

FABRICAÇÃO DE VIDROS ECOEFICIENTES A PARTIR DA RECICLAGEM E APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

VANESSA DUARTE DEL CACHO¹, ANA CAROLINE MOURA DA SILVA¹

¹FATEC-SP – Departamento de Ensino Geral/Tecnologia em Materiais

vanessa.cacho@fatec.sp.gov.br

Title: Fabrication of Eco-efficient Glass from the Recycling and Utilization of Agro-industrial Waste

Eixo Tecnológico: *Recursos Naturais*.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa sustentável e inovadora para a fabricação de materiais vítreos, a partir da utilização de resíduos do setor agroindustrial. Foi utilizada a casca de coco seco (CC), juntamente com outros resíduos já caracterizados em trabalhos anteriores, como a casca de arroz (CA) e a casca de ovo galináceo (COG). Estes resíduos apresentam características químicas e mineralógicas adequadas para a adição em formulações vítreas. A CC, passou por beneficiamentos físico-químicos de lavagem, secagem em estufa, moagem, peneiramento e calcinação para eliminar matéria orgânica e obtenção dos óxidos precursores. As cinzas da casca do coco (CCC), foram caracterizadas por perda do fogo, Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Difração de Raio X (DRX), Fluorescência de Raio X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Após análises, a CCC foi incorporada em amostras vítreas, para avaliar a substituição da SiO₂, CaO e K₂O na composição de vidros sodo-cálcicos. As amostras foram produzidas a partir da fusão de matérias-primas comerciais, juntamente com a CCC, CCA e COG. Os resultados das análises dos vidros, confirmaram os elementos de composição esperados para os resíduos incorporados, a estrutura amorfa dos vidros sem indício de cristalização e uma alta transmitância luminosa com ausência de coloração. Os vidros produzidos com os 3 resíduos apresentaram propriedades compatíveis com os vidros comerciais, corroborando a possibilidade do reaproveitamento dos resíduos agroindustriais na fabricação de vidros sodo-cálcicos.

Palavras-chave: *resíduos agroindustriais, vidro sodo-cálcico, reciclagem, sustentabilidade, casca de coco.*

Abstract

This work aims to present a sustainable and innovative alternative for the manufacture of glassy materials, using waste from the agro-industrial sector. Dry coconut shell (CC) was used, along with other waste already characterized in previous works, such as rice husk (CA) and chicken eggshell (COG). These wastes have chemical and mineralogical characteristics suitable for addition to glassy formulations. The CC underwent physical-chemical processing of washing, oven drying, grinding, sieving and calcination to eliminate organic matter and obtain precursor oxides. Coconut shell ash (CCC) was characterized by loss on ignition, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray Diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF) and Scanning Electron Microscopy (SEM). After analysis, CCC was incorporated into glass samples to evaluate the replacement of SiO₂, CaO and K₂O in the composition of soda-lime glass. The samples were produced from the fusion of commercial raw materials, together with CCC, CCA and COG. The results of the glass analyses confirmed the expected composition elements for the incorporated residues, the amorphous structure of the glasses without evidence of crystallization and a high light transmittance with no coloration. The glasses produced with the three residues presented properties compatible with commercial glasses, corroborating the possibility of reusing agro-industrial residues in the manufacture of soda-lime glass.

Key-words: *agro-industrial waste, soda-lime glass, recycling, sustainability, coconut husk.*

1. Introdução

Recentemente a pesquisa por materiais sustentáveis e ecoeficientes aplicados em diversos tipos de produtos, tem gerado muito interesse tanto da comunidade científica quanto do meio

industrial. O que a ecoeficiência busca é reduzir o consumo de recursos materiais e energéticos mantendo a qualidade e o crescimento econômico. Nesse cenário, o atual desafio é produzir produtos com menor consumo de recursos e gerando menos resíduos, sendo necessário, portanto, avaliar todos os impactos ambientais causados por um determinado material, desde o início da extração de matérias-primas até o final da sua vida útil, bem como considerar a possibilidade de reaproveitamento e incorporação de resíduos de diversos tipos na produção de novos materiais [1].

A transformação de resíduos é uma alternativa que permite não apenas minimizar os impactos ambientais, como também, a sua valorização e comercialização como matéria-prima. [2]. A utilização de resíduos na composição de vidros também tem sido alvo de pesquisas, porque a estrutura amorfa dos vidros permite a solubilização de grandes quantidades de diferentes elementos na sua composição. Além disso, existe claramente uma necessidade na indústria vidreira de inovação nas formas de reciclagem e reutilização de materiais mais baratos para reduzir custos e resíduos. A incorporação de resíduos em matrizes vítreas é menos estudada e com poucas publicações [3-5].

