

Da viabilidade de fabrico de vidro com resíduos de mineração

On the feasibility of manufacturing glass with mining waste

Sobre la factibilidad de fabricar vidrio con residuos mineros

Recebido: 01/05/2022 | Revisado: 20/05/2022 | Aceito: 24/06/2022 | Publicado: 05/07/2022

Kerollan da Silva Ramos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8627-6523>
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
E-mail: kerollan.silva@gmail.com

José Aurélio Medeiros da Luz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-2439>
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
E-mail: jaurelio@ufop.edu.br

Felipe de Orquiza Milhomem

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9830-8374>
Instituto Federal de Goiás, Brasil
E-mail: felipe.milhomem6@gmail.com

Resumo

Os resíduos gerados pela mineração tem sido majoritariamente estocados em barragens ou pilhas, gerando altos custos para sua gestão. O presente trabalho teve o intuito de, primeiramente, verificar a adequação de resíduos de mineração como matéria-prima para produção de vidro e avaliar economicamente o seu emprego, citando as principais características do fabrico do vidro, e simulando a implantação de uma fábrica de vidro, no âmbito de políticas públicas de aproveitamento de resíduos sólidos. Num primeiro estágio, ensaios prospectórios de laboratório, com base na revisão da literatura, mostraram a exequibilidade técnica do emprego de resíduos de mineração da região de Ouro Preto (MG, Brasil) para o fabrico de vidro. A seguir foi feita uma orçamentação expedita de fábrica de elaboração de vidro sílica-cal-soda para dois cenários produtivos, a saber: de 15 t/dia e 400 t/dia. Conclui-se pela viabilidade econômica desse tipo de empreendimento, que, entretanto, exige grande investimento de capital, demonstrando ser muito valioso o apoio de órgãos de fomento governamentais para a sua implantação.

Palavras-chave: Resíduos de mineração; Vidro; Impactos ambientais; Fábrica de vidro.

Abstract

Waste materials generated by mining have been mostly stored in dams or stockpiles, generating high costs for its management. The present work aimed, firstly, to verify the amenability of mining wastes as a raw material for the glass production, and to economically evaluate their use, citing the main features of the manufacture of glass, and simulating the implementation of a glass factory, meeting public policy guidelines for the use of solid waste. In a first stage, prospective laboratory tests, based on the literature review, showed the technical feasibility of using mining residues from the Ouro Preto region (MG, Brazil) for the manufacture of glass. Next, an expeditious appraisal of a silica-lime-soda glass factory was made for two production scenarios, namely: 15 t/day and 400 t/day. It is concluded by the economic viability of this type of enterprise, which, however, requires a large investment of capital, proving to be very valuable the support of government development agencies for its implementation.

Keywords: Mining waste; Glass; Environmental impacts; Glass factory.

Resumen

Los residuos generados por la minería han sido almacenados en su mayoría en diques o pilas, generando altos costos para su manejo. Este estudio tuvo como objetivo, en primer lugar, verificar la aptitud de los residuos mineros como materia prima para la producción de vidrio, y evaluar económicamente su uso, citando las principales características de la fabricación de vidrio, y simulando la implementación de una fábrica de vidrio, reuniendo lineamientos de política pública para el aprovechamiento de los residuos sólidos. En una primera etapa, experimentos prospectivos de laboratorio, basados en la revisión de la literatura, demostraron la factibilidad técnica de utilizar residuos mineros de la región de Ouro Preto (MG, Brasil) para la fabricación de vidrio ordinario. A continuación, se realizó un avalúo expedito de una fábrica de vidrio de sílice-cal-soda para dos escenarios de producción, a saber: 15 t/día y 400 t/día. Se concluye por la viabilidad económica de este tipo de emprendimiento, que, sin embargo, requiere de una gran inversión de capital, resultando muy valioso el apoyo de las agencias gubernamentales de desarrollo para su implementación.

Palabras clave: Residuos mineros; Vidrio; Impactos ambientales; Fábrica de vidrio.

1. Introdução

A mineração tem sido um dos setores principais e mais importante para o crescimento e desenvolvimento do Brasil. Contudo, junto ao bônus trazido pela mineração, um ônus bastante problemático tem tomado os holofotes há alguns anos: os resíduos de mineração. Colapsos de barragens industriais têm demonstrado o impacto que esses resíduos podem provocar.

Segundo dados do Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração divulgados pela Fundação Estadual do Meio Ambiente — FEAM (FEAM, 2018), o total de resíduos inventariados somente no estado de Minas Gerais em 2018, ano base 2017, foi superior a 562,4 milhões de toneladas, um valor aproximadamente 13 vezes maior ao dos 43 milhões de toneladas de lama provenientes do rompimento da barragem em Mariana-MG, em 2015, causador do maior desastre ambiental da história do Brasil (Pimentel, 2018). Do total de resíduos gerados anualmente, somente cerca de 9,9 mil toneladas foram reutilizados. Segundo o Ministério Público Federal – MPF (MPF, 2016), espera-se que, entre os anos de 2010 e 2030, sejam produzidos mais de 11 bilhões de toneladas de resíduos pela mineração.

Além dos desastres por rompimentos de barragens, existem ainda uma série de outros problemas frequentes causados devido à má disposição desses resíduos sólidos: poeira, assoreamento dos rios, erosão, compactação do solo, contaminação do solo e dos lençóis freáticos, degradação do entorno, obstrução do leito suplementar dos córregos e calhas de drenagem, entre outros, estão entre esses problemas.

Todavia, existem alternativas para se evitar riscos causados pela estocagem desse material em barragens. Como pontuam Silva e colaboradores (2020), um resíduo não é necessariamente algo sem valor, mas sim que não é necessário para quem o descartou. Uma das formas de aproveitamento desses resíduos é o seu uso como matéria-prima para produção de diversos produtos, sendo o vidro um deles. O vidro se destaca por ser um material bastante versátil, possuir variadas utilizações e ser 100 % reciclável (Akerman, 2000).

Assim, este estudo visa avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduos sólidos de mineração para fabrico de vidro soda-sílica-cal, e investigar os aspectos técnicos e econômicos da fabricação de vidro e da instalação e operação de uma fábrica de vidro.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Política de fomento ao aproveitamento de resíduos de mineração

Conceitualmente há diferenciação entre estéril, rejeito e resíduos; todavia no presente trabalho todos esses termos serão designados como sendo somente “resíduos”.

