VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS NA PRODUÇÃO DE VIDRO SODO-CÁLCICO: UMA ESTRATÉGIA PARA A ECONOMIA CIRCULAR

VALORIZATION OF ORNAMENTAL STONE WASTE IN THE PRODUCTION OF SODA-LIME GLASS: A STRATEGY FOR THE CIRCULAR ECONOMY

Janaína Davel dos Anjos
Aluna de Graduação da Engenharia de Minas 10º período
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Período PIBITI/CETEM: setembro de 2025 a agosto de 2026
janainadavel355@gmail.com

Mariane Costalonga de Aguiar
Orientadora, Química, D.Sc.
maguiar@cetem.gov.br

Monica Castoldi Borlini Gadioli
Coorientadora, Engenheira Química, D.Sc.
monicaborlini28@hotmail.com

RESUMO

A indústria de rochas ornamentais gera grandes volumes de resíduos durante as etapas de extração e beneficiamento, o que evidencia a necessidade de desenvolver alternativas para seu aproveitamento, reduzindo o descarte desses materiais e a extração de recursos naturais utilizados como matérias-primas. Nesse contexto, a valorização desses resíduos por meio de sua incorporação no desenvolvimento de novos materiais representa uma estratégia promissora para fomentar a economia circular, reduzir a exploração de recursos naturais e minimizar os impactos ambientais associados ao seu descarte. O objetivo com este trabalho foi desenvolver vidro sodo-cálcico utilizando resíduo de quartzito Perla Venata como fonte alternativa de sílica, avaliando sua viabilidade técnica, visando à valorização de resíduos da indústria de rochas ornamentais, à redução da extração de recursos naturais e à promoção dos princípios da economia circular. Inicialmente, o resíduo foi caracterizado por fluorescência de raios-X (FRX) e difração de raios-X (DRX), sendo posteriormente empregado na formulação do vidro. O vidro produzido foi caracterizado por fluorescência de raios-X (FRX), difração de raios-X (DRX), análise térmica, microdureza Vickers e resistência hidrolítica. Os resultados evidenciaram que o vidro produzido apresentou composição química compatível com a de vidros sodo-cálcicos comerciais, além de estrutura predominantemente amorfa, elevada estabilidade térmica, microdureza e resistência hidrolítica adequadas às aplicações desse tipo de material. Esses resultados demonstram a viabilidade técnica da utilização do resíduo de quartzito Perla Venata como matéria-prima alternativa na fabricação de vidros, contribuindo para a redução do descarte de resíduos, a substituição parcial de matérias-primas minerais convencionais e o fortalecimento dos princípios da economia circular e da sustentabilidade na cadeia produtiva de rochas ornamentais.

Palavras-chave: rochas ornamentais, resíduos, vidro sodo-cálcico.

ABSTRACT

The ornamental stone industry generates large volumes of waste during the extraction and processing stages, highlighting the need to develop alternatives for its utilization, reducing the disposal of these materials and the extraction of natural resources used as raw materials. In this context, the valorization of these wastes through their incorporation into the development of new materials represents a promising strategy to foster the circular economy, reduce the exploitation of natural resources, and minimize the environmental impacts associated with their

disposal. The objective of this work was to develop soda-lime glass using Perla Venata quartzite waste as an alternative source of silica, evaluating its technical feasibility, aiming at the valorization of waste from the ornamental stone industry, the reduction of natural resource extraction, and the promotion of the principles of the circular economy. Initially, the waste was characterized by X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD), and subsequently used in the glass formulation. The produced glass was characterized by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), thermal analysis, Vickers microhardness, and hydrolytic resistance. The results showed that the glass produced had a chemical composition compatible with that of commercial soda-lime glasses, as well as a predominantly amorphous structure, high thermal stability, microhardness, and hydrolytic resistance suitable for applications of this type of material. These results demonstrate the technical feasibility of using Perla Venata quartzite waste as an alternative raw material in glass manufacturing, contributing to the reduction of waste disposal, the partial replacement of conventional mineral raw materials, and the strengthening of the principles of circular economy and sustainability in the ornamental stone production chain.

Keywords: ornamental stones, waste, soda-lime glass.

1. INTRODUÇÃO

O vidro é um sólido amorfo que não apresenta estrutura atômica periódica de longo alcance e possui uma região característica de transformação vítrea. Considera-se vidro todo material, inorgânico, orgânico ou metálico, produzido por qualquer técnica de processamento, desde que apresente comportamento característico de transformação vítrea (Shelby, 2005).

A produção de vidro utiliza a sílica como principal formadora de rede, geralmente proveniente de areias quartzosas, quartzitos ou arenitos. Além da sílica, diferentes óxidos atuam como formadores, modificadores e intermediários da rede vítrea, conferindo propriedades específicas ao material (Luz; Lins, 2005; Axinte, 2011; Granados et al., 2021).

