diminuição do volume de rejeito gerado, é necessário ressaltar que o RMF deve passar por processos de concentração, classificação e de filtragem antes de serem comercializados, o que pode aumentar o custo de produção da areia.

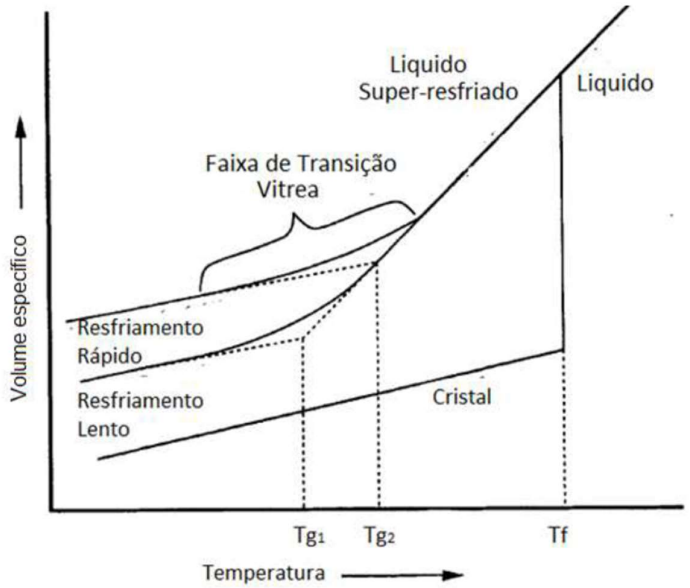
O intuito deste trabalho, diferentemente dos citados anteriormente, é utilizar o RMF como uma matéria-prima, em sua totalidade, sem haver a necessidade de incorporá-lo em pequenas quantidades ou de implementar novos processos que podem aumentar o custo de obtenção do produto final. Conhecendo a estrutura dos itabiritos, sabe-se que os RMF's possuem uma quantidade considerável de sílica, um ótimo formador de rede em materiais vítreos. A possível presença de óxidos de sódio e cálcio na composição do RMF's, o torna ainda mais interessante, por exemplo, para a formação de vidros "soda-cal-sílica", tipo de vidro mais produzido no mundo. Por fim, a existência de ferro residual no RMF o torna uma opção interessante para a obtenção de vidros pretos, muito utilizados na construção civil.

3.7 MATERIAIS VÍTREOS

Estudos indicam que vidros sintéticos são produzidos há pelo menos 6000 anos, sendo considerados um marco importante para a evolução da atual sociedade moderna. Segundo Zanotto e Mauro (2017), o vidro é um estado da matéria não cristalino e desequilibrado que possui transição vítrea e que, apesar de parecer sólido em um curto prazo de tempo, o vidro relaxa espontaneamente em direção ao estado de um líquido super-resfriado, uma vez que, possui estrutura semelhante ao mesmo, visando cristalizar-se (MAURO, J. C., ZANOTTO, E. D., 2014; MAURO, J. C., ZANOTTO, E. D., 2017).

Em outras palavras, o material fundido, ao ser resfriado, tende ao estado termodinâmico mais estável que se corresponde a um sólido cristalino como mostrado na Figura 4 (BACHA, M. G., 2017).

Figura 4 – Volume específico *versus* temperatura a partir de materiais líquidos sob diferentes taxas de resfriamento.



Fonte: SHELBY, J. E., 2005.

Quando um líquido é resfriado abaixo da sua temperatura de fusão e não apresenta a diminuição repentina do seu volume, ele passa a ser chamado de “líquido super-resfriado”, indicando que não houve cristalização. A estrutura do líquido super-resfriado relaxa até atingir o equilíbrio metaestável, encontrados em estruturas amorfas. À medida em que o resfriamento avança, a viscosidade do material é aumentada de maneira significativa, impedindo a movimentação dos átomos e dificultando a completa relaxação da sua estrutura. A partir daí, é possível observar a mudança da inclinação da curva conforme a temperatura do sistema, indicando um certo distanciamento do material em relação ao líquido de equilíbrio. Para essa inclinação da curva é dado o nome de transição vítrea e, o material que não for cristalizado após a mesma é chamado de vidro (BACHA, M. G., 2017).

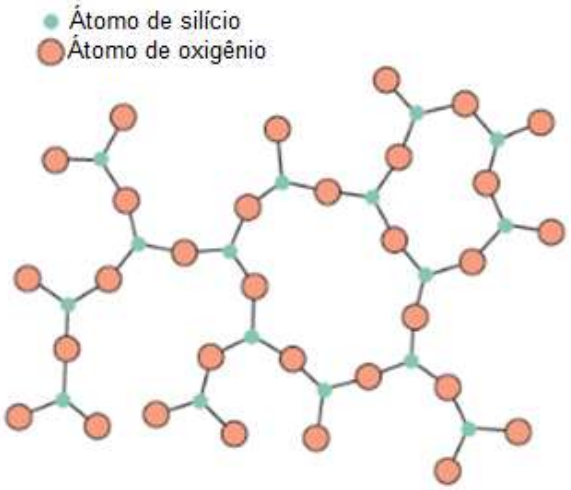
Contrariando crenças antigas, os vidros podem ser orgânicos, inorgânicos, metálicos ou até mesmo híbridos, a depender da composição do sistema adotado. Por não possuírem microestruturas, as propriedades do vidro variam de acordo com a sua composição química, bem como a sua história térmica, a rota de síntese aplicada e os seus parâmetros estabelecidos e, se houve ou não exposição do material a certos tipos de radiação (ZANOTTO, E. D., MAURO, J. C., 2017; GOTTARDI, V., 1982).

Os vidros podem ser sintetizados por diferentes métodos, sendo fusão, sinterização e sol-gel, os três mais estudados. Industrialmente, a rota mais utilizada é por meio da fusão de precursores devido a sua facilidade e a capacidade de produzir peças monolíticas, homogêneas e de diferentes formatos em larga escala.

Estruturalmente, os vidros são formados por três tipos de elementos, sendo eles: formadores de rede, modificadores de rede e intermediários. Os formadores de rede são elementos capazes de se ligarem a diferentes átomos além de poderem sofrer polimerização, formando redes tridimensionais.

A sílica é um exemplo de um excelente formador de rede, podendo formar redes tridimensionais a partir de tetraedros compostos por um íon de Si^{4+} ao centro e quatro íons de O^{2-} nos vértices que, por sua vez, podem ser ponteantes e se ligarem a novos íons de sílica, formando ligações do tipo Si-O-Si como indicado na Figura 5 (BACHA, M. G., 2017).

Figura 5 – Rede tridimensional formada por tetraedros de Si^{4+} em materiais amorfos.



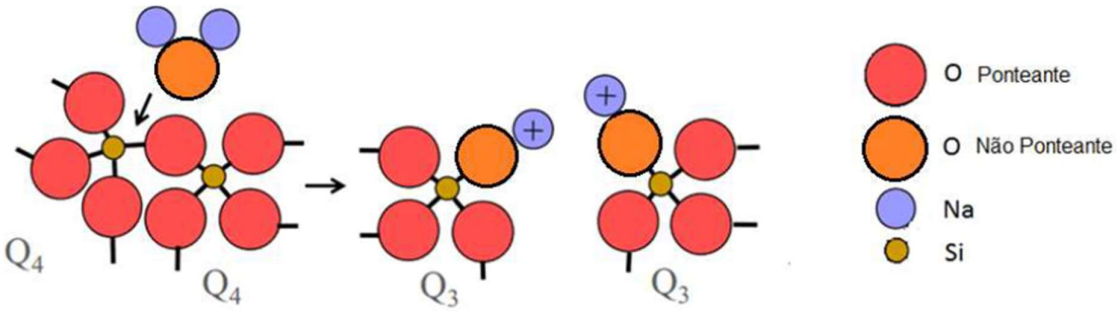
Fonte: CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G., 2012.

3.7.1 Soda-cal-sílica

Apesar da sílica ser um bom formador de rede e produzir vidros com propriedades interessantes, como: excelentes propriedades ópticas, boa resistência mecânica e química, baixo coeficiente de expansão térmica e baixa condutividade térmica e elétrica; o seu custo de fabricação é elevado, tendo em vista que a sílica apresenta elevada viscosidade mesmo no estado líquido, fazendo com que seja necessário realizar o seu processamento a temperaturas em torno de 2000ºC. Esse alto custo energético torna necessário o uso de modificadores de rede para viabilizar a produção em larga escala (SHELBY, J. E., 2005).

Para reduzir a temperatura de fusão e facilitar o processamento da sílica, incorporam-se industrialmente óxidos modificadores de rede, que quebram ligações de oxigênios ponteantes do tipo Si-O-Si. Esse processo ocorre por meio da substituição de um íon de oxigênio por um íon metálico, como sódio (Na^{+}) ou cálcio (Ca^{2+}), formando ligações do tipo Si-O-Na ou Si-O-Ca (Figura 6). Essa modificação resulta na estrutura dos vidros soda-cal-sílica, onde o sódio reduz a temperatura de fusão e o cálcio confere maior resistência química à matriz vítrea (BACHA, M. G., 2017).