O aproveitamento de resíduos de mineração esteve por muito tempo em um limbo político-legislativo. Conforme Maia e Reis (2019), tanto o código de Mineração – Decreto-Lei nº 227, de 1967 – (Brasil, 1967) quanto o regulamento anterior – Decreto nº 62.934/68 – (Brasil, 1968) não faziam qualquer menção a esse tipo de atividade. Em virtudes aos recentes acidentes envolvendo os rompimentos de barragens, foi dado o primeiro passo em direção a um ambiente regulatório mais propenso a projetos de aproveitamento de resíduos com o Decreto nº 9.406 (Regulamento do Código de Mineração), de 2018 (Brasil, 2018), que passou a incluir os conceitos de aproveitamento de resíduos na legislação. Contudo, a regulamentação completa da atividade ainda permanece pendente. O aproveitamento dos resíduos é também bastante enfatizado pela Recomendação N°014/2016-MPF-GAB/FT feita pelo MPF (MPF, 2016).

A Resolução nº 85/2021 (Brasil, 2021) que estabelece regras para aproveitamento de rejeitos de mineração e foi aprovada pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Ela estabelece, entre outras coisas, que caso queira se valer do 7º parágrafo do Art. 6º, da Lei nº 7.990 (Brasil, 1989), de 28 de dezembro de 1989, alterada pela Lei nº 13.540, de 18 de dezembro de 2017 (Brasil, 2017), em que há redução de 50% da alíquota de CFEM – Compensação Financeira pela Exploração Mineral –

para uso de rejeitos e estéreis em outras cadeias produtivas, o interessado deve informar a cadeia produtiva a que se destinam as novas substâncias.

2.2 Aproveitamento de resíduos minerais

Diversos trabalhos tem tratado do tema de reaproveitamento de resíduos de mineração. Segundo Borges (2021), o reaproveitamento se dá principalmente nas indústrias de cerâmica e concreto. Segue-se a isso as indústrias de tijolos, cimento, argamassa, pavimentação, material pozolânico e tinta ecológica.

Lopes e colaboradores (2020), por exemplo estudaram o reaproveitamento de estéril como agregado graúdo para fabricação de concreto. Utilizaram quatro litologias diferentes provenientes de uma mineradora no sudeste goiano e realizaram vários ensaios de caracterização para uso como agregado graúdo para concreto, como absorção de água, teor de materiais friáveis, resistência mecânica, dentre outros. Segundo eles, todas as amostras foram aprovadas nos ensaios, podendo ser utilizadas na construção civil.

Já Lima *et al.* (2021) utilizaram resíduos de rochas ornamentais como agregado miúdo para constituição de concretos. Produziram três misturas, com 10 %, 20 % e 50 % resíduos de rochas ornamentais em substituição ao agregado miúdo natural. Segundo eles, os concretos com teores de substituição de 10 % e 20 % apresentaram melhores resultados de resistência à compressão uniaxial, com ganhos de 6,02 % e 0,24 % aos 28 dias de idade, respectivamente.

Shinomiya, et al., (2019), por sua vez, realizaram planejamento de cenários para o reaproveitamento de resíduo de bauxita. Eles utilizaram um Sistema de ranking para as melhores alternativas de uso da lama vermelha. Segundo eles, o ranqueamento para uso do resíduo foi para (da maior pontuação para a menor): pavimentação de estradas, produção de cerâmica vermelha e a produção de cimento.

Azevedo e Vital (2018), verificaram o aproveitamento do rejeito do beneficiamento de caulim para produção de tinta ecológica. Foi realizada coleta e limpeza do rejeito, e escolhido aquele com melhor adequação (brancura e granulação fina) para produção da tinta (geotinta). O escolhido era misturado com cola e água e a tinta aplicada em paredes. Segundo os autores, a geotinta apresentou características similares às observadas nas tintas industrializadas: capacidade de cobertura, secagem rápida e resistente, com boa aderência à superfície.

2.3 O vidro e sua reciclagem

O vidro é sólido, duro e não cristalino. O principal fator que o difere dos cristais é o fato de que, enquanto esse último se constitui pelo ordenamento dos arranjos de moléculas que se repetem em períodos regulares, o vidro, por sua vez, apresenta o fenômeno de transição vítrea e não apresenta arranjo atômico regular e sistemático ao longo de distâncias atômicas relativamente grandes, portanto, sendo dito como sendo um material amorfo (Akerman, 2000; Babisk; et al., 2010).

Na formação do vidro o resfriamento se deve dar rapidamente, não permitindo tempo suficiente para que as moléculas se desloquem umas em relação às outras, de modo a migrar para posições energeticamente mais estáveis (menores), e assim constituírem os retículos periódicos no espaço, os quais são tecnicamente denotados por cristais. Conforme acentua Maia (2003), devido às particularidades que o vidro apresenta, é dito que ele pertence a um estado particular da matéria conhecido como estado vítreo. Algumas condições estereoquímicas e de termodinâmica reacional são necessárias para que a alta viscosidade da mescla de matérias-primas fundidas seja suficientemente alta, de modo a evitar a mobilidade dos íons e moléculas que dificulta a formação da fase vítrea, e — ademais disso — para que não haja a tendência majoritária de reversão para uma configuração mais estável (isto é: não haja desvitrificação). De um modo simplificado, essas condições necessárias à formação da fase vítrea, são consubstanciadas nas chamadas regras de Zachariasen (Zachariasen, 1932).

Conforme bem sistematizado por International Technologies Consultants, Inc. (1996), para se iniciar a implementação de uma fábrica de vidro é necessário ter os seguintes pontos definidos: (i) Identificar as matérias-primas necessárias e revisar a aceitabilidade de matérias-primas disponíveis localmente; (ii) Estimar a demanda presente e futura de vidro; (iii) Definir a estrutura e direcionamento da indústria de vidro; (iv) Estabelecer a localização, tamanho e produção recomendada da planta; (v) Estimar a lucratividade esperada e os custos operacionais e de capital para a planta proposta.