O trabalho teve como objetivo estudar resíduos agroindustriais de baixo custo, e a sua utilização como matérias-primas para a fabricação de vidros comerciais (sodo-cálcicos). Foi escolhido o resíduo da casca de coco, que após a beneficiamento e eliminação de compostos orgânicos, apresenta teores de SiO_2 (sílica), K_2O (óxido de Potássio), Na_2O (óxido de sódio) e CaO (óxido de cálcio), principais constituintes do vidro comercial sodo-cálcico. Foram utilizados também, resíduos já estudados anteriormente pelo grupo [6,7], a cinza de casca de arroz (CCA) e a casca de ovo galináceo (COG), que podem ser usados como fontes complementares de SiO_2 (sílica) e CaO (óxido de cálcio).

Adicionalmente, o trabalho visou apresentar uma forma sustentável, inovadora e de baixo impacto ambiental para a fabricação de materiais vítreos ecoeficientes, a partir da utilização de resíduos do setor agroindustrial. Estes resíduos, após tratamento térmico e eliminação de material orgânico, podem substituir totalmente matérias-primas como a sílica, o calcário, barrilha e o feldspato, utilizadas na fabricação do vidro sodo-cálcico.

Os vidros sodo-cálcicos representam a maior parcela da produção mundial de vidros comerciais, e devido à sua vasta aplicação, foi o vidro escolhido para ser fabricado.

Evidencia-se que apesar de haver trabalhos reportados na literatura para um amplo conjunto de resíduos sólidos industriais introduzidos com sucesso em matrizes cerâmicas, há poucas publicações na literatura referente à fabricação de vidros sodo-cálcicos utilizando cinzas provenientes de resíduos agroindustriais [3-5].

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

A casca de arroz (CA) utilizada neste trabalho foi cedida pela empresa Cerealista São João localizada na cidade de Rio Brilhante (MS). Já a casca de ovo galináceo (COG) foi fornecida pela empresa alimentícia Casa de Bolos (unidade Bom Retiro), e a casca de coco seco (CC) foi doada pela empresa Coquim.

Para a fabricação das amostras vítreas foram utilizados, além dos resíduos mencionados (CA, COG e CC), os reagentes comerciais: carbonato de sódio (Na_2CO_3) da Sigma Aldrich, óxido de cálcio (CaO) da Vetec e sílica (SiO_2) da mineradora Jundu.

2.2. Metodologia

2.2.1 Beneficiamento dos resíduos

A casca de arroz na forma bruta (denominado de CA) foi seca em estufa a 65°C por 24 horas, uma vez que apresentou umidade. A segunda etapa do beneficiamento da CA foi a moagem em moinho de facas Thomas Wiley modelo 4, e peneiramento, com peneira da marca Granutest, abertura de 0,30 mm, ABNT 50 e Tyler 48, para separação granulométrica da casca. O moinho de facas utilizado pertence ao LM²C² (Laboratório de Moagem de Alta Energia, Materiais de Carbono e Compósitos) do PMT (Poli-USP).

A CA foi calcinada em um forno elétrico do Laboratório de Síntese de Materiais (LSM) da FATEC-SP, na temperatura de 1200°C por 12h com taxa de 10°C/min, para eliminação de matéria orgânica. As condições de queima foram baseadas em trabalhos anteriores [6,7], e constataram que, tempos mais longos são necessários para eliminação do alto teor de impurezas orgânicas presentes na casca de arroz.

A casca de ovo galináceo foi lavada diversas vezes em água corrente e mantida de molho por algumas horas. Após enxágue, foram retiradas as membranas internas, e lavadas novamente em água deionizada por 24 horas. Após a remoção do banho, as cascas foram quebradas manualmente, para diminuir o volume, facilitando seu armazenamento.

A etapa de secagem foi realizada em uma estufa a 100°C por 24 h do Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais (LPCM), da FATEC-SP. Após o resfriamento foi realizada a etapa de moagem em moinho de bolas por 24 h para redução granulométrica, obtendo um pó fino da COG. A calcinação foi realizada a 950°C por 3 horas em um forno elétrico da marca Jung do LPCM.