Como alternativa à utilização da areia, resíduos de rochas ornamentais têm sido empregados na fabricação de vidros. Estudos demonstram que esses resíduos permitem a obtenção de vidros sodo-cálcicos, ao chumbo e borossilicatos com propriedades semelhantes às dos vidros comerciais, evidenciando seu potencial como matéria-prima alternativa para a indústria vidreira (Babisk et al., 2023; Sabino et al., 2023; Gevu et al., 2024).

O aproveitamento desses resíduos contribui para reduzir seu descarte e a extração de recursos naturais, além de promover sua valorização e fortalecer práticas alinhadas aos princípios da economia circular (Chinelatto et al., 2015).

2. OBJETIVOS

Desenvolver vidro sodo-cálcico utilizando resíduo de quartzito Perla Venata como fonte alternativa de sílica, avaliando sua viabilidade técnica e seu potencial para valorização de resíduos da indústria de rochas ornamentais, redução da extração de recursos naturais e promoção da economia circular.

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais

Para a produção do vidro sodo-cálcico foi utilizado resíduo de quartzito Perla Venata como principal fonte de sílica, além dos reagentes carbonato de sódio (Na_2CO_3) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$) como óxidos modificadores de rede.

3.2. Caracterização do Resíduo de Perla Venata

A caracterização tecnológica dos resíduos de rochas ornamentais foi realizada por meio das técnicas de difração de raios-X (DRX) e fluorescência de raios-X (FRX). A análise por DRX foi utilizada para identificar as fases minerais presentes no material, enquanto a FRX foi empregada para determinar sua composição química.

3.3. Caracterização do Vidro Sodo-Cálcico

A composição química dos vidros foi determinada por fluorescência de raios-X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF), utilizando espectrômetro PANalytical Axios Max, após preparação das amostras pelo método de fusão com mistura de tetraborato e metaborato de lítio (1:10, amostra/fundente) e iodeto de lítio como agente desmoldante. A perda por calcinação (PPC) foi determinada em analisador termogravimétrico LECO TGA-701 a 1000 °C. A identificação da estrutura amorfa foi realizada por difração de raios-X (DRX). O comportamento térmico foi avaliado por análise térmica simultânea (TG-DSC) no IFES *campus* Vitória em equipamento NETZSCH STA 449 F3 Jupiter, na faixa de 20 a 1200 °C, sob atmosfera de argônio e taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1}. A microdureza Vickers foi determinada em microdurômetro FM-700, após preparação metalográfica das amostras por lixamento e polimento, realizando-se cinco indentações com carga de 300 gf (gramas-força) e tempo de aplicação de 10 s. A resistência hidrolítica foi realizada na UFES *campus* Vitória e avaliou a resistência química do vidro à água a 98°C. O método consiste em submeter grãos de vidro à água aquecida e determinar, por titulação, a quantidade de álcalis liberados, classificando o material quanto à sua resistência hidrolítica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do Resíduo

A composição química do resíduo de quartzito Perla Venata mostrou que o dióxido de silício (SiO_2) é o principal constituinte do material, com teor de 93,40%, sendo o principal óxido formador da rede vítrea. Além da sílica, foram identificados outros óxidos em menores proporções, tais como Fe_2O_3 (0,11%), Al_2O_3 (5,09%), K_2O (1,08%) MgO (0,166%), entre outros.

O difratograma de raios-X apresentou o quartzo como fase mineral predominante, em concordância com os resultados da composição química do FRX. Além do quartzo, foram identificados picos característicos de albita.

4.2. Caracterização do Vidro Produzido

A Tabela 1 apresenta a composição química do vidro produzido a partir do resíduo, onde apresenta uma composição de oxido de silício de 66,8% e o oxido de cálcio e sódio com 11,9% e 12 %, respectivamente. De acordo com Akerman (2000) e Shelby (2005), no vidro sodo-cálcico comercial o teor de sílica está entre 72% e 74% e o teor de óxido de sódio e cálcio entre 8% e 12%, 12% e 17%, respectivamente. Dessa forma, embora o teor de sílica do vidro produzido seja inferior ao normalmente encontrado em vidros sodo-cálcicos comerciais, os teores de óxido de sódio e óxido de cálcio encontram-se dentro da faixa dos vidros sodo cálcicos comerciais, o que indica compatibilidade com o tipo de vidro produzido.

Tabela 1: Composição do vidro sodo-cálcico produzido com resíduo de quartzito.

Composição	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	MgO	TiO_2	Na_2O	P_2O_5	SO_3	ZrO_2	PPC*
Vidro sodo-cálcico	66,8	4,3	2,6	0,58	11,9	0,33	0,66	12,0	0,21	0,19	0,10	0,11

*PPC – Perda por Calcinação.