Figura 6- Alteração estrutural causada pela incorporação do óxido de sódio (Na_2O).



Fonte: MARTIN, S. W.; BACHA, M. G., 2017.

Os vidros soda-cal-sílica são amplamente utilizados em aplicações industriais, como na construção civil e na fabricação de embalagens vítreas, devido às suas propriedades térmicas, mecânicas e ópticas. Apresentam um coeficiente de expansão térmica relativamente elevado, tornando-os menos resistentes a choques térmicos em comparação a vidros borossilicato. No entanto, sua resistência mecânica e química são adequadas para a maioria das aplicações convencionais.

Além disso, esse tipo de vidro possui alta transparência no espectro visível, permitindo a passagem de aproximadamente 90% da luz incidente, o que o torna ideal para aplicações ópticas e arquitetônicas (SHELBY, J. E., 2005).

A composição dos vidros soda-cal-sílica é predominantemente constituída por sílica (formadora de rede) e pelos óxidos de sódio e de cálcio (modificadores de rede). A adição de sódio tem por objetivo diminuir a temperatura de *liquidus* do sistema, fazendo com que seja possível obter bons níveis de viscosidade em torno de 1500 ºC. Em contrapartida, em altas concentrações, o sódio diminui a estabilidade química do vidro, transformando-o solúvel em água. Por outro lado, o cálcio aumenta a resistência química do vidro, balanceando o sistema sem interferir na temperatura de *liquidus* da mistura. No entanto, altos índices de cálcio podem facilitar a cristalização do vidro, reduzindo a transparência do material (BACHA, M. G., 2017).

Além destes, outros componentes químicos, como alumina (Al_2O_3), óxido de magnésio (Mg) e óxido de potássio (K_2O) podem ser incorporados no sistema a fim de obter propriedades específicas, como aumento de resistência mecânica, diminuição do coeficiente de expansão térmico, dificuldade de cristalização (SHELBY, J. E., 2005).

Elementos de transição, como Ferro (Fe), Cobalto (Co), Manganês (Mn), Cobre (Cu) e Cromo (Cr) também podem ser adicionados ao vidro para modificar sua coloração e conferir propriedades funcionais específicas. O ferro, por exemplo, pode estar presente no vidro em diferentes estados de oxidação, influenciando sua cor e comportamento elétrico. Quando presente na forma Fe^{3+}, o ferro resulta em colorações amareladas ou amarronzadas. Já a forma Fe^{2+}, o ferro confere tonalidades esverdeadas ou azuladas e pode tornar o vidro um semicondutor do tipo p (AMARA; HAMMAMI; FAKHFAKH, 2019).

Dessa forma, a formulação do vidro soda-cal-sílica pode ser ajustada para atender a requisitos específicos, variando sua composição química conforme as propriedades desejadas, ampliando as possibilidades de aplicação desse material na indústria (BACHA, M. G., 2017).

As Tabela 2 apresenta composições típicas para diferentes sistemas de vidros aplicados em certas áreas.

Tabela 2- Composições típicas de vidros para aplicações específicas (% em massa).

Vidros	SiO_2	B_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Li_2O	SrO	BaO	ZnO	PbO	TiO_2	ZrO_2	As_2O5	SO_3
Obsídia	74,6	-	4	4,7	0,8	0,08	14,2	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Austrália	70,4	-	1,6	2,5	2,9	2,2	14,3	5,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lunar glass	54,5	-	0,1	<0,1	0,2	23,0	0,1	21,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Egito (1500 a.C)	67,8	-	16,0	2,1	3,8	2,9	3,2	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Itália (900 d.C)	77,8	-	6,4	8,7	2,1	0,7	2,2	0,8	-	-	-	-	-	-	-	*	*
Recipiente	67-74	-	13-18	0-0,6	6-10	0-3,7	2-4	0-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glazing	71-73	-	13-15,5	0-1	6,5-12	2-4,5	0-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lã de vidro	59-65	3,5-4,5	11-17	0,5-1	8-16,0	2,5-5,5	2-4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nonex	73	16,5	4,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pyrex	80,5-81	12,5-12,9	3,8-4,5	0,4	-	-	2-2,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-glass	53,2-54	9,2-12,9	-	0-1	17,4-17,5	4,4-4,5	14-14,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-glass	65	-	-	-	-	10	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sílica vítrea	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Janela	73	-	13,7	0,1	8,8	3,8	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
Lâmpada	73,6	-	15,5	0,6	5,2	3,6	1	-	-	-	-	-	-	-	-	*	0,5
Louça	74,0	-	17,5	-	7,5	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
Fármaco	72	11,0	8,1	1,0	1,0	-	5,0	-	-	-	2,0	-	-	-	-	-	-
Borossilicato	69,6	10,9	8,4	8,4	-	-	10,9	-	-	-	2,5	-	-	-	-	0,3	-
Cristal	59,6	-	3,3	10,9	1,3	-	-	-	-	-	-	-	24,4	-	-	0,5	-
Comingware	69,7	-	0,4	0,2	-	2,6	17,8	-	2,8	-	-	1,0	4,7	-	0,1	0,6	-
Vidros *Flint*	49,8	-	1,2	8,2	-	-	0,1	-			13,4	8,0	18,7	-	-	0,5	-

* Elemento traço

Fonte: BOURHIS, E. L., 2014; VARSHNEYA, A. K., MAURO, J. C., 2019 (ADAPTADA).

3.7.2 Vidro preto

Vidros pretos do tipo soda-cal-sílica são comumente produzidos a partir da incorporação de diferentes metais de transição, sendo alguns deles apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Vidros pretos do tipo soda-cal-sílica obtido a partir de diferentes percursores.

Metal de transição	Teor incorporado (% em massa)	Referência
Cobre (Cu)	2-10	RIVERA, E.; MARQUEZ, H., CELAYA, L. E. (1992)
Selênio (Se)	5 + (10% de Cu)	RIVERA, E.; MARQUEZ, H., CELAYA, L. E. (1992)
Manganês (Mn)	5+ (10% de Cu)	RIVERA, E.; MARQUEZ, H., CELAYA, L. E. (1992)
Cobalto (Co)	20	COLAK, S. C. (2018)
Cromo (Cr)	-	AFRICAN PEGMATITE

Fonte: Autor, 2022.

É possível notar, pelos dados encontrados na literatura, que há a necessidade de incorporação de altos teores de metais de transição para obter-se vidros pretos. A vantagem da utilização do ferro, em comparação aos outros, é a sua abundância na crosta terrestre, facilitando assim a obtenção de matéria-prima.

Vidros pretos, em geral, são amplamente empregados em objetos decorativos e na construção civil. Comparando-se com os vidros incolor, verde e âmbar, o vidro preto possui a capacidade de ser usado em janelas e portas em que haja a necessidade de garantir a privacidade do ambiente. Além disso, o mesmo fornece um sentimento de elegância quando empregado, podendo ser aplicado em superfície de mesas, armários, placas informativas, relógios, entre outros.

Outra vantagem acerca do uso de vidros pigmentados com óxido de ferro, como o vidro verde, é a sua capacidade de proteger líquidos e alimentos contra certos espectros de radiações ultravioletas (UV), podendo ser aplicados em recipientes vítreos. Vidros com sulfeto de ferro ($FeSO_3$), cromóforo do vidro âmbar, por sua vez, absorvem todo o espectro do UV e parte do espectro visível, sendo considerados as melhores opções para este tipo de aplicação (FRANCO, I., FALQUE, E., 2016; GULOYAN, Y. A., 2005).

3.7.2.1 Aspectos sobre a reciclagem de vidros

Segundo informações da Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO), o vidro é um material sustentável, podendo ser totalmente reciclado infinitas vezes, sendo a única “limitação” desse processo a de separação por pigmento e por composição química presente no produto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO, 2019).

Atualmente, são fabricados, em larga escala, 3 grandes classes de vidros soda-cal-sílica, sendo elas: incolor, verde e âmbar. De acordo com a Owens-Illinois, uma das maiores fabricantes de vidro no mundo, o principal objetivo da reciclagem deste material é o de reinseri-lo no fundido, diminuindo a quantidade de matéria-prima a ser utilizada durante o processamento. Segundo eles, existem empresas que produzem componentes vítreos utilizando até 40% de vidro reciclado e 60% de composto virgem. Outro dado importante a ser ressaltado é que a cada 10% em peso de vidro reciclado incorporado no fundido, durante o processamento, são reduzidos em 5% a taxa de emissão de CO_2 e 3% o consumo de energia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO, 2019).