O vidro é dos poucos materiais totalmente recicláveis da civilização atual. Tal característica lhe garante ciclo infinito de renovação em sua cadeia produtiva. Além de infinita, a reciclagem não causa perda de qualidade ou pureza ao vidro (Glass Packing Institute, 2022). Nessa linha, Chaparro e colaboradores (2021) pontuam a importância da reciclagem do vidro, realçando que, para cada tonelada de vidro reciclado, gasta-se menos de 70 % do que se gastaria para fabricar mais vidro a partir das matérias-primas naturais. Além disso, o reciclo diminui o volume de aterros sanitários e o impacto ambiental na exploração desses insumos.

Apesar disso, de acordo com Vettorato *et al.* (2021), estima-se que apenas 14 % do vidro gerado como resíduo sejam destinados à reciclagem, sendo seu principal mercado as próprias produtoras de vidro, na chamada logística reversa.

2.4 Matéria prima na fabricação do vidro

O vidro sílica-cal-soda (comumente referido como soda-cal) é formado (especificando-se convencionalmente como óxidos) por SiO_2 , Na_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 e outros aditivos. Neste estudo serão abordadas fontes de matéria-prima para sua fabricação. As referidas regras de Zachariassen mostram que essas espécies químicas podem satisfazê-las. Para o caso de vidro sílica-cal-soda comum, tais regras podem ser sistematizadas como se segue: (i) cada átomo de oxigênio está ligado a não mais que dois átomos de sílica; (ii) o número de átomos de oxigênio ao redor de cada átomo de silício deve ser pequeno; (iii) poliedros de oxigênio compartilham vértices uns com os outros, mas não arestas ou faces; (iv) pelo menos três vértices em cada poliedro de oxigênio devem estar compartilhados (Zachariassen, 1932; Mackenzie, 1987).

O grande aproveitamento da areia quartzosa industrial acarreta pouca geração de resíduos, sendo assim escassas as fontes contendo valores do volume produzido em escala nacional ou estadual, porém, na produção de quartzito ornamental o mesmo fato não ocorre.

De acordo com Lima *et al.* (2007), segundo empresas que realizaram aproveitamento dos quartzitos como rocha ornamental na região de Ouro Preto-MG, para uma produção mensal de 1.500 m³, o volume total de resíduos soltos foi de aproximadamente 300.000 m³. Segundo Ramirio *et al.* (2008), na extração de quartzito, em certas ocasiões, o aproveitamento do material explotado chega a ser de somente 8 %, gerando assim 92 % de resíduos. Como pontuam Babisk *et al.* (2010), devido ao fato de os resíduos de quartzito serem ricos em SiO_2 (principal óxido formador da rede do vidro), uma possível finalidade para os resíduos seria utilizá-los na fabricação de vidro.

Quanto à barrilha atualmente empregada, é material sintético constituído de carbonato de sódio (Na_2CO_3), popularmente conhecido como soda, barrilha leve, ou cinza sódica. Trata-se de um pó esbranquiçado amplamente empregado como componente fundente nas massas de vidros de soda e cal por ser fonte de Na_2O , óxido que reduz a temperatura de fusão da sílica em 200°C (Victoria, 2018). De acordo com Falk (2008), o Brasil importa 100 % do necessário para seu consumo. Em relação às matérias-primas, Rosa *et al.* (2007) citam que a barrilha leve é o insumo mais custoso, devido a sua maior dificuldade para ser obtido, sendo responsável por cerca de 60 % do custo dos insumos, ainda que represente apenas 12 % em massa na farinha que alimenta os fornos de vidro.

Os calcários são rochas sedimentares compostas, basicamente, por calcita (CaCO_3), enquanto os dolomitos são também rochas sedimentares compostas, basicamente, por dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). O calcário calcítico é a rocha carbonatada mais comum, seguida do dolomito e do mármore (originário da metamorfização de calcários), esse último tendo a calcita como

principal constituinte mineralógico (Sampaio; Almeida, 2005). Como resíduos, calcita e dolomita são bastante produzidos nas etapas de extração e beneficiamento de mármore como rochas ornamentais. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (Abirochas, 2021), em 2020, a produção brasileira de mármore e travertino atingiu 2,3 milhões de toneladas. Ao invés de serem descartados como resíduos e dispostos em barragens ou encostas, a calcita e a dolomita gerados da exploração do mármore podem servir para diversas finalidades, entre elas, a produção de matérias-primas para o fabrico de vidro. Na região de Ouro Preto resíduos da lavra de jazimentos de calcários e mármore (formação Gandarela) são disponíveis.

Podem-se obter consideráveis quantidades de feldspato gerados como resíduos na lavra de rochas ornamentais, especialmente em granitos e pegmatitos. Conforme dados da Abirochas (2021), em 2020, a produção brasileira de granito e similares foi de 4,0 milhões de toneladas, ainda de acordo com eles, em Minas Gerais, nesse mesmo ano, foram produzidos cerca de 1,8 milhões de toneladas de rochas ornamentais, entre elas, granitos e pegmatitos.

Como ressaltam Luz e Coelho (2005), as indústrias de vidro e de cerâmica são as principais consumidoras de feldspato. No Brasil, essas consomem em torno de 88 % de todo o feldspato beneficiado produzido. No fabrico de vidro, o feldspato é usado principalmente como fonte de Al_2O_3 (estabilizador), Na_2O (liquefaciente ou fundente) e/ou K_2O (também liquefaciente ou fundente), aliás, ainda pode servir como fonte de SiO_2 (vitroformador) e CaO (estabilizador).

No que tange à abordagem econômica de empreendimento de grande porte, Conte (2011) fez intensiva modelagem por método de Monte Carlo, com aplicação de teoria das opções reais, de implantação de vidro plano (processo de flutuação em banho de estanho líquido) no Nordeste do Brasil. Esse pesquisador resalta, como dificuldade para implementação exitosa de grande empreendimento nessa área, o oligopólio do setor no Brasil e no Mundo.