A Figura 1 apresenta a difração de raios- X do vidro produzido. Nota-se a ausência de picos cristalinos, indicando que o material possui estrutura amorfa e não apresenta fases cristalinas. Além disso, verifica-se a presença de um halo amorfo na faixa de aproximadamente 25° (2θ), devido as características associadas ao dióxido de silício (SiO_2). Esses resultados confirmam a natureza amorfa do vidro produzido.

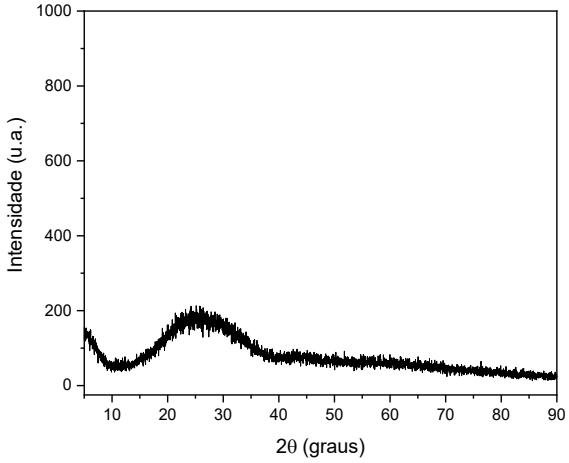


Figura 1: Difratrograma de raios-X do vidro sodo-cálcico produzido com resíduo de quartzito.

A Figura 2 apresenta as curvas de análise térmica simultânea (TG-DSC) do vidro sodo-cálcico produzido com resíduo de quartzito Perla Venata. A curva DSC evidencia uma inflexão em aproximadamente 603 °C, atribuída à temperatura de transição vítrea (Tg), correspondente ao aumento da mobilidade da estrutura amorfa do vidro. Em torno de 1050 °C, observa-se um pico exotérmico, associado ao processo de cristalização do material durante o aquecimento, indicando a formação de fases cristalinas a partir da matriz vítrea. A curva TG apresentou baixa variação de massa ao longo do ensaio, evidenciando elevada estabilidade térmica do vidro e indicando a ausência de processos significativos de decomposição ou volatilização na faixa de temperatura investigada.

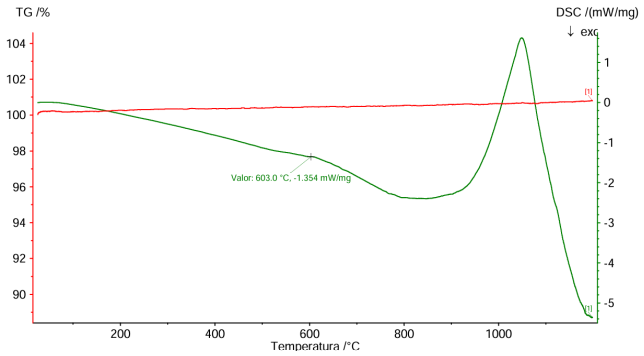


Figura 2: Curva TG/DSC do vidro sodo-cálcico produzido com resíduo de quartzito.

A Tabela 2 apresenta o valor médio de dureza do vidro sodo-cálcico produzido, correspondente a 4,88 GPa. De acordo com Shelby (2005), a dureza típica dos vidros é de aproximadamente 6,0 GPa, sendo que a maioria dos vidros silicáticos apresenta valores que podem variar cerca de 30% em relação a esse valor de referência. Dessa forma, nota-se que o vidro produzido possui dureza compatível com os vidros sodo-cálcicos comerciais.

Tabela 2: Microdureza do vidro sodo-cálcico produzido com resíduo de quartzito.

Vidro	Dureza (GPa)	Desvio Padrão
Sodo-cálcico	4,88	±0,38

A Tabela 3 apresenta os valores da resistência hidrolítica do vidro sodo-cálcico produzido. O material apresentou consumo de ácido de 0,606 mL/g, sendo classificado como HGB 3, o que indica resistência hidrolítica média. Esse resultado está de acordo com a ISO 719, na qual a classe HGB 3 corresponde a valores entre 0,20 e 0,85 mL/g, caracterizando materiais com resistência hidrolítica média. Segundo Akerman (2013), a resistência hidrolítica está diretamente relacionada à composição química do vidro, especialmente ao teor de óxidos alcalinos. Quanto maior o teor de álcalis na composição, maior é a solubilidade do material em meio aquoso e, consequentemente, menor é sua resistência ao ataque químico.

Tabela 3: Resistência hidrolítica do vidro sodo-cálcico produzido com resíduo de quartzito.

