

Estudo da viabilidade do aproveitamento do rejeito de minério de ferro na produção de vidro

Feasibility study of utilizing iron ore tailings in glass production

Estudio de viabilidad del aprovechamiento de residuos de mineral de hierro en la producción de vidrio

Letícia Karolayne Moreira Firmo¹, Gleiciely Benfica de Abreu², Nayara Aparecida Neres da Silva³, Fabiane Leocádia da Silva²

¹Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

²Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.

³Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

O desenvolvimento do setor mineral tem resultado na geração de grandes quantidades de resíduos, criando um passivo ambiental significativo devido às limitações na destinação e viabilidade desses materiais. Entre 2015 e 2019, ocorreram dois rompimentos de barragens no Brasil, nas cidades de Mariana e Brumadinho, respectivamente, com graves impactos nos pilares ambiental, social e econômico. Diante desse contexto, iniciativas que visam a reutilização de rejeitos minerais têm ganhado destaque, com o objetivo de contribuir para a conservação ambiental e reduzir os custos das mineradoras. Este trabalho teve como objetivo investigar uma aplicação inovadora para o rejeito de minério de ferro, avaliando sua utilização como matéria-prima na produção de vidro, onde atua como fonte de componente vitrificante. Foram realizadas pesquisas para determinar as matérias-primas complementares e os métodos de preparação. Em seguida, procedeu-se à obtenção do vidro e à caracterização do material produzido, utilizando análises visuais e difratometria de raios X (DRX). Os resultados indicaram que o reaproveitamento do rejeito é promissor, embora as características do material obtido ainda não atendam plenamente aos padrões dos vidros comerciais.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; Mineração sustentável; Areia industrial; Produção de vidro; Caracterização microestrutural.

ABSTRACT

The development of the mineral sector has resulted in the generation of large quantities of waste, creating a significant environmental liability due to limitations in the disposal and viability of these materials. Between 2015 and 2019, two dam failures occurred in Brazil, in the cities of Mariana and Brumadinho, respectively, causing severe impacts on environmental, social, and economic pillars. In this context, initiatives aimed at reusing mining waste have gained prominence, seeking to contribute to environmental conservation and reduce mining costs. This study aimed to investigate an innovative application for iron ore tailings, evaluating their use as a raw material in glass production, where they act as a source of vitrifying components. Research was conducted to determine complementary raw materials and preparation methods. Subsequently, the glass production process was carried out, followed by the characterization of the produced material through visual analyses and X-ray diffraction (XRD). The results indicated that the reuse of tailings is promising, although the characteristics of the obtained material do not yet fully meet the standards of commercial glass.

Keywords: Iron ore tailings; Sustainable mining; Industrial sand; Glass production; Microstructural characterization.

RESUMEN

El desarrollo del sector minero ha resultado en la generación de grandes cantidades de residuos, creando un pasivo ambiental significativo debido a las limitaciones en la disposición y viabilidad de estos materiales. Entre 2015 y 2019, ocurrieron dos colapsos de represas en Brasil, en las ciudades de Mariana y Brumadinho, respectivamente, con graves impactos en los pilares ambiental, social y económico. Ante este contexto, las iniciativas que buscan la reutilización de residuos mineros han ganado protagonismo,

Correspondência:

Fabiane Leocádia da Silva
Universidade do Estado
de Minas Gerais, João
Monlevade, Minas Gerais,
Brasil.
Email:
fabiane.silva@uemg.br

con el objetivo de contribuir a la conservación ambiental y reducir los costos de las empresas mineras. Este trabajo tuvo como objetivo investigar una aplicación innovadora para los residuos de mineral de hierro, evaluando su uso como materia prima en la producción de vidrio, donde actúa como fuente de componente vitrificante. Se realizaron investigaciones para determinar las materias primas complementarias y los métodos de preparación. Posteriormente, se llevó a cabo la obtención del vidrio y la caracterización del material producido, utilizando análisis visuales y difracción de rayos X (DRX). Los resultados indicaron que la reutilización del residuo es prometedora, aunque las características del material obtenido aún no cumplen plenamente con los estándares de los vidrios comerciales.

Palabras-clave: Residuos de mineral de hierro; Minería sostenible; Arena industrial; Producción de vidrio; Caracterización microestructural.

INTRODUÇÃO

O setor mineral vem se desenvolvendo bastante nos últimos anos no Brasil, principalmente devido ao bom posicionamento no mercado mundial em relação às *commodities* minerais (SANTOS, R. C. V., 2021). Segundo Silva e Azevedo (2021), no ano de 2020, o setor mineral foi responsável por 4% do PIB e 17% do saldo comercial referente às exportações brasileiras, além de proporcionar para a cadeia industrial cerca de 180 mil empregos diretos e 2 milhões indiretamente. Historicamente, o setor da mineração tem se destacado como um dos pilares da economia nacional, especialmente devido à exportação de minério de ferro, nióbio, bauxita e outros minerais (IBRAM, 2024).

O crescimento do setor mineral potencializa a geração de resíduos advindos do beneficiamento de minério que, por conseguinte, precisam de uma disposição adequada. Nota-se que a forma mais econômica para destinação desses resíduos tem sido a utilização de barragens que acomodam o rejeito de minério de ferro. Todavia, essa não é a forma mais segura de armazenamento, pois as chances de rompimento são altas. Os rompimentos de barragens, como os ocorridos em Fundão, em novembro de 2015, no município de Mariana, e na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, em janeiro de 2019, representam eventos históricos de significativa relevância. Esses episódios resultaram em impactos ambientais, sociais e econômicos de grande magnitude (SOUSA; FREITAS, 2019).