Por ter como objetivo a adição do material reciclado como matéria-prima para a fabricação de novos artigos vítreos semelhantes aos anteriores, as empresas devem separar os vidros de acordo com as três classes citadas anteriormente, de modo que não haja acréscimo no teor de metais de transição na mistura, alterando o pigmento do produto final. Diferentemente, o vidro preto é totalmente reciclado sem haver a necessidade de ser separado das demais cores, uma vez que, este possui um teor elevado de óxido de ferro e, portanto, a adição de maiores teores deste mesmo metal de transição advindos do vidro verde ou âmbar não irão afetar significativamente a cor do produto final obtido.

Sendo assim, o uso do RMF para a produção de vidros pretos, em especial do tipo soda-cal-sílica, é apresentado como um método de aproveitamento do rejeito inédito e que promove total sustentabilidade, uma vez que, é retirado um material poluente que gera riscos a populações, faunas e floras locais, sem valor econômico e, que o seu descarte gera custos adicionais para as mineradoras, transformando-o em um produto amplamente empregado e passível de reciclagem sem apresentar quaisquer limitações.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

O rejeito de minério de ferro (RMF) utilizado neste trabalho foi coletado na Mina da Conceição em Itabira, Minas Gerais. A mina da Conceição faz parte do Complexo de Itabira junto com as minas Cauê, Periquito, Dois Córregos, Onça, Camarinha e Chacrinha, todas pertencentes à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD).

Após a coleta do material, o rejeito foi transportado até Foz do Iguaçu, no Paraná, onde foi seco a 100ºC em uma estufa por 72 horas. O pó (Figura 7) foi então separado em pequenas quantidades para a realização dos ensaios de granulometria, fluorescência por raios X (FRX), difração de raios X (DRX), termogravimetria (TG), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), além da microanálise por espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).

Figura 7 – Pó seco do rejeito de minério de ferro utilizado neste trabalho.

Fonte: Autor, 2022.

4.2 REAGENTES

As composições dos sistemas vítreos foram ajustadas por meio do uso de reagentes, indicados na Tabela 4, fornecidos pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e pela Universidade da Integração Latino-Americana (UNILA). Todos os reagentes apresentados foram utilizados sem nenhum tratamento prévio.

Tabela 4 - Reagentes usados durante a síntese dos vidros soda-cal-sílica.

Reagente	Fórmula química	Fabricante	Pureza (%)*
Quartzo	SiO_2	Mineração Jundu S.A	99
Alumina	Al_2O_3	Elfusa	99,5
Carbonato de cálcio	Ca_2CO_3	*LabSynth*	98
Carbonato de sódio	Na_2CO_3	*LabSynth*	99
Carbonato de potássio	K_2CO_3	*Lafan*	98
Óxido de magnésio	MgO	*LabSynth*	96

*Pureza mínima.

Fonte: Autor, 2022.

4.3 MATERIAIS VÍTREOS

Os vidros do tipo “soda-cal-sílica” foram produzidos utilizando composições de recipientes vítreos previamente descritas na literatura por Bourhis (2014). A Tabela 5 apresenta as composições das misturas utilizadas para produzir as amostras de vidros incolores (I-1) e pretos (P-1) durante o estudo.

Tabela 5 - Composição dos vidros de soda-cal-sílica (% em peso).

Nome	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Fe_2O_3 (g/ 100g de vidro)
I-1	68	18	10	2	1	1	-
P-1	68	18	10	2	1	1	16,56

Fonte: Autor, 2022.

Para o vidro incolor (I-1), foi utilizado o reagente de quartzo proveniente da Mineração Jundu, o qual possuía uma baixa porcentagem de impurezas. O vidro preto (P-1), por sua vez, foi produzido a partir do rejeito, não havendo necessidade de adicionar reagentes nem de sílica e nem de óxido de ferro.

As misturas, dispostas em recipientes plásticos, foram homogeneizadas em um moinho de jarros *MA 550/CF* adaptado (Figuras 8), por 24 horas. Posteriormente, estas foram fundidas em um forno elétrico (Figura 9) com atmosfera de ar, em um cadinho de platina a 1500ºC, onde permaneceram por 2 horas com o intuito de obterem-se vidros homogêneos. As amostras foram então vazadas em um molde pré-aquecido de grafite (Figura 10), seguido do recozimento a 500ºC por 2 horas no forno da marca *Jung*, modelo 4955, para evitar o surgimento de trincas causadas por choque térmico.

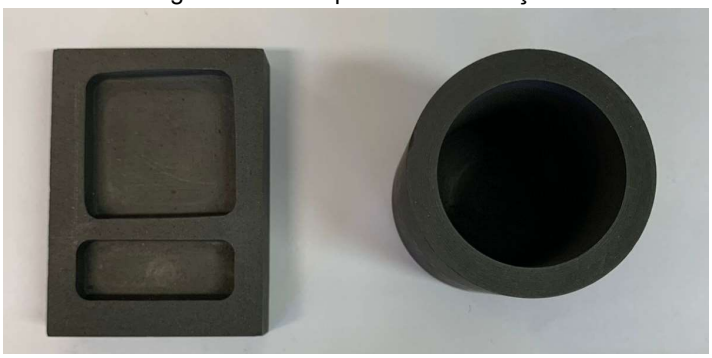
Figura 8 – Moinho de jarros modelo *MA 550/CF*.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 9 – Forno elétrico de fusão com atmosfera de ar.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 10 – Moldes de grafite usados para a conformação das amostras vítreas.



Fonte: Autor, 2022.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do RMF foi efetuada por peneiramento a seco conforme a NBR 7181, em um agitador de peneiras, durante 20 minutos, com aberturas em mm de: 2,4 / 1,2 / 0,6 / 0,42 / 0,3 / 0,15 / 0,075, como indicado na Figura 11.

Figura 11 – Equipamento e peneiras usados durante o ensaio.

Fonte: Autor, 2022.

4.4.2 Microscopia eletrônica de varredura e microanálise

A caracterização morfológica e a distribuição do tamanho de partícula dos materiais foram verificadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para isso, as amostras foram recobertas por uma fina camada de ouro tornando a superfície condutora de elétrons, sendo então analisadas no microscópio *EVO-MA10*, da *Zeiss*, acoplados a um sistema de análise espectroscópica por energia dispersiva de raios X (EDS), o que permitiu analisar a composição superficial das amostras qualitativamente.

4.4.3 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A composição química do RMF foi determinada pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Para isso, amostras com granulometria < 20 μm foram selecionadas e conformadas como pastilhas após fusão com a adição dos fundentes metaborato e tetraborato de lítio (80-20%, m/m) em cadinho de platina. As análises foram realizadas em um espectrômetro de fluorescência de raios X sequencial *Philips*, modelo PW 2404. A intensidade de um conjunto de linhas foi medida com o aplicativo *SUPERQ* e correções de efeito matriz foram efetuadas com o aplicativo *UNIQUANT*.

4.4.4 Difração de raios X (DRX)

A fim de avaliar as fases cristalinas presentes no rejeito de minério de ferro bem como a ausência de fases cristalinas nas amostras vítreas, foi realizada uma análise de difração de raios X (DRX). As análises de DRX foram realizadas na forma de pó utilizando o difratômetro multi-propósito EMPYREAN, da PANalytical, com radiação CuKα (λ = 0,15418 nm). Os difratogramas foram obtidos na faixa de 2θ de 5 a 100°, em modo contínuo, a 10°/min.

4.4.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF)

Informações adicionais sobre a estrutura do RMF foram obtidas por espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (IVTF), utilizando-se, pastilhas de KBr em um espectrômetro *Frontier MIR+SP10 Std*, da *Perkin Elmer* com resolução de 4 cm^{-1}, incluindo a faixa de 2000 a 400 cm^{-1}. Os espectros foram coletados com pelo menos 25 varreduras.

4.4.6 Termogravimetria (TG)

A análise termogravimétrica do rejeito de minério de ferro foi realizada no equipamento STA-800, da *PerkinElmer* sob atmosfera inerte de nitrogênio, com fluxo de gás de ~ 20 mL/min. A análise envolveu aproximadamente 5 mg de amostra e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min desde a temperatura ambiente até 1000 °C.

4.4.8 Densidade

A densidade dos vidros fabricados foi estimada pelo princípio de Arquimedes. A massa do material foi medida na balança analítica da *Bioscale* e o volume deslocado foi aproximado com uma proveta preenchida com água destilada. A densidade foi então calculada utilizando a seguinte equação (1):

$$densidade\ (\rho) = \frac{massa_{\ amostra}}{volume_{\ deslocado}} \quad (1)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (RMF)

5.1.1 Análise granulométrica

A Tabela 6 apresenta a distribuição granulométrica do RMF a partir do peneiramento do material particulado e seco. O resultado obtido indica que o rejeito se trata de um material fino, formado apenas com partículas inferiores a 600 µm com destaque para as maiores porções que se encontram abaixo de 300 µm, como: 29,12% das partículas com tamanhos entre 300 e 150 µm e 38,47% entre 150 e 75 µm.

Tabela 6 – Dados obtidos sobre o RMF a partir do ensaio de peneiramento.