A casca de coco passou pela etapa de moagem em moinho de facas do LM²C² do PMT (Poli-USP). Em seguida a CC foi peneirada para separação granulométrica. O pó resultante do peneiramento, foi calcinado em um forno elétrico a uma temperatura de 800°C por 12h, no LSM da FATEC-SP.

2.2.2. Fabricação das Amostras Vítreas

Amostras vítreas de silicato sodo-cálcico foram produzidas com os precursores apresentados na Tab. 1, a partir da fusão das matérias-primas comerciais com a CCC, CCA e COG.

Tab. 1 – Precursores utilizados na preparação das amostras.

Óxidos	Função do Óxido	Precursores utilizados
SiO₂	Formador	CCA/ CCC/ areia
NaO	Fundente	Na ₂ CO ₃ Comercial
CaO	Estabilizante	COG/ CCC/ CaO Comercial
K₂O	Fundente	CCC

Fonte: (AUTOR, 2025).

Para as amostras fabricadas, foram utilizados como fonte do óxido formador: CCA calcinada a 1200°C por 12 horas e sílica comercial (areia). As fontes do óxido estabilizante foram COG calcinada a 950 °C por 3 h, CCC calcinada a 800 °C por 12 h e CaO comercial. As fontes do óxido fundente foram: carbonato de sódio comercial (Na₂CO₃) e a CCC calcinada a 800 °C por 12 h.

Os outros óxidos presentes na composição vítrea seriam a alumina (Al₂O₃), proveniente do cadinho usado durante a fusão, e as impurezas contidas nas matérias-primas.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

As proporções em peso utilizadas neste trabalho foram baseadas na composição comercial de vidros sodo-cálcicos [8], conforme apresentada na Tab. 2.

Foram produzidas duas amostras, para avaliar o potencial da CCC em substituição da SiO_2 , CaO e K_2O na composição do vidro. Os outros resíduos, CCA e COG, já foram estudados anteriormente e também foram incorporados como fontes de SiO_2 (sílica) e CaO (óxido de cálcio) na fabricação de amostras vítreas [6,7].

Tab. 2 - Matérias-primas e composição química (% peso) para a fabricação das amostras.

Amostras	Fonte de SiO_2	Fonte de CaO	Fonte de Na_2O	Fonte de K_2O
Vidro 1	Areia Comercial	CaO	Na_2CO_3	CCC (800°C/12 h)
Vidro 2	CCA (1200°C/12 h) CCC (800°C/12 h)	COG (950 °C/3 h) CCC (800°C/12 h)	Na_2CO_3	CCC (800°C/12 h)
Composição	70%	9%	17%	2%

Fonte: (AUTOR, 2025).

Os reagentes e resíduos foram pesados individualmente em uma balança analítica e em seguida, misturados manualmente. A mistura foi então transferida a um cadinho de alumina comercial de alta pureza. O cadinho contendo a composição do vidro, foi colocado no forno antes do início do aquecimento programado para que o aquecimento do cadinho ocorresse juntamente com o forno, a fim de evitar possíveis choques térmicos na alumina.

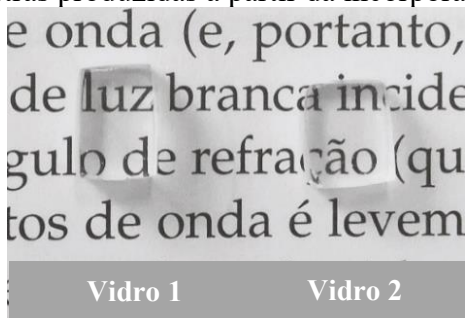
O cadinho foi levado a um forno elétrico para a fusão a 1600°C durante 1 h (para as duas amostras), com taxa de aquecimento de 15°C/min. O forno elétrico utilizado, da marca EDG F1700-I, pertence ao LM2C2 do PMT (Poli-USP).

Após o tempo de fusão, a massa vítrea foi vertida em uma placa metálica em temperatura ambiente. Segundos depois, o vidro é transferido para um refratário pré-aquecido a 530°C, que corresponde a temperatura de tratamento térmico. Este procedimento foi adotado, pois a permanência do molde metálico no forno a 530°C levava à oxidação do mesmo.

O vidro foi então levado ao tratamento térmico a 530°C durante 3 h. Esse tratamento corresponde ao recozimento, que é feito visando reduzir as tensões internas do vidro, que poderiam ser causados pelo choque térmico. Após este período, o forno contendo a amostra vítrea, é resfriado lentamente até a temperatura ambiente.