De acordo com Tunes e Vasconcellos (2024), os rejeitos gerados durante o beneficiamento de Minério de Ferro, que consistem predominantemente em areia, óxidos e hidróxidos de ferro não aproveitados no processo, podem corresponder a até 40% do peso total do minério processado. Essa porcentagem varia em função da qualidade da matéria-prima e da eficácia do processo de beneficiamento. No Brasil, estima-se que a produção anual de rejeitos de ferro esteja entre 86 milhões e 172 milhões de toneladas. Considerando o grande volume desses materiais residuais, se faz necessário o desenvolvimento de estratégias e métodos para a reutilização do rejeito, mitigando ou até mesmo extinguindo as formações de barragens.

Estudos recentes observaram que novos métodos para o reuso de rejeitos vêm sendo implementados na construção civil, pavimentação asfáltica, produção de nanomateriais, entre outras áreas (LAGE *et al.*, 2020; CARMIGNANO *et al.*, 2021; MARTINS *et al.*, 2021; ARAUJO *et al.*, 2022; IKOTUN; ADEYEYE; OTIENO, 2022; SILVA *et al.*, 2023; INÁCIO *et al.*, 2024). Long *et al.* (2024) abordam os desafios técnicos e obstáculos nos processos metalúrgicos voltados para o aproveitamento eficaz dos rejeitos da mineração de minério de ferro. Os autores ressaltam os desafios intrínsecos e as possíveis soluções para a aplicação industrial desses resíduos, considerando as questões de sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica.

Mediante essas premissas, o presente trabalho propôs uma alternativa para destinação do resíduo, onde o rejeito é usado como matéria-prima na obtenção de vidros. Esta abordagem figura-se como potencial opção para a redução de custos em mineradoras, tornando-as mais sustentáveis, além de contribuir para a preservação do meio ambiente.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso do rejeito de minério de ferro na produção de vidro. Para isso, foram estabelecidas quatro etapas principais: (i) identificação das principais matérias-primas necessárias para a fabricação do vidro; (ii) comparação das propriedades do material produzido com as dos vidros comerciais; (iii) análise da potencial aplicabilidade do rejeito de minério de ferro como matéria-prima na produção de vidro; e (iv) comparação dos difratogramas das amostras obtidas com aqueles característicos de materiais amorfos.

REFERENCIAL TEÓRICO

A crosta terrestre é composta por diversos elementos químicos, sendo o ferro (Fe) um dos mais abundantes, podendo alcançar até 70% da composição mineral. Minerais que contêm ferro em concentrações economicamente viáveis são denominados minérios, classificados de acordo com sua composição química e explorados para obtenção de metais específicos, como ferro e manganês (PARK *et al.*, 2022). No Brasil, os principais minerais portadores de ferro são a hematita (Fe_2O_3), com teor médio de 60%, e o itabirito ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$), com cerca de 50% de ferro, amplamente encontrados

no Pará e no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais (ANDRADE, 2014).

O beneficiamento mineral é essencial para a separação do mineral-minério da ganga, visando à preparação granulométrica, concentração e purificação sem alterar sua composição química (BULAYANI *et al.*, 2024). Esse processo, conforme Habashi, F. (2017), envolve técnicas físicas e físico-químicas para enriquecimento do minério e aumento da eficiência dos processos subsequentes. Na metalurgia extrativa, a recuperação do metal pode ocorrer por três principais métodos: hidrometalurgia (processos úmidos para obtenção de metais como ouro e alumínio), pirometalurgia (processos a seco em altas temperaturas, utilizados para ferro e cobre) e eletrometalurgia (extração eletroquímica de metais como alumínio e zinco) (HABASHI, F. 2017).

No entanto, independentemente do método de processamento utilizado, os resíduos gerados pela mineração continuam a ser um aspecto de grande relevância no contexto do beneficiamento mineral. Esses resíduos são categorizados em estéreis, que consistem em materiais sem valor econômico, e rejeitos, que são subprodutos resultantes dos processos químicos e físicos envolvidos no beneficiamento (SEGUI *et al.*, 2023). Pesquisas recentes demonstram as aplicações desses rejeitos em diversas áreas, como na fabricação de blocos de concreto intertravados, na fundição e na incorporação em composições asfálticas (SILVA *et al.*, 2023; OLIVEIRA, 2021). Outros estudos também ressaltam sua utilidade na produção de argamassa, na indústria cerâmica e como materiais para o setor de pavimentação (MAGALHÃES *et al.* 2020; SILVA *et al.*, 2023). A caracterização adequada dos rejeitos é essencial para prever seu impacto ambiental e definir métodos apropriados de disposição.

Sob essa perspectiva, os rejeitos da mineração podem ser dispostos de várias formas, como em minas subterrâneas, cavas exauridas, pilhas drenadas, pilhas a seco (*dry stacking*), rejeitos espessados ou em pasta, barragens de contenção (a montante, a jusante ou em linha de centro), codisposição com estéreis ou disposição compartilhada. A escolha do método depende do processo de mineração, das condições geológicas, topográficas e climáticas, das propriedades dos materiais e do potencial impacto ambiental dos rejeitos (PAIXÃO; WILKEN, 2021).

De acordo com Almada (2021), os rejeitos provenientes do minério de ferro apresentam uma granulometria semelhante à da areia e são compostos principalmente por ferro, silício e alumínio. Devido aos impactos ambientais e ao grande volume gerado, estudos buscam alternativas para o reaproveitamento desses resíduos em novas aplicações, como na produção de vidro (RAMOS; LUZ; MILHOMEM, 2022).