Abertura (µm)	Malha (Mesh)	Peso retido (g)	% Retido
1200	16	0	0
600	30	0	0
420	40	1,03	0,69
300	50	0,61	0,41
150	100	43,69	29,12
75	200	57,71	38,47
	Fundo	46,98	31,32
	Total	150,02	100

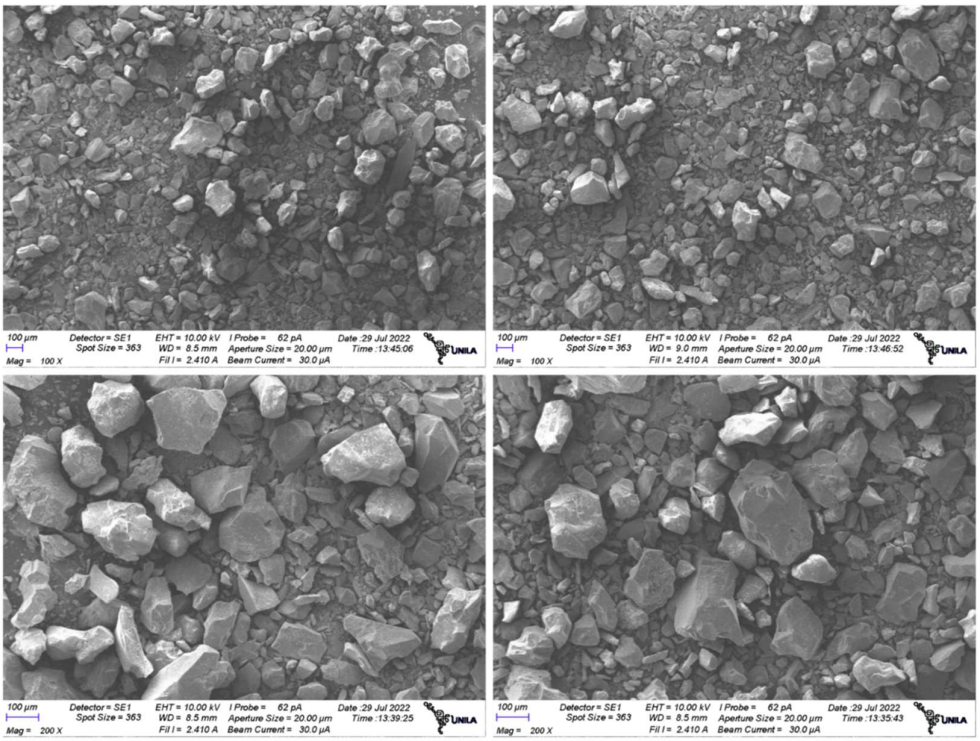
Fonte: Autor, 2022.

Pela tabela, é possível ver que cerca de 30% do material ficou retido no fundo, indicando que uma grande parcela do RMF tinha granulometria inferior a 75 µm. Nesse caso, seria interessante realizar novamente o peneiramento do material, porém, dessa vez, utilizando peneiras de menor granulometria para obter uma melhor ideia a respeito da distribuição granulométrica do RMF. Como essa opção não era possível de ser realizada com os equipamentos fornecidos pela Universidade, foi estimado o tamanho de partículas também por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de comparar com os resultados obtidos no peneiramento.

5.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias obtidas pelo MEV a partir das superfícies do RMF estão apresentadas na Figura 12. Conforme a norma americana ASTM F1877, que descreve a caracterização de partículas por meio de imagens, o RMF é formado majoritariamente por partículas granulares, irregulares e grosseiras.

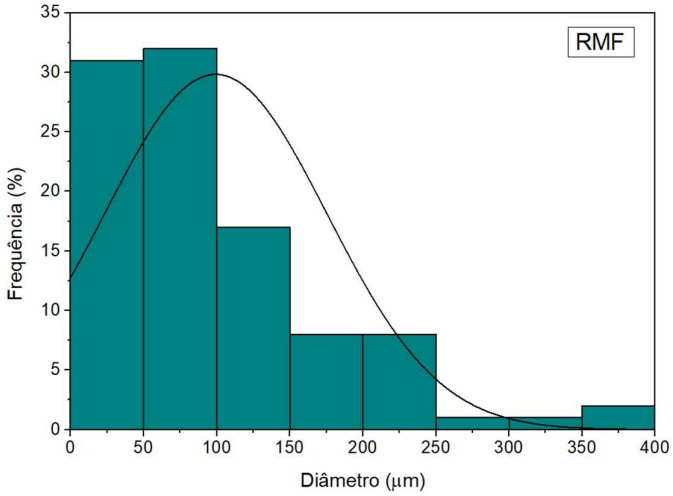
Figura 12 – Micrografias fornecidas pelo MEV da superfície do RMF.



Fonte: Autor, 2022.

Como descrito anteriormente, o MEV foi realizado com o intuito de avaliar também a distribuição granulométrica das partículas do RMF, uma vez que, grande parte do material ficou retido no fundo da peneira. O resultado está disposto no Gráfico 3 abaixo.

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica do RMF calculada por análise de imagens do MEV.



Fonte: Autor, 2022.

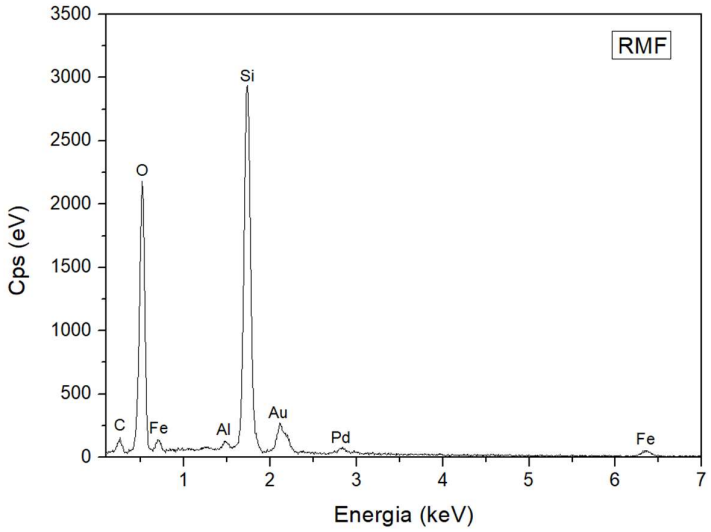
Comparando os dados de distribuição granulométrica apresentados no Gráfico 3 com os resultados obtidos pelo peneiramento a seco, detalhados na Tabela 6, observamos uma correlação consistente entre os dois métodos. Ambas as técnicas indicam uma predominância de partículas na faixa granulométrica entre 50 µm e 150 µm. No entanto, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou uma presença mais significativa de partículas finas abaixo de 50 µm, que não foram plenamente detectadas pelo peneiramento a seco devido às limitações das malhas das peneiras utilizadas.

5.1.2.1 Microanálise de espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS)

Em conjunto com MEV foi realizado uma análise EDS. O EDS é uma técnica que avalia somente qualitativamente a presença de certos elementos químicos na superfície do material. Apesar disso, podemos interpretar a intensidade dos picos como um indício de que certos elementos se apresentam em maiores quantidades do que outros.

O espectro obtido a partir da amostra de RMF está apresentado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Espectograma por energia dispersiva de raios X do RMF.



Fonte: Autor, 2022.

Devido ao fato de o RMF ser proveniente de uma região onde o itabirito é tipicamente extraído, esperava-se a presença de picos de sílica e óxido de ferro. A intensidade do pico de sílica indica uma quantidade significativa deste elemento no material analisado. Em termos de tamanho, os maiores picos, após os de sílica, são os de ferro e alumínio, indicando uma quantidade razoável desses materiais na amostra, corroborando com a origem do RMF. Esses resultados estão de acordo com os obtidos na espectrometria de fluorescência de raios X (seção 5.1.3), onde os teores mais significativos são de sílica, óxido de ferro e óxido de alumínio, respectivamente.

Por fim, observa-se um pico significativo de ouro, que representa o recobrimento usado para analisar a amostra e, portanto, não faz parte da sua composição real.

5.1.3 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A composição química do rejeito de minério de ferro foi avaliado quantativamente por meio da espectrometria de fluorescência de raios X e o resultado encontrado está exposto na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do RMF (% em peso).

Fase mineral	Teor (%)
SiO_2	79,78
Fe_2O_3	19,42
Al_2O_3	0,22
MgO	<0,1
Na_2O	<0,1
CaO	0,08
TiO_2	0,06
MnO	0,04
P_2O_5	0,01
SO_3	<0,01
K_2O	<0,01
Cr_2O_3	<0,01
ZrO	<0,01
* Perda ao fogo (PF)	0,22

*Perda ao fogo a 1000ºC

Fonte: Autor, 2022.

Como descrito anteriormente nas seções 2.2 e 4.1.2.1 deste trabalho, era esperado que houvessem quantidades significativas de sílica na composição química do RMF, uma vez que, este é proveniente de uma região típica de extração de itabiritos. Por ser um rejeito de extração de minério de ferro, espera-se também que o teor de óxido de ferro seja razoável, menor, preferencialmente, a 20%, garantindo a eficiência do processo.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos, foram avaliadas e descritas na Tabela 8 a composições químicas de RMF's extraídos em diferentes locais do mundo.