As amostras produzidas foram submetidas ao corte, lixamento e polimento em uma politriz, com lixas d'água de diferentes granulações (180, 400, 600, 1200 e 2000). Na última etapa é utilizada uma suspensão de alumina, de granulometrias entre 1 e 5 μm . A Fig. 1 apresenta imagem das amostras produzidas de acordo com os reagentes e resíduos da Tab. 2.

Fig. 1 - Amostras produzidas a partir da incorporação dos resíduos.



Fonte: (AUTOR, 2025).

2.2.3 Caracterização

Os resíduos após calcinação (CCA, COG e CCC) foram caracterizados por Fluorescência de Raio X (FRX) no equipamento Shimadzu EDX720, do CCTM no IPEN/USP.

As amostras vítreas produzidas foram analisadas por FTIR, DRX e Transmitância. Para a espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi utilizado o equipamento Nexus 670 FTIR Thermo Nicolet. O difratômetro usado foi o Panalytical Empyrean, do Laboratório de Sistemas Integráveis (LSI) da Poli-USP. Os espectros de transmissão no VIS foram obtidos utilizando um espectrômetro da Ocean Optics, do Laboratório de Tecnologia em Materiais Fotônicos e Optoeletrônicos (LTMFO) da FATEC-SP.

3. Resultados e Discussão

A Tab. 3 apresenta os resultados de FRX com as porcentagens (em peso) dos componentes inorgânicos presentes nos resíduos (CCA, COG e CCC) após a calcinação. Os componentes químicos detectados na análise de FRX permitem estimar a fusibilidade das cinzas da casca de arroz, casca ovo galináceo e casca de coco.

Tab. 3: Resultados de FRX da CCA, COG e CCC após etapa de calcinação.

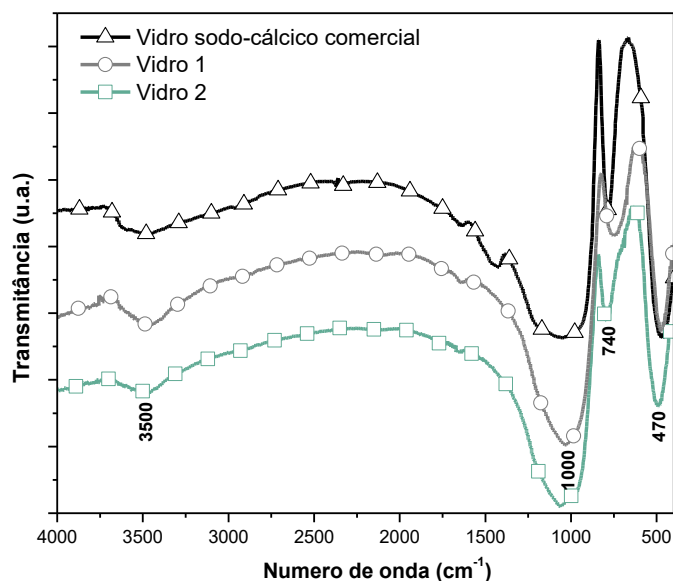
Componentes	CCA	COG	CCC
	1200°C/12h (%peso)	950°C/3h (%peso)	800°C/12h (%peso)
SiO ₂	96,042	-	31,759
CaO	0,802	99,464	19,863
K ₂ O	2,210	0,167	18,318
MgO	-	-	11,447
P ₂ O ₅	0,589	-	-
MnO	0,253	-	-
Fe ₂ O ₃	0,091	-	6,850
Al ₂ O ₃	-	-	1,989
SrO	-	0,224	-
SO ₃	-	0,111	-
Outros	0,013	0,035	9,77

Fonte: (AUTOR, 2025).

Os resultados da Tab. 3 demonstram que a temperatura empregada no processo de calcinação, foi eficaz na volatilização dos elementos orgânicos, da umidade adsorvida e do carbono residual contidos nas cascas dos resíduos, resultando em um percentual significativo de óxidos como sílica, óxido de cálcio, óxido de potássio e óxido de magnésio, que são componentes essenciais na formação de vidros silicatos sodo-cálcicos.

Na Fig. 2, estão apresentados os espectros de infravermelho do vidro sodo-cálcico comercial (para comparação) e dos vidros produzidos a partir dos resíduos (CCA, COG e CCC).

Fig. 2 – Espectros de FTIR dos vidros produzidos com resíduos e de uma amostra comercial.



Fonte: (AUTOR, 2025).