3. Metodologia

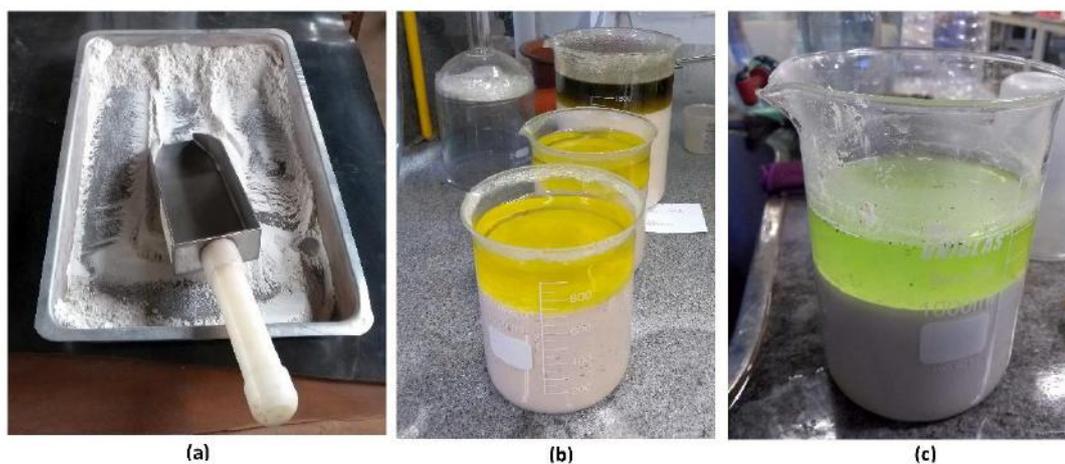
3.1 Materiais e métodos experimentais

Numa primeira etapa do trabalho, verificação expedita da adequabilidade do insumo regional para fabrico do vidro alguns ensaios prospectórios em escala de bancada foram levados a cabo nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Minas da UFOP, os quais mostraram ser factível o emprego de resíduos de quartzitos e de dolomita (locais) para o fabrico de vidro.

Nesses ensaios, foram empregadas amostras de dolomito (da formação Gandarela, supridor de CaO e MgO ao vidro), de quartzitos (supridor de SiO_2), de calcita (supridor de CaO), de carbonato de magnésio (supridor de MgO), de barrilha leve (amostra comercial, como supridor de Na_2O) e cacos de vidro hialino do tipo soda-sílica-cal. A formulação básica (padrão) foi a seguinte, em massa: 72,0 % de SiO_2 , 15,0 % de Na_2O , 10,0 % de CaO e 3 % de MgO , que fica dentro da faixa típica dos vidros comuns, a exemplo de Jurca *et al.* (2022) e Shen *et al.* (2003).

As amostras, empregadas neste trabalho, são oriundas de resíduos sólidos de mineração (quartzito e dolomita) e passaram por adequações físicas e químicas, tendo sido sujeitas a etapas de moagem em moinho de barras por 3.600 s (1,0 h), seguida de peneiramento a seco durante 1.200 s, lixiviação com solução de ácido 2-hidroxi-1,2,3-propanotricarboxílico (ácido cítrico; de fórmula nominal: $C_6H_8O_7$) e ácido etanodióico (ácido oxálico; de fórmula nominal: HO_2CCO_2H), cada ácido em concentração mássica de 5 %, e secagem em estufa elétrica durante 3.600 s sob temperatura de 300 °C. O objetivo da lixiviação foi a complexação de impurezas ferruginosas (em especial no quartzito), permitindo sua extração por lavagem subsequente. Parte dessas impurezas é oriunda da operação de cominuição em moinho de barras (com carcaça e barras de aço ao carbono). A Figura 1 ilustra o aspecto dessa dissolução seletiva dos íons de ferro.

Figura 1 — Aspectos do preparo de dolomita e quartzo: (a) dolomita cominuída; (b) amostras de dolomita lixiviada; (c) amostra de quartzo lixiviado (a lixívia sobrenadante esverdeada se deve à presença de Fe^{+2}).



Fonte: Autoria própria (2022).

A fusão foi realizada de modo incipiente, pela indisponibilidade de forno convencional para produção de vidro (temperatura típica de $1.550\text{ }^{\circ}\text{C}$), empregando-se alternativamente forno cerâmico, ou tocha portátil de mistura gasosa. O forno cerâmico, modelo Elektro Therm (da Linn High Therm), com dimensões internas de $0,60\text{ m} \times 0,60\text{ m} \times 0,75\text{ m}$, sendo utilizada temperatura máxima de $1.240\text{ }^{\circ}\text{C}$, rampa com taxa de aquecimento de $0,0833\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ e duração no de patamar de temperatura 7.200 s (120 min). O maçarico portátil (empregado em ensaios expeditos) usava como combustível mescla gasosa tipo MAPP, constituída de propino (ou metilacetileno, de fórmula: $\text{H}_3\text{C}-\text{C}\equiv\text{CH}$), propadieno ($\text{H}_2\text{C}=\text{C}=\text{CH}_2$) e propano ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$), produzido por Chem Penn). Essa mescla produz nominalmente a temperatura superior a $1.200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2 Análise econômica expedita

Análise técnica e econômica simplificada foi feita, de um empreendimento hipotético para fabrico de vidro soda-sílica-cal, empregando sempre que possível os insumos oriundos de passivos ambientais de minerações. Em face da limitação de uso de laboratórios, devido às normas sanitárias de distanciamento social durante a última pandemia (Covid-19), o foco deste trabalho foi a simulação econômica de empreendimento de pequeno porte para o aproveitamento de resíduos gerados em regiões próximas à cidade de Ouro Preto, embora os resultados possam ser extrapolados, com o devido cuidado, a outras regiões.

Para adoção de índices equalizados de custo industrial extraídos, neste trabalho, de dados da literatura técnica, a taxa de conversão monetária entre dólar americano e real considerada foi de US\$ 1.00 para R\$ 5,60, e entre dólar canadense e real, C\$ 1.00 para R\$ 4,53. Ressalte-se que tais conversões foram realizadas no ano de 2021 e podem sofrer flutuações no tempo, mas a metodologia pode ser aplicada independentemente do câmbio.

Utilizando mescla de dados nacionais e internacionais, foi possível ter uma perspectiva sobre tais valores. Por exemplo, em relação ao investimento necessário para construção de uma fábrica de vidro, enquanto os dados nacionais detalhados atualmente são de difícil acesso público (até pela prática de oligopólio), há dados internacionais sobre o setor na América do Norte, que estão disponibilizados para livre acesso de todos.

Considerando uma fábrica de vidro já implementada e em operação, segundo ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos – (2016), os principais gastos do empreendimento estão ligados com os consumos de energia provenientes dos fornos de têmpera e linhas de laminação que podem representar mais de 50 % dos gastos.