Tabela 8 - Composição química de rejeitos de minério de ferro provenientes de diferentes minas segundo autores (% em peso).

Local	Composição química de RMF's (% em massa)													Referências
	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	Na_2O	CaO	TiO_2	MnO	P_2O_5	SO_3	K_2O	Cr_2O_3	ZrO	
Mina da Conceição - Itabira, MG (Brasil)	**78,78**	**19,42**	**0,22**	**<0,1**	**<0,1**	**0,08**	**0,06**	**0,04**	**0,01**	**<0,01**	**<0,01**	**<0,01**	**-**	**Autor (2022)**
Quadilátero Ferrífero - MG (Brasil)	84,66	13,75	0,77	<0,1	<0,1	0,03	-	-	-	-	0,06	-	-	Figueiredo, R. (2021)
	82,97	15,88	0,30	<0,1	<0,1	0,01	-	-	-	-	<0,01	-	-	
	81,64	16,45	0,73	<0,1	<0,1	0,02	-	-	-	-	<0,01	-	-	
Brasil	75,42	23,72	0,23	0,10	0,13	0,05	0,02	0,01	0,01	-	0,02	0,01	-	Nociti, D (2021)
	41,15	53,83	1,76	0,18	0,10	0,13	0,05	0,07	0,08	-	0,06	0,01	-	
Shougang Mining Company - (China)	68,94	14,54	3,64	3,77	-	3,45	-	-	-	0,75	-	-	-	Liu, W. et al (2011)
Samarco Mineração S.A - Belo Horizonte, MG (Brasil)	67,96	21,99	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Carrasco, E. et al (2017)
	45,72	34,26	2,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Barragem de Fundão - Mariana, MG (Brasil)	58,6	35,4	3,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,2	-	-	Chechin, L. (2021)
Mount Gibson Iron - Perenjori (Austrália)	57,31	25,13	9,58	0,08	0,04	0,03	0,61	-	-	0,16	0,04	-	-	Kuranchie, F. (2016)
Johor (Malásia)	56	8,3	10	-	-	4,3	-	1,7	-	-	1,5	-	-	Shettima, A. (2016)
Barragem de Fundão - Mariana, MG (Brasil)	54,7	39,1	3,3	0,1	<0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,1	0,2	-	-	Nascimento, D. (2018)
Usina Cadonga - Rio Doce, MG (Brasil)	52,84	25,74	15,56	2,89	-	0,47	0,56	0,15	-	0,15	0,55	0,08	0,01	Lorenzini, L. (2022)
Índia	51,12	44,36	1,22	-	-	0,22	-	-	-	-	-	-	-	Das, S. Et al (2000)
Yeshan Mining Ore Companny - Nanjing (China)	34,70	12,30	16,22	8,92	0,54	7,63	0,3	0,13	-	-	1,52	-	-	Duan, P. Et al (2016)
Brasil	24,19	45,92	4,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Fontes, W. Et Al (2018)

Fonte: Autor, 2022.

Segundo dados da USGS (2013), Brasil, Austrália e Índia são países que possuem teores elevados de ferro em seus minerais, atingindo valores entre 48,6 a 64,3%. Esse fato pode explicar a razão dos seus rejeitos possuírem teores elevados de hematita na sua composição, uma vez que, não há a necessidade de se realizar um rigoroso processo de beneficiamento para obter-se o produto final. Como resultado, o processo de extração se torna menos eficiente e mais propenso a desperdícios.

Em contrapartida, os minerais na China possuem cerca de 31,3% de ferro na sua composição, o que justifica o baixo teor de hematita nos seus RMF's.

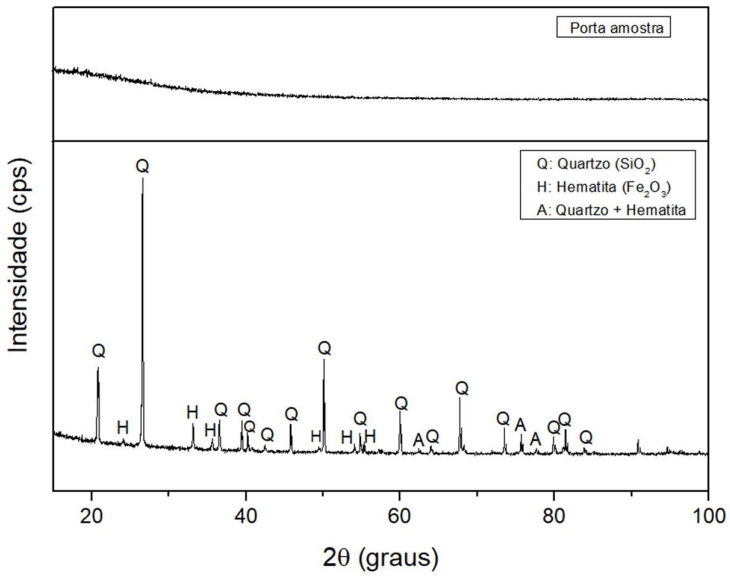
De um modo geral, o RMF apresentado neste trabalho possuiu composição química próxima aos relatados anteriormente na literatura brasileira, sendo constituídos principalmente por sílica (acima de 70%), seguido por hematita (25%), alumina (<1%) e outros óxidos (<1%).

A partir da composição química datada, avalia-se a possibilidade de transformar o RMF em um material vítreo. O seu alto teor de sílica assegura a capacidade deste material formar vidros, visto que este componente é um ótimo formador de rede. Por outro lado, a elevada quantidade de hematita presente no material pode garantir a oportunidade de produzir vidros pretos.

5.1.4 Difração de raios X (DRX)

Os difratogramas do rejeito do minério de ferro e do porta amostra de silício amorfo são descritos no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Difratogramas do porta-amostra de silício monocristalino e do RMF.



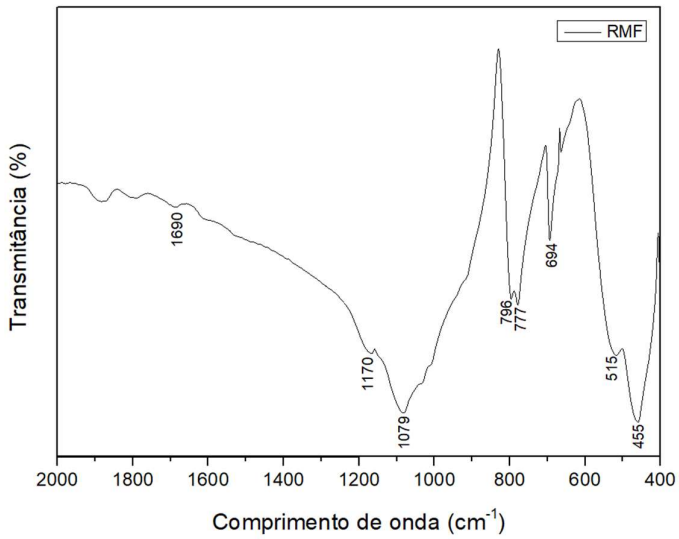
Fonte: Autor, 2022.

No difratograma do RMF podemos observar um halo, característico de material não cristalino, entre 10 a 20ºC, referente ao porta amostra de silício monocristalino utilizado durante o ensaio. Desconsiderando esse fato, o difratograma indicou que o RMF se trata de uma amostra cristalina com picos estreitos, bem definidos e intensos, sendo as fases encontradas observar picos de quartzo (Q), hematita (H) e picos referentes a ambas as fases (A). É válido ressaltar que o quartzo e a hematita somam cerca de 99% da composição química do RMF e, por isso, os seus picos são passíveis de aparecerem no difratograma, enquanto fases cristalinas referentes a alumina, por exemplo, não irão aparecer devido ao seu baixo teor.

5.1.5 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF)

O espectrograma no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) do RMF é mostrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Espectrograma no infravermelho com transformada de Fourier do RMF.



Fonte: Autor, 2022.

As atribuições referentes a cada pico está exposto na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 – Atribuições dos picos apresentados no espectrograma de FTIR.

Pico (cm^{-1})	Tipo de ligação
1690	H-O
1170 1079	Si–O (vibrações assimétricas do alongamento)
796 777	Si–O (vibrações simétricas do alongamento)
694	Si–O (flexão simétrica)
515	Si–O
455	Si–O (flexão assimétrica)

Fonte: SAIKIA, B. J. et Al (2008); SAIKAI, B. J.(2014); GADSDEN, J. A.(1975); HLAVAY, J. et al. (1978); HAZEN, R. M., FINGER, L. W. (1982); STELLING, J., et al. (2011) (ADAPTADA).