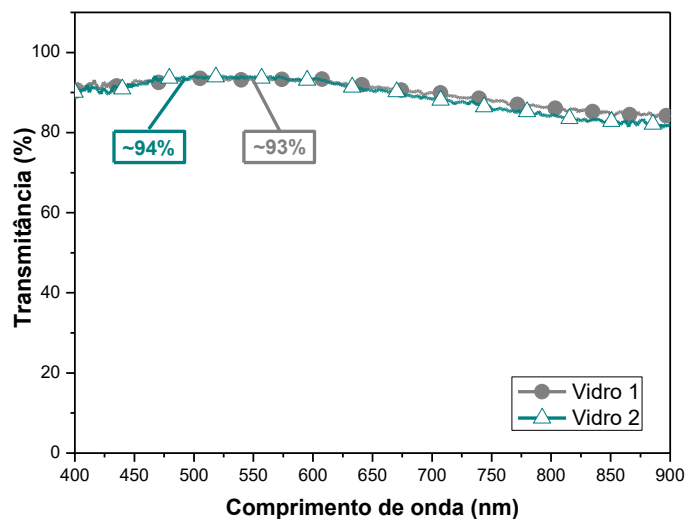
No espectro de FTIR apresentado, foram identificadas bandas características de vidros sodo-cálcicos. A banda em 470 cm^{-1} , está associada ao modo de vibração da ligação Si–O–Si [37]. Em 740 cm^{-1} , está o modo de estiramento simétrico da ligação Si–O–Si dos oxigênios pontantes entre os tetraedros de sílica [9]. A banda em 1000 cm^{-1} , corresponde ao modo vibracional da ligação Si–O–Si [9]. Em 3500 cm^{-1} , observa-se a banda associada aos grupos silanóis (SiOH), moléculas de água absorvidas e ligações ao hidrogênio [9].

Os resultados confirmam que as bandas identificadas correspondem à ligação Si-O-Si, característica dos vidros sodo-cálcicos. Além disso, não foram detectadas bandas associadas a grupos orgânicos, o que indica a eliminação dos resíduos durante a calcinação. Esses resultados demonstram que é viável produzir vidros sodo-cálcicos substituindo matérias-primas convencionais por resíduos agroindustriais.

A Fig. 3 apresenta os espectros de Transmitância no VIS das amostras vítreas produzidas. As transmitâncias máximas das amostras foram de ≈ 93 e 94% nas mesmas faixas do visível até início do infravermelho próximo. Para o vidro sodo-cálcico comercial, a transmitância máxima fica entre ≈ 92 e 95% [8]. A amostra produzida com os 3 resíduos (CCA, COG e CCC) apresentou uma alta transmitância luminosa, $\approx 94\%$, ausência de coloração, evidenciando a redução e eliminação de íons de metal de transição.

Os espectros apresentados confirmam que os vidros produzidos com resíduos beneficiados (CCA, COG e CCC) apresentam propriedades ópticas compatíveis aos vidros sodo-cálcicos comerciais.

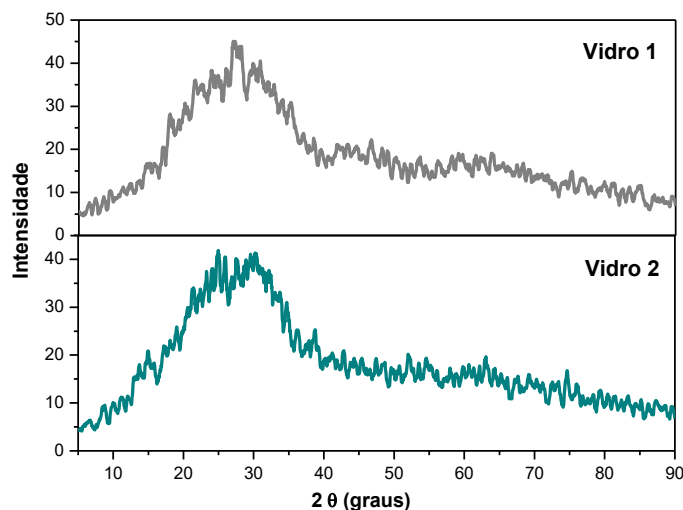
Fig. 3 - Espectros de transmitância dos vidros produzidos.



Fonte: (AUTOR, 2025).

Para análise das fases, foi realizada a difração de raio X das amostras produzidas, apresentada na Fig. 4.

Fig. 4 - Difratomogramas das amostras produzidas.