Rosa *et al.* (2007) citam que a fabricação de vidro consome aproximadamente $7,54 \times 10^3$ MJ/t (cerca de 200 m^3 de gás natural) na fusão, além de outros $7,2 \times 10^2$ MJ/t de energia elétrica em outras etapas do processo. Já, como ressalta o Departamento de energia dos EUA (U.S. Department Of Energy, 1996), enquanto, usando-se os princípios da termoquímica, seria necessária demanda energética unitária de cerca de $2,32 \times 10^3$ MJ para fusão de uma tonelada de vidro, na prática é preciso o dobro dessa energia, devido a ineficiências e perdas, ou seja, seria necessário consumo específico cerca de $4,62 \times 10^3$ MJ/t.

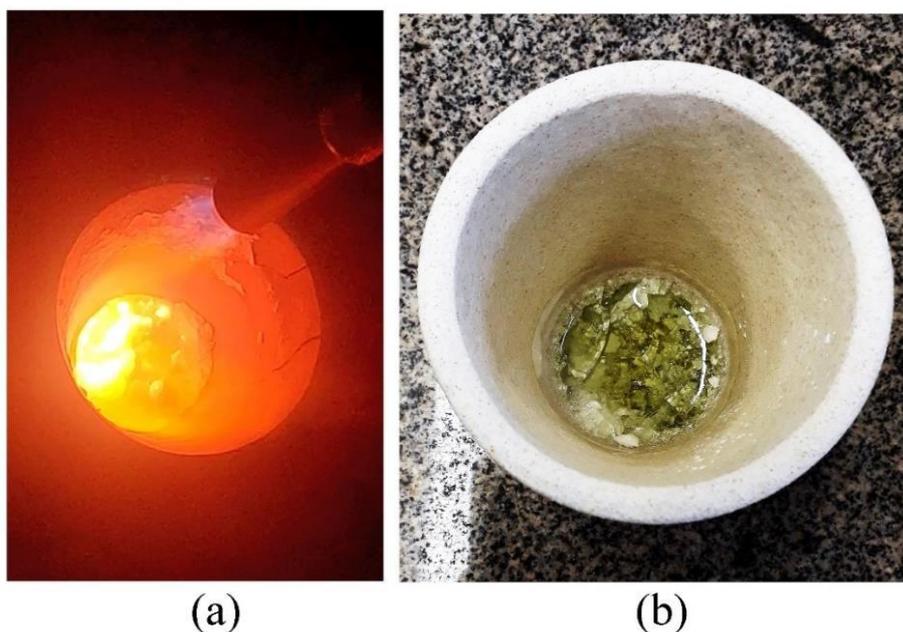
O custo de operação anual de uma fábrica de vidro foi estimado considerando dois cenários distintos, um de média produção (400 t/dia) e um de pequena produção (15 t/dia). Os valores necessários dos insumos de utilidades (água, gás natural e energia elétrica) foram retirados e estimados a partir dos dados apresentados por International Technologies Consultants Inc. (1996). No cenário de média produção, considerou-se eficiência de 95 % e, para a pequena produção, de 85 %. Para ambos os cenários de produção considerou-se taxa de produção constante e contínua durante 350 dias ao ano.

4. Resultados e discussão

4.1 Ensaios prospectórios

Vários ensaios prospectórios foram realizados, com diferentes formulações. Os resultados dos ensaios indicaram a formação de vidros. Os vidros formados não apresentaram totalmente características ideais de vidros comerciais, apresentando problemas como cores esverdeadas, devido à presença persistente de óxidos de ferro, mesmo após o processo de lixiviação, e a não fusão de parte da matéria-prima utilizada, como pode ser visto pela Figura 2. A adoção futura de resíduos finos do beneficiamento de minérios de manganês, disponível a pequena distância (no município vizinho de Conselheiro Lafaiete, MG), poderá facilmente sanar esse problema, uma vez que o manganês é um clássico insumo para induzir, ou amenizar efeitos de cromóforos na mescla vítrea (Gaddam *et al.*, 2014). Dentre os estados de oxidação do manganês, Mn^{+2} promove uma coloração rósea, a qual é complementar àquela esverdeada, ocasionada pela presença de Fe^{+2} (Abd-Allah, 2009). Essa condição permite o mascaramento do esverdeado do vidro devido a contaminação de ferro (comercialmente, adota-se limite superior de 0,0150 % de óxidos de ferro na areia para vidro). Na realidade as proporções de manganês e ferro, bem como de outros contaminantes como antimônio (em especial Sb^{+5}), devem ser bem controladas, para se evitar o fenômeno da solarização, que é a aquisição indesejada de cor devido à exposição continuada da peça vítrea a raios ultravioletas. Aspectos químicos desse fenômeno estão bem discutidos, por exemplo, por Long, Peters e Schreiber (1998).

Figura 2 — Fusão da mescla vítrea em escala de bancada: (a) com emprego de maçarico portátil; (b) resultado, mostrando a vitrificação incipiente.



Fonte: Autoria própria.

4.2 Análise econômica expedita

Simulação do empreendimento fabril, no nível de anteprojeto, foi levada a efeito para duas hipotéticas taxas de produção: uma delas levando em conta as condições locais, com baixa produção (15 t/dia) e, portanto, com baixo aporte de capital. Por seu turno, a outra escala de produção já considera um empreendimento com maior aporte de capital (400 t/dia).

A remuneração média dos funcionários, empregando valores típicos registrados para esse tipo de empreendimento, está apresentada na Tabela 1, a seguir. Embora possa parecer, em primeira análise, que os valores estejam subdimensionados para a época da coleta de dados, os dados estão baseados no levantamento bibliográfico, a exemplo dos dados da Relação Anual de Informações Sociais — RAIS do Ministério do Trabalho e do Emprego (CNQ, 2015).

Tabela 1 — Composição típica de custo com recursos humanos.