Zhang *et al.*, (2023) produziram materiais vitrocerâmicos de cordierita pelo método de sinterização, utilizando como principais matérias-primas a ganga de carvão, os rejeitos de ferro e a escória de ferrocromo de alto carbono. Simultaneamente, obtiveram uma liga de ferro-silício com teor de cromo apresentando mais uma forma de reaproveitamento dos resíduos do setor mineiro-metalúrgico. Com o objetivo de imobilizar resíduos nucleares da mineração, El-Sayed Seleman *et al.* (2022) desenvolveram vidros de borossilicato com estrutura compacta e alta durabilidade. Os resultados indicaram que o material atendeu aos parâmetros ambientais, apresentando uma dose de radiação inferior às médias internacionais. Dessa forma, os vidros podem ser utilizados com segurança nesse processo, reforçando também a viabilidade do aproveitamento de subprodutos da mineração na fabricação de diferentes tipos de vidro.

No que tange às características dos vidros, segundo Callister Jr. (2024), vidros são materiais não-cristalinos compostos por silicatos e óxidos que influenciam suas propriedades, pertencendo à família das cerâmicas. Sua formulação varia conforme a aplicação, sendo classificados em sílica vítrea, silicatos alcalinos, vidros sodo-cálcicos, borossilicatos, entre outros (AKERMAN, 2000). A durabilidade química é uma das propriedades mais importantes dos vidros, que também apresentam características como transparência óptica, condutividade térmica e resistência mecânica (RAMOS; LUZ; MILHOMEM, 2022).

A fabricação do vidro convencional ocorre por fusão de matérias-primas a 1600°C, seguida por conformação e recozimento. Os principais constituintes dos vidros comerciais incluem sílica (SiO₂), obtida da areia, e aditivos como cal (CaO) e barrilha (Na₂O), responsáveis por estabilidade e redução do ponto de fusão e que correspondem a 90% das matérias-primas, conforme apresentado na Tabela

Tabela 1 – Composições típicas de vidros comerciais

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO
Sodo-cálcicos	Embalagem	72	2	-	12,5	1	11	1,5	-
	Plano	71	1	-	13,5	0,5	10	4	-
Borossilicato	Lâmpada	73	1	-	16,5	0,5	5	4	-
	Pyrex	79	2	13	5,5	-	-	-	-
	Fibra Isolação	66	1,5	3,5	15,5	1	8	4	-
Chumbo	Cristal	56	-	-	4	12	2	2	24
	Néon	63	1	-	8	6	-	-	22
	Lente	32	-	-	1	2	-	-	65
Aluminoborossilicato	Farmacêutico	72	6	11	7	1	1	-	-
	Fibra reforço	55	15	7	-	-	19	4	-
	Tubo combustão	62	17	5	1	-	8	7	-

Fonte: Adaptado de Akerman (2000).

De maneira geral, a areia industrial, responsável pelo fornecimento de sílica (SiO₂), é amplamente utilizada na produção de vidro reciclado. Além disso, outros componentes, como dolomita (fonte de CaO e MgO), são adicionados para conferir maior estabilidade e durabilidade ao vidro, além de reduzir seu ponto de fusão. A transição vítrea, fenômeno térmico que ocorre durante o resfriamento, é diretamente influenciada pela taxa de resfriamento sendo um parâmetro importante a ser controlado durante o processo de fabricação desses materiais (HAMED *et al.*, 2023; RAMOS; LUZ; MILHOMEM, 2022).

O reaproveitamento de rejeitos minerais para fabricação de vidro tem sido explorado como alternativa sustentável (HOSSAIN; ROY, 2020; JAWADAND; RANDIVE, 2021). Bastos (2018) demonstrou que resíduos de rochas ornamentais possuem composição adequada para a produção de vidros aplicáveis na construção civil. Vieira (2015) analisou a utilização de “lama vermelha”, um resíduo da produção de alumínio, para geração de produtos vitrais. Adicionalmente, estudos sugerem a viabilidade de produção de vidro a partir de resíduos orgânicos, como cascas de ovos e bananas, ricos em óxidos essenciais ao processo (CORNEJO *et al.*, 2014). Embora promissores, esses métodos ainda demandam desenvolvimento para implementação em escala industrial.

MÉTODOS

Para o planejamento experimental da produção de vidro a partir do rejeito de minério de ferro, tomou-se como base o Diagrama de Ishikawa, apresentado na Figura 1. O diagrama apresenta as principais etapas do processo, sendo as matérias-primas utilizadas para a produção de vidro, a preparação do rejeito de Minério de Ferro, obtenção do produto final e sua caracterização (aspecto visual, fotografia) e Difração de Raios-X (DRX). Os parâmetros de caracterização foram determinados com base na literatura e integram as etapas iniciais de caracterização dos vidros (ESCOBEDO-BRETADO *et al.*, 2025).

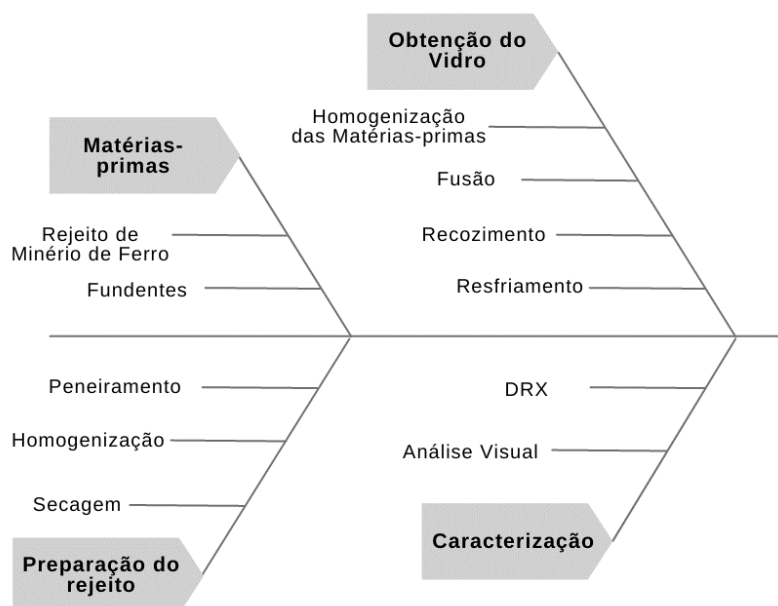


Figura 1 – Diagrama de Ishikawa representativo dos procedimentos experimentais.

Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2022).

Matérias-primas

O rejeito de minério de ferro utilizado nesta pesquisa foi obtido por meio de doação de uma empresa siderúrgica que opera uma planta de beneficiamento nas proximidades das cidades de João Monlevade e Bela Vista de Minas, no estado de Minas Gerais. Esse material é composto por uma mistura heterogênea de elementos, sendo o dióxido de silício (SiO_2) e o ferro (Fe) os componentes majoritários.

Para determinar as proporções de cada um dos fundentes na formação do vidro, a composição química do rejeito foi analisada. Na Tabela 2 são apresentadas as informações básicas para esta análise.

Tabela 2 – Principais elementos químicos do rejeito.

Teor (%)	Fe	SiO_2	Al_2O_3	P	Mn	CaO	TiO_2	MgO	Outros
Rejeito	18,31	64,93	2,315	0,093	0,105	0,608	0,073	2,275	11,29

Fonte: Adaptado de Silva (2023).

Fundentes

Segundo Ramos; Luz e Milhomem (2022), a dolomita, o quartzito, a calcita, a barrilha e os cacos de vidro são alguns dos principais fundentes empregados para obtenção do vidro a partir do rejeito de minério de ferro. Assim, os fundentes selecionados para adição ao rejeito foram escolhidos com base em critérios fundamentais para reduzir o ponto de fusão da sílica.

O rejeito arenoso, fonte de SiO_2 , foi obtido através da doação de rejeito de Minério de Ferro, enquanto a dolomita, fonte de CaO e de MgO, a calcita, fornecedora de CaO, e a barrilha, fornecedora de Na_2O , foram adquiridas comercialmente.

Preparação do rejeito de Minério de Ferro

Para a realização do experimento, foi necessário adequar a amostra de rejeito para atender aos requisitos e propriedades exigidos na obtenção do vidro. A Figura 2 apresenta o fluxograma que ilustra as etapas do processo de preparação do rejeito de Minério de Ferro, utilizado como fonte de SiO_2 na produção do vidro.

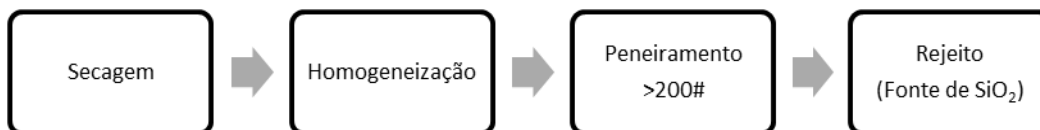


Figura 2 – Fluxograma do processo de preparação do rejeito de minério de ferro.

Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2022).

Primeiramente, a amostra de rejeito foi pesada e submetida a secagem em uma estufa elétrica *DeLeo* a 100 °C por 24 horas. Em seguida, o material foi retirado da estufa e novamente pesado. Para iniciar a classificação do rejeito, a amostra foi homogeneizada, conforme ilustrado na Figura 3.

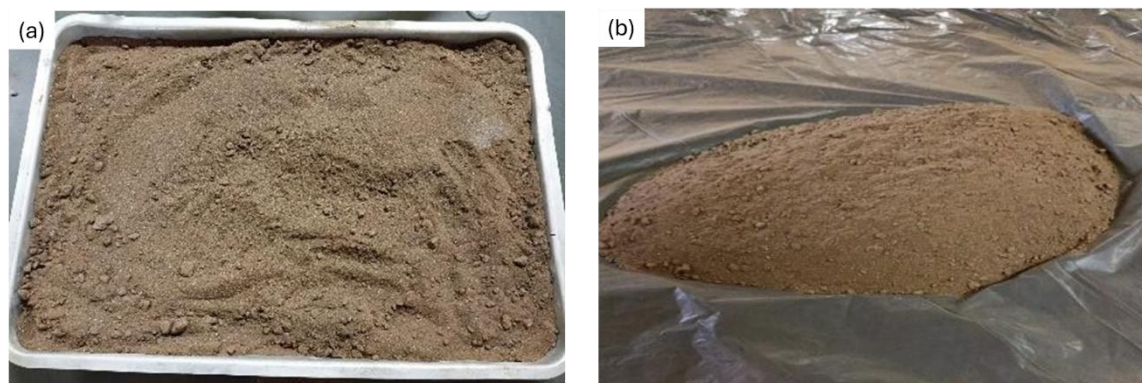


Figura 3 – Preparação do rejeito de minério de ferro. (a) Rejeito após secagem e (b) homogeneização.

Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2022).

A etapa de classificação consistiu no processo de peneiramento, realizado em um peneirador suspenso, durante 12 minutos. Para a especificação da granulometria, foi utilizada uma peneira de 200# (*mesh*), conforme sugerido por (ABIFA, 2015a, b). Na Tabela 3 são apresentadas as especificações granulométricas para o vidro plano.

Tabela 3 – Especificação granulométrica para vidro plano.

Granulometria (mm/mesh)	Acumulado retido (%)
1,18 / 14	0,0
0,850 / 20	0,01 max.
0,425 / 35	0,10 max.
0,106 / 150	92,0 min.
0,075 / 200	99,5 min.