Classe	mL/g	Interpretação
HGB 3	0,606	Resistência média

4.3. Vidro Sodo-Cálcico Produzido

A Figura 3 apresenta o vidro sodo-cálcico produzido a partir do resíduo de Perla Venata, o qual apresenta coloração verde escura. Essa coloração estar associada à presença de óxidos de ferro (Fe_2O_3) no resíduo utilizado como matéria-prima, uma vez que o ferro é um dos principais elementos responsáveis pela coloração de vidros.

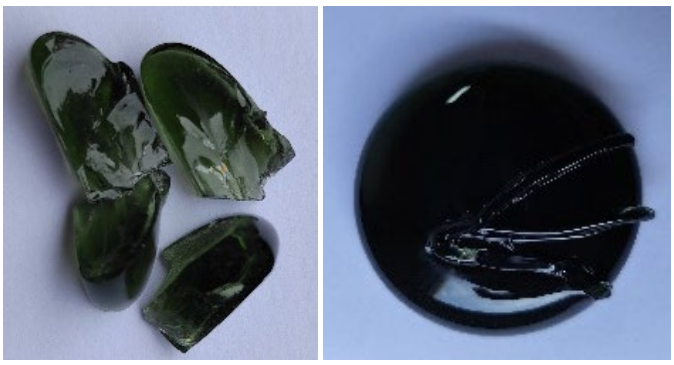


Figura 3: Vidro sodo-calcico produzido.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que os resultados obtidos nas caracterizações tecnológicas dos vidros produzidos apresentaram valores compatíveis com os vidros sodo-cálcicos comerciais. Esses resultados demonstram a viabilidade da utilização do resíduo de rocha ornamental Perla Venata como matéria-prima alternativa na produção de vidros sodo-cálcicos. Além de agregar valor ao resíduo industrial, sua aplicação contribui para a redução de descartes dos resíduos em larga escala e para a diminuição da extração de areia, importante fonte de sílica utilizada na indústria vidreira.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq nº 161657/2025-7 pela bolsa concedida, ao CETEM pela realização dos ensaios, à Mariane Costalonga de Aguiar pela orientação, à Viviana Possamai Della Sagrillo pela colaboração, apoio e por viabilizar a produção dos vidros no IFES Campus Vitória, à Thana Milena, pelo auxílio na produção dos vidros e à Daina Bourguignon, pela execução do ensaio de resistência hidrolítica na UFES Vitória.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERMAN, M. Introdução ao Vidro Plano e sua Produção. Escola do Vidro. 2013. p. 4-56.

AKERMAN, M. Natureza, estrutura e propriedades do vidro. Centro Técnico de Elaboração do Vidro. CETEV, 2000.

AXINTE, E. Glasses as engineering materials: a review. Materials & Design, [S.L.], v. 32, n. 4, p. 1717-1732, abr. 2011. Elsevier BV.

BABISK, M. P.; GAVA, V. B.; SAMPAIO, J. A.; TABELINI, D. B.; GADIOLI, M. C. B.; VIEIRA, C. M. F. Desenvolvimento de vidros ao chumbo contendo resíduos de rochas ornamentais. Revista observatorio de la economia latinoamericana, v. 21, n. 12, p. 25100-25113, 2023.

CHINELATTO, A. S. A.; CHINELLATTO, L. A; MUNHOZ, D. E. F.; GRALIK, G. Estudo da viabilidade do uso de resíduo de polimento de rochas ornamentais em porcelanas. matéria, v. 20, n. 4, p. 1075-1086, 2015.

GEVU, G.; BABISK, M. P.; GADIOLI, M. C. B.; SAMPAIO, J. A.; SOFFNER, M. E. Granite waste as a source of network former for soda-lime glass production: Evaluation of their potential use in proportions higher than 70%. materials letters. v. 377, p. 137420, 2024.

GRANADOS, L.; MORENA, R.; TAKAMURE, N.; SUGA, T.; HUANG, S.; MCKENZIE, D. R.; BAILLIE, A. Silicate glass-to-glass hermetic bonding for encapsulation of next-generation optoelectronics: a review. Materials Today, [S.L.], v., n., p. 1-25, fev. 2021. Elsevier BV.

International Standard For Standardization. ISO 719:1985 – Glass: Hydrolytic resistance of glass grains at 98 °C – Method of test and classification. ISO, 1985.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Areia Industrial. In: Luz, Adão Benvindo da; Lins, Fernando A. Freitas (Ed.). Rochas E Minerais Industriais: Usos E Especificações. 2. Ed.: Cetem, 2005. Cap. 5. P. 103-124.

SABINO, T. M. L.; GADIOLI, M. C. B.; AGUIAR, M. C.; BABISK, M. P. Vidros produzidos com rejeitos do beneficiamento de rochas ornamentais. CETEM, In: XXXII Jornada de Iniciação Científica e VIII Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2023.

SHELBY, J. E. Introduction to glass science and technology. 2005.