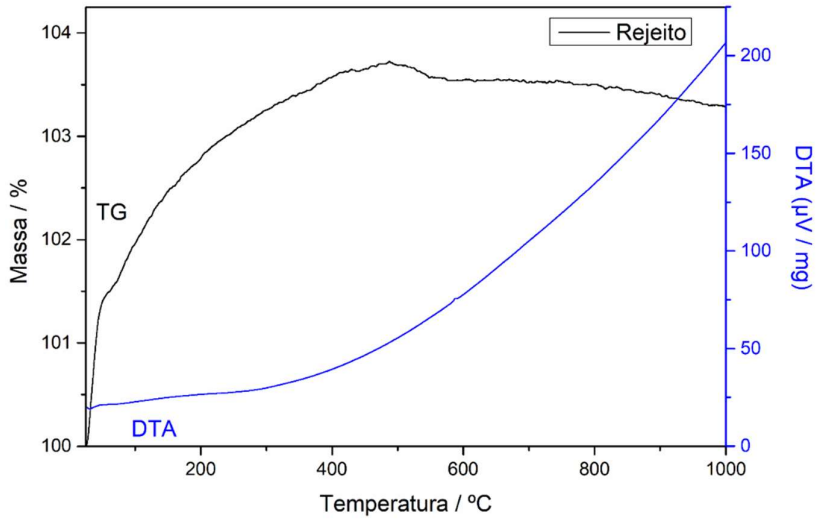
Como mostrado acima, todos os picos encontrados são descritos como provenientes de ligações Si–O, elementos de maior concentração no RMF discutido, com exceção da banda em 1690 cm^{-1} que refere-se a ligação H–O, indicando que havia umidade no local do ensaio.

5.1.6 Termogravimetria (TG)

A termogravimetria teve por objetivo verificar a perda de massa relacionada a possível existência de matéria orgânica no RMF. O resultado obtido é descrito no Gráfico 7 abaixo e, por ele, é possível observar que não houve perda de massa durante o aquecimento do material até 1000ºC, comprovando que, de fato, não havia a presença de matéria orgânica, carbonatos, sulfatos ou nitratos no RMF. Esse mesmo resultado pôde ser observado na análise de espectrometria de fluorescência de raios X que indicou a existência de somente óxidos na composição química do material.

Outro fator importante a ser observado é a elevação da curva durante o aquecimento do RMF. Esse ganho de massa constante é atribuído a oxidação do ferro ao entrar em contato com o oxigênio presente na atmosfera do equipamento no decorrer do ensaio.

Gráfico 7 – Resultados obtidos a partir da análise termogravimétrica do RMF.



Fonte: Autor, 2022.

5.2 MATERIAIS VÍTREOS

Os vidros incolor (I-1) e preto (P-1) produzidos neste trabalho e de composição indicada na Tabela 5 são apresentados na Figura 13, 14 e 15.

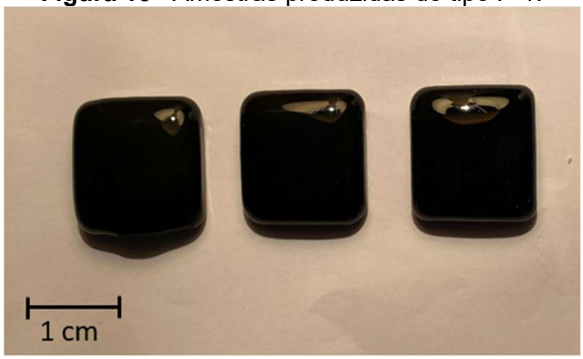
Figura 13 - Amostras de vidros incolor e preto.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 14 - Amostras produzidas do tipo I-1.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 15 - Amostras produzidas do tipo P-1.



Fonte: Autor, 2022.

Os vidros do tipo I-1, conforme indicado nas figuras, eram transparentes e incolores, pois o quartzo utilizado possuía um baixo teor de metais de transição. Já os vidros do tipo P-1, apesar de também serem transparentes, apresentavam uma coloração preta, o que pode estar relacionado ao alto teor de ferro presente no rejeito de minério de ferro (RMF).

A cor dos vidros é amplamente influenciada pelos chamados cromóforos, espécies químicas capazes de absorver determinadas faixas do espectro luminoso, resultando na tonalidade final do material. Kenneth Shaw, em 1962, explicou como diferentes óxidos metálicos atuam como cromóforos em vidros e esmaltes cerâmicos. O ferro, em especial, pode aparecer em diferentes estados de oxidação, como Fe^{2+} e Fe^{3+} a depender da temperatura de fusão, da atmosfera do forno e da presença de agentes oxidantes e redutores no sistema.

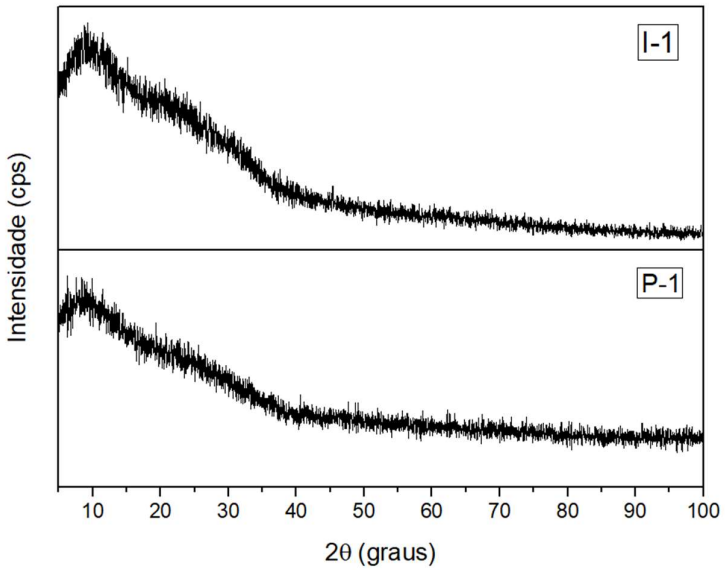
A presença desses estados de oxidação resultam em diversas cores no vidro e que, por sua vez, variam dependendo da sua concentração, do estado de oxidação e da composição do vidro. Concentrações mais altas de Fe^{2+} tendem a produzir colorações que variam de verde a marrom e, em alguns casos, dar ao vidro uma aparência preta. No entanto, apenas observar a cor preta a olho nu não é suficiente para confirmar que essa tonalidade é resultado da formação de cromóforos específicos. Para isso, é necessário realizar análises espectroscópicas mais específicas, como espectroscopia de absorção no UV-Visível, que permite identificar com precisão as espécies químicas responsáveis pela coloração.

Portanto, embora a aparência preta dos vidros P-1 sugira uma relação com a alta concentração de ferro no RMF, essa afirmação ainda precisa ser confirmada através de outras análises.

5.2.1 Difração de raios X (DRX)

Os difratogramas das amostras I-1 e P-1 estão descritos no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Difratogramas das amostras de soda-cal-sílica.



Fonte: Autor, 2022.

A ausência de picos intensos e estreitos indicam a ausência de fase cristalina da amostra, indicando que ambas eram vítreas.

Novamente, os halos presentes entre 10 e 20 graus são associados ao porta-amostra de sílica monocristalino e devem ser desconsiderados ao analisar o gráfico.

5.2.2 Densidade (ρ)

As densidades calculadas para os vidros I-1 e P-1 estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Densidades encontradas para os vidros I-1 e P-1.

Amostra	Densidade (g/cm^3)	Referência
I-1	2,56	Autor, 2022
P-1	2,81	Autor, 2022
Soda-lime-cal	2,44 – 2,49	ASHBY, M. F., 2013

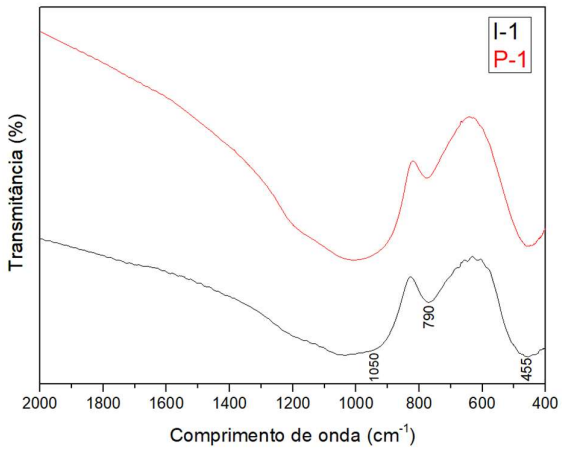
Fonte: Autor, 2022.

A densidade é uma das propriedades que variam de acordo com a concentração de certos compostos no sistema vítreo. O vidro I-1, por exemplo, teve valor semelhante ao encontrado na literatura (ASHBY, M. F., 2013). O vidro P-1, por sua vez, demonstrou um valor de densidade acima do comum, cerca de 9% acima do vidro I-1, devido ao alto teor de óxido de ferro na sua composição, o qual é um composto químico relativamente denso e de alta massa molar.

5.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF)

Os espectrogramas no infravermelho com transformada de Fourier (IVTF) das amostras vítreas são mostrados no Gráfico 9, enquanto as atribuições referentes a cada pico estão demonstradas na Tabela 11.