Fonte: Luz; Linz (2008).

Obtenção do Vidro

Segundo Bastos (2018), a sílica (SiO_2) desempenha a função de componente vitrificante, com uma alta viscosidade e necessitando de uma elevada temperatura de fusão, superior a 1725°C. Ademais, os fundentes (Na_2O , CaO e MgO) são empregados como modificadores da rede vítrea, visando reduzir a temperatura de fusão e resultar em uma viscosidade e temperatura de transição vítrea menor (AKERMAN, 2000).

As frações das matérias-primas foram pesadas em uma balança de precisão *BEL Engineering*, modelo M1 003, e homogeneizadas manualmente com o auxílio de uma espátula. Em seguida, a amostra foi colocada em um cadinho de argila para fundição e levada para o forno a 1000°C por uma hora e meia, aquecendo-se a uma taxa de 10°C/min.

Conforme a literatura, a composição química dos vidros sodo-cálcicos é predominantemente constituída por 71 a 73% de SiO_2 , 12 a 14% de Na_2O e 10 a 12% de CaO (SANTOS, 2009). De maneira

semelhante, Ramos; Luz e Milhomem (2022) adotaram em seus estudos uma formulação composta por 72,0% de SiO_2 , 15,0% de Na_2O , 10,0% de CaO e 3,0% de MgO .

Diante das limitações dos equipamentos disponíveis para a realização deste estudo, optou-se por ajustar as proporções dos insumos com o objetivo de minimizar a faixa de temperatura da transição vítrea. Para a obtenção do vidro, foram estabelecidas duas condições experimentais, variando as proporções dos insumos conforme apresentado na Tabela 4. As etapas subsequentes do processo seguiram os mesmos parâmetros para ambas as amostras. A fusão foi conduzida em um forno INTI, modelo FT1300, com potência de 15 kW, cuja taxa de aquecimento foi controlada por meio do *software* Flycon.

Tabela 4 – Proporção de matérias-primas utilizadas.

Matérias-primas	Amostra 1	Amostra 2
	%	%
SiO_2	60	50
Na_2O	27	32
CaO	10	13
MgO	3	5

Fonte: Arquivo pessoal dos autores (2022).

Após a fusão e o resfriamento, o vidro foi submetido a um tratamento térmico de recozimento a 600°C por 15 minutos, para controle da viscosidade. Posteriormente, foi resfriado dentro do forno até a temperatura ambiente, com intuito de reduzir ou evitar tensões residuais.

Caracterização do Vidro

Inicialmente, a caracterização do material obtido foi realizada por meio de análise visual, na qual foram registradas fotografias com o objetivo de avaliar os aspectos macroscópicos relacionados ao processo de fusão das amostras.

Posteriormente, a análise de difração de raios X (DRX) foi empregada para determinar o grau de amorficidade dos vidros. A difratometria de raios X é uma técnica amplamente utilizada para a caracterização estrutural de vidros (ORTEGA *et al.*, 2022). Conforme destacado por Almeida (2006), em materiais cristalinos, a distância interatômica é da mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda dos raios X, resultando na formação de uma grade de difração devido à periodicidade estrutural dos átomos ou moléculas. Assim, essa técnica é considerada fundamental para a análise desse tipo de material, como também apontado por Elisiário (2017), Trentin *et al.* (2020) e Escobedo-Bretado (2025).

Além disso, destaca-se que os picos de difração observados nos difratogramas correspondem aos planos das fases cristalinas presentes no material. Em contraste, no caso de amostras com estrutura amorfa, a ausência de picos é uma característica marcante no difratograma.

Os ensaios de difração de raios-X foram realizados em um difratômetro de raios-X da marca Shimadzu, modelo XRD – 7000, seguindo as especificações do equipamento para esse tipo de material. As amostras foram analisadas na forma de pó, empregando radiação $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40 kV, corrente de 30 mA e 2θ , com variação de 30° a 120°.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado obtido após a fusão do material é apresentado na Figura 4, onde são observadas diferenças visuais entre as amostras. A Amostra 1 (Figura 4a) apresentou maior fusão em comparação com a Amostra 2 (Figura 4b), o que pode estar associado à proporção dos fundentes. De acordo com Akerman (2000), a viscosidade é uma das propriedades mais importantes do vidro e está diretamente relacionada às condições de fusão.

Após a análise detalhada das amostras, sugere-se que a redução na quantidade de SiO_2 na Amostra 2 tenha sido um fator determinante para a fusão incompleta do material. O SiO_2 é um componente

crucial no processo de fusão, conhecido por suas propriedades fundentes, que permitem ao material atingir a viscosidade necessária para uma fusão ideal. A diminuição dessa substância pode ter comprometido a capacidade do material de alcançar esse ponto de fusão, resultando em uma fusão parcial, como evidenciado pela falta de características típicas de uma fusão completa na Amostra 2.

Em contraste, a Amostra 1 exibiu características típicas de vidro, como fluidez, brilho intenso e translucidez. Esses atributos indicam uma fusão bem-sucedida, na qual as condições de fusão foram adequadas, possivelmente devido à maior concentração de SiO_2 ou a uma proporção mais equilibrada de fundentes. Isso permitiu que o material alcançasse uma estrutura homogênea e vítrea. Esses resultados ressaltam a importância da composição química e das condições de fusão para o comportamento final do material, evidenciando como a variação na proporção de SiO_2 pode influenciar diretamente a qualidade da fusão.