Categoria	Custos
Salário médio do setor no Brasil	R\$ 4.400,00
Vale transporte	R\$ 56,00
Vale refeição	R\$ 264,00
Fração 13º salário (8,3 %)	R\$ 365,20
Fração de férias (11,1 %)	R\$ 488,40
FGTS (8 %)	R\$ 352,00
Fração do FGTS com 13º salário e férias (1,4 %)	R\$ 61,60
INSS (20 %)	R\$ 880,00
Fração do INSS com 13º salário e férias (4 %)	R\$ 176,00
Valor mensal para manter um funcionário	R\$ 7.043,20
Gasto total anual por funcionário	R\$ 84.518,40

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os custos diretos da etapa de fabricação, categorizados como “material”, “pessoal” e “serviços”, foram calculados para ambos os cenários conforme apresentado nas Tabela 2 e Tabela 3. Os valores necessários dos insumos (água, gás natural e energia elétrica) foram retirados e estimados a partir dos dados apresentados por International Technologies Consultants Inc. (1996).

Tabela 2 — Estimativa de gastos para uma média produção de vidro.

Categoria	Item	Consumo	Custo unitário	Gasto anual	
Serviços	Energia Elétrica	2,41 x 10 ⁵ MJ/dia	R\$ 0,15/MJ	R\$ 12.663.000,00	
	Gás Natural	90000 m ³ /dia	R\$1,85/m ³	R\$ 58.275.000,00	
	Água	500 m ³ /dia	R\$3,17/m ³	R\$ 554.750,00	
Material	Matéria-Prima	Cacos de vidro	84,21 t/dia	R\$3025,00/t	R\$ 89.157.337,50
		SiO ₂	239,2 t/dia	R\$17,00/t	R\$ 1.423.002,00
		Na ₂ CO ₃	47,16 t/dia	R\$1170,00/t	R\$ 19.312.020,00
		Al ₂ O ₃ + aditivos	3,37 t/dia	R\$450,00/t	R\$ 530.775,00
		CaO + MgO	47,16 t/dia	R\$210,00/t	R\$ 3.466.260,00
Pessoal	Salário	200 funcionários/ano	R\$ 84.5181,40	R\$ 16.903.680,00	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3 — Estimativa de gastos para uma pequena produção de vidro.

Categoria	Item	Consumo	Custo	Gasto anual	
Serviços	Energia Elétrica	9x10 ³ MJ/dia	R\$0,15/MJ	R\$ 472.500,00	
	Gás Natural	2700 m ³ /dia	R\$1,85/m ³	R\$ 1.748.250,00	
	Água	20 m ³ /dia	R\$3,17/m ³	R\$ 22.190,00	
Material	Matéria-Prima	Cacos de vidro	3,53 t/dia	R\$3025,00/t	R\$ 3.737.387,50
		SiO ₂	10,02 t/dia	R\$17,00/t	R\$ 59.619,00
		Na ₂ CO ₃	1,98 t/dia	R\$1170,00/t	R\$ 810.810,00
		Al ₂ O ₃ + aditivos	0,14 t/dia	R\$450,00/t	R\$ 22.050,00
		CaO + MgO	1,98 t/dia	R\$210,00/t	R\$ 145.530,00
Pessoal	Salário	16 funcionários/ano	R\$ 84.518,40	R\$ 1.352.294,40	

Fonte: Elaborado pelos autores.

No cenário de média produção, considerou-se uma eficiência de 95 % enquanto, para a pequena produção, 85 %. Para ambos os cenários se considerou uma produção constante e contínua durante 350 dias ao ano. Considerando que os gastos com “material”, “pessoal” e “serviços” perfazem cerca de 30 % dos gastos de operação de uma fábrica de vidro, conforme mostrado na distribuição do custo de venda por tonelada de vidro apresentado por International Technologies Consultants Inc. (1996), os demais custos categorizados foram arbitrados a partir dos resultados calculados para esses de referência.

O preço de venda da tonelada do vidro foi determinado como sendo o gasto total dividido pela produção total. Os resultados estão apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5 a seguir. Nesses resultados, não foram contabilizados os ganhos devidos a fatores (em princípio, intangíveis) como a minoração de passivos ambientais pela utilização de resíduos industriais.

Tabela 4 — Estimativa de custo operacional anual de fábrica de vidro com produção média e distribuição do preço de venda por tonelada.

Categoria	Gasto (anual: 350 dias)	Partilha de custo
Material	R\$ 113.889.394,50	
Pessoal	R\$ 16.903.680,00	30%
Serviços	R\$ 71.492.750,00	
Financeiro	R\$ 168.289.534,17	25 %
Melhorias contínuas	R\$ 20.194.744,10	3 %
Administrativo	R\$ 33.657.906,83	5 %
Frete	R\$ 87.510.557,77	13 %
Despesas de vendas	R\$ 13.463.162,73	2,1 %
Lucro de venda	R\$ 148.094.790,07	22 %
Total	R\$ 673.496.520,17	100 %
PREÇO UNITÁRIO DE VENDA		R\$ 4.629,14/t

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 5 — Estimativa de custo operacional anual de fábrica de vidro com produção pequena e distribuição do preço de venda por tonelada.

Categoria	Gasto (anual: 350 dias)	Partilha de custo
Material	R\$ 4.775.396,50	
Pessoal	R\$ 1.352.294,40	33,5%
Serviços	R\$ 3.685.880,00	
Financeiro	R\$ 6.965.003,88	23,8 %
Melhorias contínuas	R\$ 835.800,47	2,9 %
Administrativo	R\$ 1.393.000,78	4,8 %
Frete	R\$ 3.621.802,02	12,4 %
Despesas de vendas	R\$ 557.200,31	1,9 %
Lucro de venda	R\$ 6.129.203,41	20,9 %
Total	R\$ 29.315.581,77	100 %
PREÇO UNITÁRIO DE VENDA		R\$ 5.306,67/t

Fonte: Elaborado pelos autores.

A utilização de água de chuva pode ser uma alternativa para redução de gastos. Relatório apresentado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2008) cita o caso da empresa de fabricação de vidro Pilkington Brasil Ltda., cujas necessidades de água chegavam a 350 m³/dia em 2002 e, em 2004, ampliaram a capacidade para 650 m³/dia, através da instalação de novo poço e decantador, conseguindo economia de 80 % no consumo de água gasta pela empresa, resultando em uma economia de R\$ 100.000,00/mês.