Gráfico 9 - Espectrograma no infravermelho com transformado de Fourier das amostras vítreas.



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 11 – Atribuições dos picos apresentados no espectrograma de FTIR.

Pico (cm^{-1})	Tipo de ligação
1050	Si–O (vibrações assimétricas do alongamento)
790	Si–O (vibrações simétricas do alongamento)
455	Si–O (flexão assimétrica)

Fonte: SAIKIA, B. J., PARTHASARANTHY, G., SARMAH, N. C. (2008); SAIKAI, B. J.(2014); GADSDEN, J. A.(1975); HLAVAY, J. et al. (1978); HAZEN, R. M., FINGER, L. W. (1982) ; STELLING, J., et al. (2011) (ADAPTADA).

Assim como apresentado na seção 5.1.5, todos os picos encontrados são descritos como provenientes de ligações Si–O, elementos de maior concentração nos vidros estudados.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Este estudo avaliou a viabilidade do uso do rejeito de minério de ferro (RMF) como matéria-prima para a produção de vidros pretos do tipo soda-cal-sílica. A análise de espectrometria de fluorescência de raios X revelou um alto teor de sílica e óxido de ferro (Fe_2O_3) no RMF, corroborando com as fases de quartzo e hematita encontradas na difração de raios X (DRX) e adequadas para a formulação vítrea.

A análise granulométrica indicou que o RMF é formado majoritariamente por partículas finas, resultantes do processo de beneficiamento do minério, com diâmetros entre 50 a 150 μm.

A fusão foi realizada a 1500ºC por 2 horas, seguida de recozimento a 500ºC, demonstrando que a incorporação do RMF não alterou significativamente a temperatura de *liquidus* do sistema, permitindo a obtenção de vidros pretos em condições semelhantes às do vidro incolor. O tratamento térmico prévio dos reagentes de carbonatos ou o uso de agentes de refino foram essenciais para a obtenção de vidros sem bolhas na superfície.

Os vidros do tipo I-1 eram transparentes e incolores, devido ao baixo teor de metais de transição no quartzo utilizado. Já os vidros do tipo P-1 apresentavam coloração preta, possivelmente relacionada à alta concentração de ferro presente no RMF. No entanto, para confirmar a presença de cromóforos responsáveis por essa coloração, são necessárias análises espectroscópicas detalhadas, como espectroscopia de absorção no UV-Visível.

A densidade do vidro preto foi aumentada em 9% pela alta concentração de óxido de ferro em seu sistema, enquanto o vidro incolor apresentou valor semelhante ao encontrado na literatura.

Conclui-se, portanto, que o RMF pode ser utilizado como precursor na fabricação de vidros, sendo uma excelente oportunidade para a redução do volume de rejeito gerado pelas mineradoras, além de assegurar-lhe valor econômico.

7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Recomenda-se como pesquisas futuras:

- Realização de análises de espectrofotometria UV-Vis, a fim de avaliar os cromoforos presentes nos vidros, bem como a sua capacidade de absorção de luz;
- Estudar a possibilidade da sua aplicação em recipientes vítreos para líquidos e alimentos;
- Verificação da influência do óxido de ferro na resistência mecânica do vidro fabricado;
- Produção de novas amostras utilizando-se o RMF e precursores de sulfatos, a fim de obter-se vidros pretos a partir de vidros âmbares;
- Cristalização as amostras elaboradas e, consequente, identificação das fases formadas e suas respectivas propriedades;
- Sintetização de vitrocerâmicas magnéticas a partir do uso do rejeito de mineração de ferro;

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração, Rio de Janeiro, 1987. **Anais [...]** Rio de Janeiro, 1987. v.1, p.1-9.

AFRICAN PEGMATITE. Soda-Lime Glass: Production Process and Method of Coloring. Página de "**Industry Resources**". Disponível em: < https://mineralmilling.com/soda-lime-glass-production-and-glass-colour/>. Acesso em: 02 de outubro de 2022.

AMARA, C. B., HAMMAMI, H., FAKHFAKH, S. Effect of iron oxide on the electrical conductivity of soda-lime silicate glasses by dielectric spectroscopy. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, p.13543-13555, 2019.

AMARAL, L., MENEZES, L. Minerais. Página de "**Ferro**". Disponível em: < http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/>. Acesso em: 05 de outubro de 2022.

ASHBY, M. F. Material profiles. **Materials and the Environment (Second Edition),** p. 459-595. Elsevier, 2013.

VALE PRODUZ AREIA SUSTENTÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA. **Agência Brasil**, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2022-03/vale-produz-areia-sustentavel-para-pavimentacao-asfaltica>. Acesso em: 05 de outubro de 2022.

ALMADA, B. S. **Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2021.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2014.

BACHA, M. G. **Sinterização de vidro soda-cal-sílica comercial assistida por campo elétrico.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2017.

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.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2017.

BOURHIS, E. L. **Glass: Mechanics and Technology.** 2ª Edição. Weinheim: Wiley.VCH, 2014.

BRASIL. **Agência Nacional de Mineração.** Portaria da ANM nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Brasília, 2017.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência E Engenharia De Materiais,** 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2012.

CAMPANHA, Â. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (UFV), Viçosa, 2011.

CARVALHO, P. S. L. et al. Minério de ferro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, Março/2014.

CARRASCO, E. V. M., MAGALHAES. M. D. C., SANTOS. W. J. D., ALVES. R. C., MANTILLA, J. N. R. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials,** v. 131, p. 31–38, Janeiro/2017.

CASO SAMARCO: MINISTÉRIOS PÚBLICOS E DEFENSORIAS PÚBLICAS PEDEM RETOMADA DO TRÂMITE DA AÇÃO QUE PEDE REPARAÇÕES DE R$155BI PELOS DANOS CAUSADOS COM O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO. **Ministério Público de Minas Gerais**, 2020. Disponível em: <https://www.mpmg.mp.br/comunicacao/noticias/caso-samarco-ministerios-publicos-e-defensorias-publicas-pedem-retomada-do-tramite-da-acao-que-pede-reparacoes-de-r-155-bilhoes-pelos-danos-causados-com-o-rompimento-da-barragem-de-fundao.htm>. Acesso em: 03 de agosto de 2022.

CECHIN, L**. Análise da viabilidade técnica da produção de compósitos cerâmicos utilizando resíduos de minério de ferro da barragem do Fundão e escória de alto-forno à carvão vegetal.** Tese (Doutorado). Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2021.

CSN Mineração. Minério de Ferro. Página de "**A companhia**". Disponível em: <https://ri.csnmineracao.com.br/a-companhia/minerio-de-ferro/>. Acesso em: 27 de agosto de 2022.

COELHO, E. F. F. **Estudo do comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro reforçados com fibras sintéticas.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2008.

COLAK, S. C., ARAL, E. Optical and thermal properties of P2O5–Na2O–CaO–Al2O3: CoO glasses doped with transition metals. **Journal of Alloys and Compounds,** v. 509, p. 4935-4939, 2011.

DAS, S. K., KUMAR, S., RAMACHANDRARAO, P. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. **Waste Management,** v. 20, n. 8, p. 725–729, Dezembro/2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sumário mineral.** Belo Horizonte, 2014.

DESCOUENS, D. Siderite late 1800s Redruth. **Wikimedia Commons**, 2015. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Siderite_late_1800s_Redruth.jpg>. Acesso em: 27 de agosto de 2022.

DUAN, P., YAN, C., ZHOU, W., REN, D. Fresh properties, compressive strength and microstructure of fly ash geopolymer paste blended with iron ore tailing under thermal cycle. **Construction and Building Materials,** v. 118., n. 15, p.76-88, Agosto/2016.

EDRAKI, M. et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 411-420, Dezembro/2014.

FERRAZ, F. **Disposição de rejeitos de mineração: Aperfeiçoamento técnico dos serviços de engenharia em atividades de mineração.** Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro preto, 1993.

FERREIRA, M. R. A. **Avaliação ambiental para o aproveitamento de rejeito de minério de ferro: estratégia para redução de disposição de rejeitos em barragens de contenção e redução dos riscos aos recursos hídricos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídrico, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itabira, 2020.

FIGUEIREDO, R. A. M. **Rejeitos de minério de ferro na produção de geopolímeros one-part: utilização como *filler* e na produção de silicato de sódio alternativo.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2021.

FILIPPOV, L. et al. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic

FONTES, W. C. **Studies on the use potential of iron ore tailings as alternative raw material in manufacture of ceramic and hydraulic tiles.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2018.
flotation. **International Journal of Mineral Processing,** v. 127, p. 62-69, Março/2014.

FRANCO, I., FALQUE, E. Effect of Different Types of Glass Container on Food Shelf Life. **Reference Module in Food Science,** 2016.

FRANCO, L. C. et al. Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. In: **Congresso Brasileiro de Concreto**, 56., 2014., Natal.

FREIRE, C. B. **Utilização de resíduos da exploração do itabirito em pavimentos intertravado.** Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Ouro Preto, 2012.