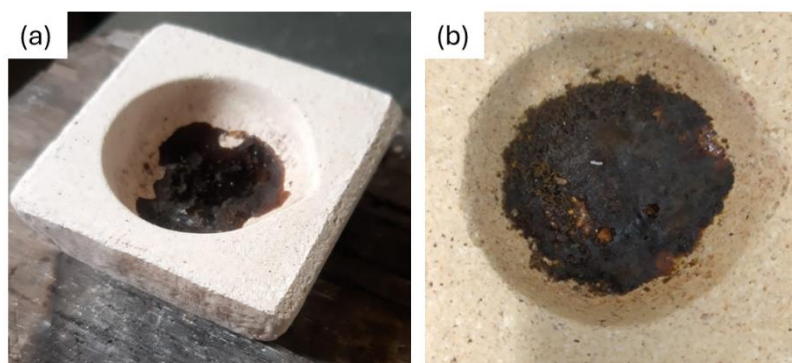


Figura 4 – Material obtido após processo de fusão, (a) Amostra 1 e (b) Amostra 2.

Fonte: Arquivo pessoal dos autores

A coloração escura é perceptível em ambas amostras, devido ao elevado teor de Óxido de Ferro presente na composição do rejeito de minério utilizado como insumo para a produção de vidro. Zhang *et al.* (2023) obtiveram vidro de coloração semelhante após têmpera de material vitrocerâmico produzido a partir do método de sinterização, utilizando estéril de carvão, rejeitos de ferro e escória de ferrocromo de alto carbono como matérias-primas principais. Para produzir materiais de tonalidades mais claras, Bastos (2018) sugere acrescentar a operação hidrometalúrgica de lixiviação ácida no processo de preparação do rejeito de Minério de Ferro. Escobedo-Bretado et al. (2025) produziram um vidro de coloração verde-clara utilizando rejeitos de minério ricos em arsênio, zinco e ferro, combinados com vidro reciclado de garrafas transparentes. Embora os parâmetros de processo sejam semelhantes aos do presente estudo, os autores empregaram K_2CO_3 e H_3BO_3 como fundentes. As diferenças na matéria-prima influenciam a coloração do vidro obtido, mas reforçam a viabilidade da produção de vidros a partir de resíduos da mineração. Contudo, a tonalidade obtida nas amostras não impede o uso do material obtido, visto que, vidros de coloração âmbar são empregados nas indústrias farmacêuticas, alimentícia, na arquitetura, artes plásticas, entre outros.

Difração de raios-X

Os difratogramas das Amostras 1 e 2 estão apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. No difratograma da Amostra 1, observa-se que o material tende a se aproximar de um estado amorfo, uma vez que suas bandas começam a se alargar ao longo do processo (Figura 5).

Ao comparar os dois difratogramas, nota-se que, embora ambos apresentem um padrão característico de materiais semicristalinos, o difratograma da Amostra 2 exibe picos mais pronunciados em relação ao da Amostra 1 (Figuras 5 e 6, respectivamente).

Um possível motivo para a formação de fases cristalinas na Amostra 2 é a proporção dos insumos, especialmente o CaO . Segundo Akerman (2000), uma quantidade elevada desse componente pode favorecer a cristalização durante a produção do material. Essa alteração na proporção de CaO pode justificar o aumento significativo na intensidade dos picos observados na Amostra 2 (Figura 6).

Onodera *et al.* (2020) ressaltam a dificuldade de quantificar a ordem estrutural em sólidos vítreos, uma vez que sua complexidade vai além da organização dos primeiros vizinhos atômicos. Em alguns casos, é necessário a aplicação de técnicas de compressão a quente e a frio para aumentar de forma sistemática a ordenação estrutural após a densificação. Esse processo permite a produção de vidros com a mesma densidade, mas com arranjos estruturais distintos.

Outro aspecto importante a ser considerado é a velocidade de resfriamento das amostras. Conforme detalhado nos métodos, as amostras foram resfriadas de maneira lenta até atingirem a temperatura ambiente, dentro do forno. Esse resfriamento gradual favoreceu a cristalização dos componentes presentes, já que a baixa taxa de resfriamento permite que os átomos ou moléculas se organizem de maneira ordenada, formando estruturas cristalinas. A velocidade de resfriamento desempenha um papel fundamental na formação do vidro. Segundo Ramos; Luz; Milhomem (2022), um resfriamento controlado é essencial para garantir que o material atinja uma estrutura amorfa desejada.