Além disso, o uso de resíduos sólidos de mineração ao invés de matéria-prima manufaturada pode reduzir consideravelmente os gastos com materiais para produção de vidro. É difícil avaliar estritamente os valores de redução de gastos através desse uso, uma vez que o aproveitamento dos mesmos depende dos custos associados a adequações com tratamento desses, o que por sua vez varia de resíduo para resíduo, além de que, como esses normalmente não são comercializados, o preço de venda precisaria ser primeiramente determinado. De outra parte, a minoração de passivos ambientais pesa favoravelmente à implantação de empreendimento que aproveitem resíduos e minérios marginais, refugados atualmente nas operações industriais.

5. Conclusão

Impactos ambientais causados pela mineração podem ser mitigados. Um dos principais passivos ambientais gerados pela mineração, os resíduos, ainda que ao longo de séculos tenham sido tratados como estorvo, têm sido objeto de novas abordagens que permitem até mesmo o seu aproveitamento econômico. Aliás, o aproveitamento de resíduos de mineração faz parte do cerne da nova política ambiental governamental criada com o Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018, acompanhada inclusive de incentivos fiscais tal como apresentado na Lei nº 13.240 de 2017.

No presente trabalho, ainda em caráter prospectivo, os custos de operação anual e o preço de venda da tonelada de vidro, respectivamente, foram estimados em cerca de R\$ 673 milhões e R\$ 4.629,14, para uma fábrica com produção média (400 t/dia), e em cerca de R\$ 29 milhões e R\$5.306,67, para uma fábrica com produção pequena (15 t/dia).

Apresentando alta concentração de determinadas substâncias como SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃ (expressas aqui em termos de óxidos, como usual), entre outras, os resíduos oriundos da lavra de minério de ferro, rochas ornamentais, calcário, dolomitos e etc. podem ser utilizados como matéria-prima na fabricação de diversos produtos, entre eles, o vidro.

Concluindo, do ponto de vista técnico, o fabrico de vidro a partir de resíduos de mineração surge como uma plausível possibilidade de aproveitamento desses recursos naturais. Do ponto de vista econômico, uma produção moderada é — numa primeira abordagem — extensamente custosa, seja para a implementação de uma fábrica, seja para a operação anual. Entretanto, nesta análise expedita, os ganhos socioeconômicos para a comunidade no entorno do empreendimento não foram quantificados, assim como o bônus ambiental de utilização de passivos da atividade mineradora da região. Numa abordagem mais profunda, que se encontra fora do escopo deste trabalho, essas rubricas devem ser monetizadas para se constituírem itens do fluxo de caixa descontado do empreendimento.

Para a implantação da opção de maior rentabilidade (média escala), a viabilidade do negócio dependeria da participação de eventual grande investidor, podendo ser ele, por exemplo, o próprio governo nacional ou mesmo alguma empresa de alto capital do próprio setor. Deve-se ressaltar, contudo, que uma pequena produção é muito menos custosa de ser mantida e poderia ser estimulada através de projetos e incentivos governamentais, para despertar o interesse do setor vidreiro pelo negócio, analisando-se a pertinência de implantação de arranjos produtivos locais.

Em vista do exposto, a fase de pesquisa de desenvolvimento tecnológico, com os desafios técnicos que surgirão em função das características dos insumos locais, ainda está para ser detalhada, com expectativas promissoras, tanto em termos conceituais, quanto em termos de facilitação para a implantação de um arranjo produtivo local.

Os fatores usualmente intangíveis como ganhos ambientais e sociais, embora sejam passíveis de monetização a partir de técnicas adequadas de monetização de intangíveis, a exemplo daquelas empregadas por Kahn *et al.* (2001) e Kahn (2005).

No que tange tais futuros estudos previstos para complementar a pesquisa realizada, prevê-se a continuidade de ensaios tecnológicos à temperatura mínima de 1.300 °C, variando-se a fração de fundente (carbonato de sódio e feldspato) e de rejeitos finos de pirolusita (como descolorante do excesso de óxidos de ferro nos rejeitos quartzosos).

Estudo econômico detalhado com fluxo de caixa descontado e análise de sensibilidade a variações nos custos de insumos e preços dos produtos, em especial empregando abordagem de Monte Carlo, também deverá ser levado a cabo, quando de alavancagem de arranjo produtivo local.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Instituto Tecnológico Vale — ITV, pelo apoio para elaboração do presente trabalho.