HAZEN, R. M., FINGER, L. W. **Comparative Crystal Chemistry: Temperature, Pressure, Composition and the Variation of Crystal Structure,** 1ª Edição. Londres: J. Wiley & Sons, 1982.

HLAVAY, J. et al. Characterization of the particle ize and the crystallinity of certain Minerals by IR spectrophotometry and other instrumental methods—II. Investigations on quartz and feldspar. **Clays and Clay Minerals,** v. 26, p. 139–143, 1978.

HUANG, X., RANADE, R., LI, V. Feasibility study of developing green ECC using iron ore tailings powder as cement replacement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 7, Julho/2013.

GADSDEN, J. A. The infrared spectra of minerals and related inorganic compounds. **Mineralogical Magazine,** p. 277, 1975.

GEOLOGY SCIENCE. **Minério de Ferro (Fe),** 2023. Disponível em: <https://pt.geologyscience.com/minerais-de-min%C3%A9rio/min%C3%A9rio-de-ferro/>. Acesso em: 03 de julho de 2024.

GERMANY, D. J. A mineração do Brasil: relatório final. **Secretaria técnica do fundo setorial mineral.** Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, R.C., ARAÚJO, L.G., OLIVEIRA FILHO, W.L. NOGUEIRA, C.L., RIBEIRO, S. G. S. **Projeto executivo de disposição de rejeitos de minério de ferro em pilhas na Cavado Germano.** Convênio UFOP/Samarco, 1999.

GOVERNO DE MINAS GERAIS. **Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão,** 2024. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>. Acesso em: 03 de julho de 2024.

GOTTARDI, V. Glasses of the same composition but different properties. **Journal of Non-Crystalline Solids,** v. 49, n. 1-3, p. 461-469, Maio/1982.

GULOYAN, Y. A. Conditions for producing amber and brown glass. **Glass and Ceramics,** v. 62, n. 9-10, p. 301-303, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Setor Mineral 2020**. Belo Horizonte, 2021.

KURANCHIE, F. A., Shukla, S. K., HABIBI, D. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment,** v. 30, n. 2, p. 92–114, 2016.

LASCHEFSKI, K. A. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão. **AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 98, 2020. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/ambientes/article/view/23299>. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

LAVINSKY, R. M. Magnetite. **Wikimedia Commons,** 2010. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetite-278427.jpg>. Acesso em: 27 de agosto de 2022.

LIU, W. Y., XU. X. L., AN, Y. Y. Study on the Sprayed Concrete with Iron Tailings. **Advanced Materials Research**, v. 347–353, p. 1939–1943, 2011.

LORENZINI, L. **Obtenção de silicato de potássio a partir de rejeito de mineração de ferro para produção de geopolímeros.** Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2022.

LUZ, A. B. et al. **Tratamento de Minérios.** 4ª Edição. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia (CETEM-MCT), 2004.

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. **Tratamento De Minérios.** 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MARTIN, S. Advanced vitreous state - Physical properties of glass ionic conduction in glass. Lecture 25: Charge conduction properties of glass: Ionic conduction in glass - **Part 1. Relationship to glass structure and Composition**, 2008. Disponível em: < http://www.lehigh.edu/imi/docs_GP/Slides/GlassProp_Lecture25_Martin1.pdf> Acesso em 22 de outubro de 2014.

MAURO, J. C., ZANOTTO, E. D. Two centuries of glass research: historical trends, current status, and grand challenges for the future. **Internacional Journal of Applied Glass Science**, v. 5, n. 3, p. 313-327, 2014.

MAURO, J. C., ZANOTTO, E. D. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids,** v.471, n. 1, p. 495-495, 2017.

MELLO, R. S. V. **A reparação e compensação dos danos existenciais e a função precaucional- preventiva da responsabilidade civil: uma análise a partir das tragédias de Mariana e de Brumadinho.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Direito, Pontifica Universidade Católica de Minas Gerais (PUC- Minas), Belo Horizonte, 2021.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA (Brasil). **Balança comercial preliminar parcial do mês: 2º Semana de Outubro/2022.** Brasília, 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resíduos Sólidos de Mineração. In: **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 01 de setembro de 2022.

MORAES, S., RIBEIRO, T. R. Brazilian Iron Ore and Production of Pellets. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy,** v. 40, n.1, p. 16-23, 2019.

NAKHAEI, F., IRANNAJAD, M. Reagents types in flotation of iron oxide minerals: A review. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review,** v. 39, n. 2, p. 89-124, 2018.

NASCIMENTO, D. W. **Estudo sobre a influência da adição de resíduo de minério de ferro da barragem de Fundão, Mariana - MG, como pigmento e nas propriedades do concreto de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2018.

NOCITI, D. M. **Aproveitamento de rejeitos oriundos da extração de minério de ferro na fabricação de cerâmicas vermelhas.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2011.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2005.

PROTASIO, F. N. **Influência da incorporação do rejeito de minério de ferro nas propriedades químicas, físicas e mecânicas do concreto.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2019.

QUARESMA, L. F. Balanço Mineral Brasileiro 2001. **Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM),** Brasília, 2001.

RAGAZZI, L., ROCHA, M. **Brumadinho: a engenharia de um crime.** Belo Horizonte: Editora Letramento, 2019.

RIVERA, E., MARQUEZ, H., CELAYA, L. E., RINCÓN, J. M., CALLEJAS, P. New black glasses in the CdO-Al2O3-SiO2 system useful for optical devices. **Materials Letters,** v. 13, n. 1, p. 27-31, Fevereiro/1992.

ROCHE, C.; THYGESEN, K; BAKER, E. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. **United Nations Environment Programme and GRID-Arendal**, Nairobi and Arendal, 2017.

ROY, S. et al. A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation. **Powder Technology,** v. 367, p. 796-808, Maio/2020.

SAIKIA, B. J., PARTHASARANTHY, G., SARMAH, N. C. Fourier transform infrared spectroscopic estimation of crystallinity in SiO2 based rocks. **Bulletin of Materials Science,** v. 31, p. 775–779, 2008.

SAIKAI, B. J. Spectroscopic estimation of geometrical structure elucidation in natural SiO2 crystal, **ReserachGate**, 2014.

SERRA, C. **Tragédia em Mariana: a história do maior desastre ambiental do Brasil.** 1ª edição. Rio de Janeiro: Record, 2018.

SHAW, K. **Ceramic Colours and Pottery Decoration,** 2ª Edição. Maclaren, 1962.

SHELBY, J. E**. Introduction to Glass Science and Technology,** 2ª Edição. Cambridge: RSC, 2005.

SHETTIMA, A. U., HUSSIN, M. W., AHMAD, Y., MIRZA, J. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72–79, Setembro/2016.

STELLING, J., et al. **Geochimica et Cosmochimica Acta 75**, p.3542-3557, 2011.

SILVA, A. M. L. **Estudo de produção e aplicações de cloreto férrico obtido de rejeito de mineração de ferro no tratamento de esgoto sanitário.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, 2019.

SILVA, F. L. **Aproveitamento e Reciclagem de Resíduos de Concentração de Minério de Ferro na Produção de *Pavers* e Cerâmica.** Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Estados Unidos). **Mineral Yearbook 2001-2018.** Reston, 2001-2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Estados Unidos). **Mineral Commodity Summaries 2022.** Reston, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2022>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SÃO PAULO (USP). **Geociências, 2022.** Página de óxidos/ hidróxidos. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/minerais/oxidos-hidroxidos/goethita/>. Acesso em: 27 de agosto de 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **HEMATITA – Fe2O3,** 2021. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Hematita.pdf>. Acesso em: 03 de julho de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **GOETHITA – FeO(OH),** 2021. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Goethita.pdf>. Acesso em: 03 de julho de 2024.

VALE DO RIO DOCE (Brasil). **Relatório de produções e vendas no 4T20 e 2020.** Rio de Janeiro, 2021.

VALE DO RIO DOCE (Brasil). **Relatório de produções e vendas da Vale no 4T21 e 2021.** Rio de Janeiro, 2021.

VALE DO RIO DOCE (VALE). **Resíduos.** Página de Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/Residuos.aspx>. Acesso em: 05 de setembro de 2022.

VALE DO RIO DOCE (VALE). **Eliminação de barragens.** Página de O que fazemos. Disponível em: <https://vale.com/pt/eliminacao-de-barragens>. Acesso em: 20 de outubro de 2022.

VARSHNEYA, A. K., MAURO, J. C. **Fundamentals of Inorganic Glasses,** 3ª Edição. Amsterdam: Elsevier, 2019.

Vidro: o resíduo infinitamente reciclável. Página de “Notícias”. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO),** 2019. Disponível em: <https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/> Acesso em: 05 de outubro de 2022.

WISNIEWSKI, W. et al. Crystallisation of iron containing glass–ceramics and the transformation of hematite to magnetite. **Cryst. Eng. Comm.**, v. 13, n. 12, p. 3927-4290, Junho/2010

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da VALE.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2009.