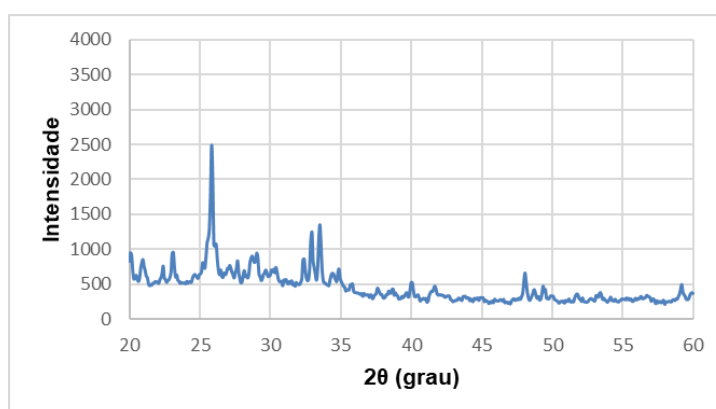


Figura 5 – Difratograma a Amostra 1.
Fonte: Arquivo pessoal dos autores

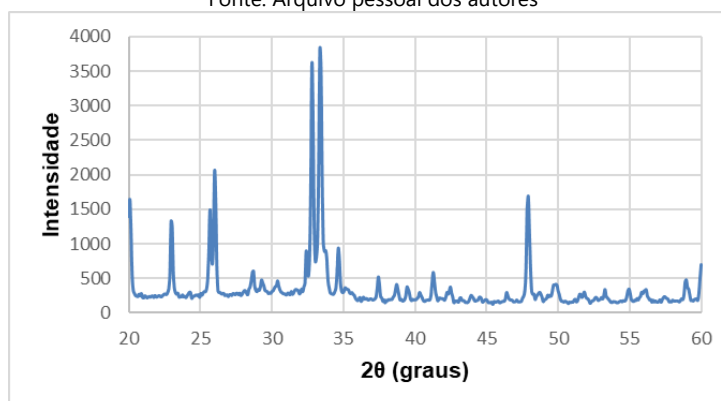


Figura 6 - Difratograma a Amostra 2.
Fonte: Arquivo pessoal dos autores

Além disso, a taxa de resfriamento, portanto, não só afeta a formação de cristais, mas também as propriedades finais do material. Borim *et al.* (2010) enfatizam a importância de uma taxa de resfriamento relativamente rápida durante a formação do vidro. Esse controle é necessário para garantir que o vidro mantenha suas propriedades únicas, como a translucidez e a fluidez, características de uma estrutura amorfa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, discutiu-se e avaliou-se a viabilidade técnica da produção de vidro a partir do rejeito de Minério de Ferro. Embora não tenham sido alcançados os resultados desejados devido às condições de operação, as análises de DRX mostraram que os materiais fundidos não possuem caráter amorfo, sendo definidos como materiais semi-cristalinos. As características visuais da Amostra 1 se assemelham

ao vidro e o resultado obtido pelo DRX mostra que seu espectro já estava tendenciando para um material amorfo, devido ao alargamento de suas bandas. Contudo, para a Amostra 2, observou-se que não houve a fusão completa devido a proporção de seus insumos, com isso a quantidade de picos presentes no resultado do DRX foi maior em relação a Amostra 1.

Os resultados obtidos são de grande valia, pois eles demonstraram um amplo potencial como alternativa de reutilização do rejeito de minério de ferro proveniente do processo de extração mineral. Além de mitigar os impactos ambientais e preservar a matéria-prima areia, o uso dos rejeitos do beneficiamento do minério de ferro não só contribui para a economia circular ao reintegrar rejeito no ciclo produtivo, mas também fortalece a sustentabilidade da indústria do vidro.

Sugere-se avaliar o potencial de aplicabilidade do rejeito de minério de ferro como matéria-prima para produção de vidro; a adição das etapas de separação magnética e lixiviação para a retirada do ferro no processo de preparação do rejeito de minério de ferro, com o objetivo de obter um material mais puro que gere um vidro incolor. Em oposição, mostra-se de maneira interessante a utilização do vidro de coloração escura, recorrente do teor de ferro na composição do rejeito, nas indústrias farmacêuticas, alimentícia, na arquitetura e artes plásticas.

Ademais, para alcançar resultados mais satisfatórios, devem-se ajustar os parâmetros em relação à proporção dos insumos e a temperatura de operação do forno, bem como estabelecer o controle da taxa de resfriamento para impedir a cristalização do material, pois ela será o ponto determinante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- ABIFA. CEMP102 - Comissão de Estudos de Matérias Primas. **Materiais para fundição - cálculo das características granulométricas**. Brasil, 2015a.
- ABIFA. CEMP081 - Comissão de Estudos de Matérias Primas. **Materiais para Fundição - Determinação da Distribuição Granulométrica, módulo de finura e teor de finos em materiais granulares**. Brasil, 2015b. Disponível em: <<https://abifa.org.br/cemp/content/normas/081.pdf>> Acesso em: 2 fev. 2025.
- AKERMAN, M. **Natureza , Estrutura e Propriedades do Vidro**. CETEV - Centro Técnico de Elaboração do Vidro. Mauá: Saint-Gobain Vidros Brasil, 2000. p. 1–37.
- ALMADA, B. S. **Influência da heterogeneidade de rejeitos de minério de ferro utilizados como adição mineral nas propriedades de microconcretos**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, 2021. 119p.
- ALMEIDA, F. J. M. **Obtenção de vidros fosfatos contendo ferro por meio do aquecimento de fornos microondas**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade São Paulo, 2006. 67p.
- ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação com material de construção civil**. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Viçosa, 2014. 91p.
- ARAUJO, F. S. M. *et al.* Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. **Geosciences (Switzerland)**, v. 12, n. 9, 2022.
- BASTOS, I. A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na fabricação de vidros sodo-cálcicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2018. 86p. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/11190>>.
- CARMIGNANO, O. R. *et al.* Iron ore tailings: Characterization and applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 10, p. 1895–1911, 2021.

EL-SAYED SELEMAN, M. M. *et al.* Glass production using tailing of upgraded rare metal mineralization, Abu Rusheid area – Egypt for nuclear waste immobilization. **Ceramics International**, v. 48, n. 1, p. 569–577, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.135>>.

ESCOBEDO-BRETADO, M. A. *et al.* Characterization and property evaluation of glasses made from mine tailings , glass waste , and fluxes. **Recycling**, v. 10, n. 39, p. 1–14, 2025.

BULAYANI, M. M. *et al.* Exploring low-grade iron ore beneficiation techniques: A comprehensive review. **Minerals**, v. 14, n. 8, 2024.

CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: An introduction**. 10 ed. New York: John Wiley & Sons, 2024.

CORNEJO, I. A. *et al.* Hidden treasures: Turning food waste into glass. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 93, n. 6, p. 24–27, 2014.

ELISIÁRIO, D. A. C. **Caracterização térmica e óptica de vidros do sistema SiO₂-B₂O₃-ZnO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Nova de Lisboa, 2017. 32p.