Fonte: (AUTOR, 2025).

A análise dos difratogramas comprovou o caráter amorfo de ambas as amostras, visto que elas apresentam um halo de difração localizado entre 20 e 35° (2θ), que é característico da fase amorfa [10]. Pode-se, portanto, dizer que as amostras produzidas são vítreas, e que os resíduos foram incorporados (CCA, COG e CCC) sem que ocorresse a cristalização.

4. Considerações finais

Este trabalho apresentou resultados da caracterização de vidros sodo-cálcicos produzidos a partir da incorporação de resíduos agroindustriais como a casca de arroz (CCA), casca de ovo galináceo (COG) e a casca de coco (CCC), utilizados para substituir a sílica, o calcário e o feldspato, respectivamente, como uma alternativa mais sustentável para a produção de vidros.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

As análises de FRX dos resíduos mostraram que as composições químicas da CCA, COG e CCC após calcinação são semelhantes às matérias-primas usadas na fabricação do vidro sodo-cálcico. As medidas de transmitância no VIS indicaram que a amostra com 3 resíduos (CCA, COG e CCC) apresentou uma alta transmitância luminosa, $\approx 94\%$, sem coloração, evidenciando baixas concentrações de impurezas e propriedades ópticas compatíveis aos vidros sodo-cálcicos comerciais. A análise por DRX, comprovou o caráter amorfo das amostras (halo de difração entre 20 e 35°), corroborando que as amostras são vítreas e que os resíduos foram incorporados sem que ocorresse a cristalização.

Os resultados de FTIR dos vidros confirmam que as bandas encontradas (1000 , 740 e 470 cm^{-1}) correspondem à ligação Si-O-Si presentes em vidros sodo-cálcicos. Estes resultados confirmam que é possível produzir vidros a partir da substituição de matérias-primas por resíduos agroindustriais (como a casca de arroz, a casca de ovo galináceo, e casca de coco), com propriedades compatíveis com os vidros comerciais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FATEC-SP e ao CNPq pela bolsa de IC. Ao LTMFO da Fatec-SP, ao LM²C² do PMT (Poli-USP) e CCTM do IPEN, pela disponibilização dos equipamentos.

Referências

- [1] SOUZA, T. I.; CARDOSO, A.V. **Utilização de Resíduos Sólidos da Indústria de Celulose Kraft na Fabricação de Cimento: Caracterização Físico-Química**. 18^oCBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas, PE, Brasil, 2008.
- [2] LIMA, R. M. R.; ROMEIRO FILHO, E. **A reciclagem de materiais e suas aplicações no desenvolvimento de novos produtos: um estudo de caso**. Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto, Florianópolis, 2001.
- [3] CORNEJO, I.A.; RAMALINGAM, S. et. al. Hidden treasures: Turning food waste into glass. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 93, n. 6, 2014. Disponível em: <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2014/07/Cover-Story_Aug14.pdf>.
- [4] CORNEJO, I.A.; REIMANIS, I. E. et.al. **Methods of making glass from organic waste food streams**. Patent Application Publication, Colorado School of Mines, US 2015/0065329 A1, 2015. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/a2/30/d7/a0676c459c23de/US20150065329A1.pdf>>
- [5] GONÇALVES, J. et al. Production of Transparent Soda-Lime Glass from Rice Husk Containing Iron and Manganese Impurities. **Ceramics**, v.3, 494-506p., 2020. <https://doi.org/10.3390/ceramics3040040>
- [6] VIEIRA, F. P. **Caracterização de resíduos agroindustriais para a fabricação de vidros sodo-cálcicos**. Faculdade de tecnologia de São Paulo. Monografia, São Paulo, 82p., 2019.
- [7] SEMENSIN, J. G. C. **Incorporação de Resíduos Sólidos Agroindustriais Na Fabricação de Vidros Sodo-Cálcicos**. Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Monografia, São Paulo, 96p. 2016.
- [8] AXINTE, E. "Glasses as engineering materials: A review". **Materials and Design**, v. 32, p. 1717–1732, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.057>
- [9] KHALIL E. M. A. et al. Infrared absorption spectra of transition metals-doped soda lime silica glasses. **Physica B: Condensed Matter**, v. 405, 1294 -1300p., 2010. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.11.070>
- [10] PATEL, M.; KARERA, A.; PRASANNA, P. Effect of thermal and chemical treatments on carbon and silica contents in rice husk. **J. of Materials Science**, v. 22, p. 2457-2464, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF01082130>