Referências

- Abd-Allah, R. (2009). Solarization behaviour of manganesecontaining glass: an experimental and analytical study, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 9(1), 37 – 53.
- Abirochas. (2021). *Produção brasileira de lavra*. <https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2021/10/Producao-Brasileira-Lavra-2021.pdf>.
- Abravidro. (2016). *Produzindo mais... e gastando menos*. <http://abravidro.org.br/produzindo-mais-e-gastando-menos/>.
- Akerman, M. (2000). *Natureza, estrutura e propriedades do vidro*. <http://www.ceap.br/material/MAT10052011151508.pdf>
- Azevedo, G. H., & Vital, A. F. M. (2018). Aproveitamento do rejeito das indústrias de beneficiamento do caulim para a produção de tinta ecológica à base de terra. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 15 (3), 242–247.
- Babisk, M. P., Vidal, F. W. H., & Correia, J. C. G. (2010). *Estudo de aproveitamento de resíduos finos de quartzo da região de Seridó*. In: Anais do II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste.
- Borges, T. C. (2021). *Levantamento do estado da arte em pesquisas dedicadas a destinar rejeito e/ou estéril a novos materiais de construção civil*. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá.
- Brasil. (1967). *Decreto-lei Nº 227 de 28 de fevereiro*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/de10227.htm.
- Brasil. (1968). *Decreto Nº 62.934, de 2 de julho*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/d62934.htm.
- Brasil. (1989). *Lei Nº 7.990, de 28 de dezembro*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7990.htm.
- Brasil. (2017). *Lei Nº 13.540, de 18 de dezembro*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/Lei/L13540.htm.
- Brasil. (2018). *Decreto Nº 9.406, de 12 de junho*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9406.htm.
- Brasil. (2021). *Resolução BCB Nº 85, de 8 de abril*. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-bcb-n-85-de-8-de-abril-de-2021-313194098>.
- Cetesb. (2008). *Reúso de água na indústria de vidro*. <https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2015/01/caso52.pdf>.
- Chaparro, M. A. C., Ramos, N. Z., Ramos, M. J. Z., Ramos, J. H. Z., Ibarra, L. C., Maciel, E. R., & Chaparro, M. C. (2021). A importância da reciclagem do vidro para a natureza. *Brazilian Journal of Development*, 7, 50239–50246.
- CNQ — Confederação Nacional do Ramo Químico Da CUT (2015). Panorama Setor de Vidro. <<http://cnq.org.br/system/uploads/publication/b2a03b701c902f59b717ce1e7395502e/file/panorama-vidros.pdf>>.
- Conte, F. G. R. (2011). *Análise da implantação de uma fábrica de vidros planos no nordeste do brasil com a aplicação de teoria das opções reais* (dissertation). Recife: UFPE. 104 p.
- Falk, A. O. F. (2008). *Eficiência relativa dos portos brasileiros na importação de barrilha*. Trabalho de Conclusão de Curso. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Feam. (2018). *Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração*. http://www.feam.br/images/stories/2018/RESIDUOS/Inventario_Mineração_ano_base_2017.pdf.
- Gaddam, A., Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., Pascual, M. J., & Ferreira, J. M. (2014). Role of manganese on the structure, crystallization and sintering of non-stoichiometric lithium disilicate glasses. *RSC Advances*, 4(26), 13581. <https://doi.org/10.1039/c3ra46393a>
- Glass Packing Institute. (2022). *Glass Recycling Facts*. <https://www.gpi.org/glass-recycling-facts>.
- International Technologies Consultants Inc. (1996). *Canada float glass project feasibility study*. <http://www.gov.mb.ca/iem/info/libmin/OF96-7.pdf>.
- Jurca, S., Chen, H., & Sen, S. (2022). Structural, shear and volume relaxation in a commercial float glass during aging. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 589, 121650. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121650>
- Kahn, J. R., Franceschi, D., Curi, A., & Vale, E. (2001). Economic and financial aspects of mine closure. *Natural Resources Forum*, 25(4), 265–274. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2001.tb00768.x>
- Kahn, J. R. (2005). *The economic approach to environment and Natural Resources*. Thomson/South-Western.
- Lima, A. F., Picanço, M. S., Pompeu Neto, B. B., & Coelho, G. T. F. (2021). Resíduos de rochas ornamentais como agregado miúdo para a constituição de concretos estruturais. *Brazilian Journals of Development*, 7 (7), 66500–66512.
- Lima, R. M. F., Da Silva, A. F. S., De Moraes, R. M. M., & Da Luz, J. A. M. (2007). Caracterização tecnológica de resíduos de pedreiras de quartzo da região de Ouro Preto/MG. *Rem: Revista Escola de Minas*, 60, (4), 663–668.
- Long, B. T., Peters, L. J., & D. Schreiber, H. (1998). Solarization of soda–lime–silicate glass containing manganese. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 239(1-3), 126–130. [https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(98\)00728-5](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(98)00728-5)
- Lopes, D. F., Silva, A. C., Barros, M. R., & Silva, E. M. S. (2020). Reaproveitamento de estéril de mineração como agregado graúdo para fabricação de concreto. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, 17, (1), 30–36.
- Luz, A. B., & Coelho, J. M. (2005). *Feldspato*. In: Rochas e Minerais Industriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT.

- Mackenzie, J. D. (1987). Applications of Zachariasen's rules to different types of noncrystalline solids. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 95-96, 441-448. [https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(87\)80142-4](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(87)80142-4)
- Maia, S. B. (2003). *O vidro e sua fabricação*. Interciência.
- Maia, T. R., & Reis, I. (2019). *O incentivo ao reaproveitamento de rejeitos*. <https://www.noticiasdeminerao.com/opiniao/news/1360623/o-incentivo-ao-reaproveitamento-de-rejeitos>.
- Ministério Público Federal. (2016). *Recomendação N°014/2016-MPF-GAB/FT*. <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-deimprensa/docs/recomendacao-dnmp>.
- G1 MG. (2018). *Quantidade de lama que vazou de barragem em mariana equivale a um 'pão de açúcar', diz presidente da fundação renova*. <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/quantidade-de-lama-que-vazou-de-barragem-em-mariana-equivale-a-um-pao-de-acucar-diz-presidente-da-fundacao-renova.ghtml>.
- Ramirio, R. F., Rodrigues, D., Pamplona, P., Francklin Junior, I., & Collares, E. G. (2008). Estudo comparativo de rejeitos de quartzo com outros agregados comercialmente utilizados como materiais de construção no Sudoeste de Minas Gerais. *Ciência Et Praxis*, 1 (1), 25-32.
- Rosa, S. E. S., Cosenza, J. P., & Barroso, D. V. (2007). *Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil*. Rio de Janeiro.
- Sampaio, J. A., & Almeida, S. L. M. (2005). *Calcário e Dolomito*. In: Rochas e Minerais Industriais. CETEM/MCT.
- Shen, J., Green, D. J., Tressler, R. E., & Shelleman, D. L. (2003). Stress relaxation of a soda lime silicate glass below the glass transition temperature. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 324(3), 277-288. [https://doi.org/10.1016/s0022-3093\(03\)00260-6](https://doi.org/10.1016/s0022-3093(03)00260-6)
- Shinomiya, L. D., Gomes, J. O., & Alves, J. O. (2019). Análises de cenários para reaproveitamento do resíduo de bauxita no Pará. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, 16 (1), 75-81.
- Silva, M. H. C., Lima, L. N. F., Silva, C. S., Silva, B. V., Tavares, H. S. A., Falcão, W. H. R., Sousa, M. L. P. S., & Lima, S. C. (2020). Resíduos sólidos: o uso da gestão ambiental como ferramenta para o manejo adequado do lixo. *Brazilian Journal of Development*, 6 (11), 85668-85677.
- U.S. Department of Energy. (1996). *Glass: a clear vision for a bright future*. Washington.
- Vettorato, J. G., Giehl, J. L. R., Chitolina, S., Bettker, D. R., & Freitas, N. C. W. (2021). O vidro e a importância de seu processo de reciclagem e logística reversa. *Di@Logus*, 10 (1), 25-47.
- Victoria, A. M. (2018). *Recursos minerais para a indústria cerâmica e vidreira*. In: Recursos minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE).
- Zachariasen, W. H. (1932). The atomic arrangement in Glass. *Journal of the American Chemical Society*, 54(10), 3841-3851. <https://doi.org/10.1021/ja01349a006>