HABASHI, F. Metals from Ores: An Introduction. **Aspects in Mining & Mineral Science**, v. 1, n. 1, p. 919–924, 2017.

HAMED, H. *et al.* Applications, materials, and fabrication of micro glass parts and devices: An overview. **Materials Today**, v. 66, n. June, p. 194–220, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.03.005>>.

HOSSAIN, Sk S.; ROY, P. K. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 8, n. 4, p. 984–1009, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1815348>>.

IBRAM. **Em 2023, mineração repete faturamento do ano anterior e pretende ampliar investimentos até 2028**. Disponível em: <<https://ibram.org.br/release/em-2023-mineracao-repete-faturamento-do-ano-anterior-e-pretende-ampliar-investimentos-ate-2028/>>. Acesso em: 2 fev. 2025.

IKOTUN, J.; ADEYEYE, R.; OTIENO, M. Application of mine tailings sand as construction material – a review. **MATEC Web of Conferences**, v. 364, p. 05008, 2022.

INÁCIO, M. D. S. *et al.* Estudo da viabilidade técnica de utilização de rejeito de minério de ferro na pavimentação. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 7, p. e5560, 2024.

JAWADAND, S., RANDIVE, K. (2021). A Sustainable Approach to Transforming Mining Waste into Value-Added Products. In: RANDIVE, K., PINGLE, S., AGNIHOTRI, A. (eds) **Innovations in Sustainable Mining**. Earth and Environmental Sciences Library. Springer, Cham. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-73796-2_1

LAGE, F. L. *et al.* Utilização dos rejeitos de minério de ferro na construção civil: uma análise cienciométrica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 4, p. 1–20, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125798>>

LONG, H. *et al.* A critical review on metallurgical recovery of iron from iron ore tailings. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 2, p. 112140, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112140>>.

LUZ, A. B.; LINS, F. F. Areia industrial. **Rochas & Minerais Industriais Usos e Especificações**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 107–126.

MAGALHÃES, L. F. *et al.* Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, 2020.

MARTINS, A. C. P., CARVALHO, J.M.F., COSTA, L.C.B., ANDRADE, H. D., TAINÁ VARELA DE MELO, JOSÉ CARLOS LOPES RIBEIRO, LEONARDO GONÇALVES PEDROTI, RICARDO ANDRÉ FIOROTTI

PEIXOTO, **Steel slags in cement-based composites**: An ultimate review on characterization, applications and performance, *Construction and Building Materials*, Volume 291, 2021, ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123265>.

OLIVEIRA, I. C. S.; FAXINA, A. L. Rejeito de minério de ferro como agregado mineral fino em misturas asfálticas. **Transportes**, 29(3), 2391, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v29i4.2391>

ONODERA, Y. *et al.* Structure and properties of densified silica glass: characterizing the order within disorder. **NPG Asia Materials**, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41427-020-00262-z>.

ORTEGA, E. O. *et al.* **Material characterization techniques and applications**. Singapore: Springer, 2022. v. 19.

PAIXÃO, M. D.; WILKEN, A. A. P. Alternativas de disposição de rejeitos de mineração na avaliação de impacto ambiental no Estado de Minas Gerais. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 15, n. 1, p. 33–56, 2021.

PARK, J. *et al.* A short review of the effect of iron ore selection on mineral phases of iron ore sinter. **Minerals**, v. 12, n. 1, 2022.

RAMOS, K. S.; LUZ, J. A. M.; MILHOMEM, F. O. Da viabilidade de fabrico de vidro com resíduos de mineração. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e13711929828, 2022.

SANTOS, R. C. V. Contribuição do setor mineral no produto interno bruto brasileiro. **Radar: tecnologia, produção e comércio exterior**, 2021.

SANTOS, W. J. Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. **Scientia Plena**, v. 5, n. 2, p. 1–5, 2009.

SEGUI, P. *et al.* Mining Wastes as Road Construction Material: A Review. **Minerals**, v. 13, n. 1, p. 1–18, 2023.

SILVA, C. R.; AZEVEDO, R. L. G. Recursos minerais do Brasil: diretrizes para o setor mineral. **Terrae Didática**, v. 17, p. 1–16, 2021.

SILVA, F. L.; CAETANO, MENDES, E. C.; FIGUEIREDO, M. H.; NOGUEIRA, F. C.; PEREIRA, C. A.; MENDES, J. J. Caracterização de areias silicosas obtidas através do rejeito arenoso da concentração do minério de ferro. **Holos**, v. 4, n. 39, 2023. DOI: 10.15628/holos.2023.14273. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/14273>. Acesso em: 14 mar. 2025.

SILVA, R.M.R.; NUNES, R.M.; NOGUEIRA, F.C.; SILVA, F.L., Aproveitamento do rejeito de minério de ferro da Mina do Andrade para a confecção de blocos intertravados. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, vol.20, e2660, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20222660>

SOUSA, V. S.; FREITAS, V. M. **Revisão teórica sobre os desastres da mineração brasileira incididos em Mariana-MG (2015) e Brumadinho-MG (2019)**. 2019, Mineiros: Unifimes, 2019. p. 1–14.

TRENTIN, P. O. *et al.* Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

TUNES, S.; VASCONCELLOS, Y. O desafio dos rejeitos. **Pesquisa FAPESP**, v. 339, p. 73–75, 2024.

VIEIRA, H. **Obtenção e caracterização de vidros a base de lama vermelha visando a imobilização de rejeitos nucleares**. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares, 2015. 105p.

ZHANG, Z.; MA, H.; WU, C.; SUN, Y.; CHEN, R.; GUO, X. Properties of Glass-Ceramics Prepared from Industrial Multi-Wastes. **Separations**, v. 10, n. 9, 2023.