

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JOÃO MANOEL MARTINS MARÇAL**

**CONTRIBUIÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO:  
COMPARAÇÃO DO VIDRO DE CINZA DE CASCA COM O VIDRO COMERCIAL  
PARA APLICAÇÃO EM ABERTURAS**

**Alegrete  
2023**

**JOÃO MANOEL MARTINS MARÇAL**

**CONTRIBUIÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO:  
COMPARAÇÃO DO VIDRO DE CINZA DE CASCA COM O VIDRO COMERCIAL  
PARA APLICAÇÃO EM ABERTURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Chiara Valsecchi

**Alegrete  
2023**

**JOAO MANOEL MARTINS MARCAL**

**CONTRIBUIÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO: COMPARAÇÃO DO VIDRO DE CINZA DE CASCA COM O VIDRO COMERCIAL PARA APLICAÇÃO EM ABERTURAS"**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. CHIARA VALSECCHI - UNIPAMPA - Orientadora

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Prof. Dr. JACSON WEBER DE MENEZES - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/12/2023, às 19:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 08:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2023, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1334253** e o código CRC **1A630FC4**.

Dedico a Deus, se construí ou conquistei honra a Ele. Dedico aos que amo, em especial aos meus pais e irmãos, os alicerces da minha história.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela imensurável bondade e fidelidade com a minha vida, por ter renovado minha força, ânimo e coragem muitas vezes durante a graduação. Por ter colocado pessoas especiais que me ajudaram nessa jornada, por ter conduzido meu caminhar até aqui.

A minha mãe, Kátia Martins, e meu pai, Sérgio Marçal, pela base forte que suas vidas foram/são para eu estar construindo realizações e conquistas. Que eu possa honrar a vida de vocês, indo além do que vocês foram fazendo que tudo o que plantaram em mim gerar bons frutos. É muito amor, carinho, cuidado e exemplo que só de eu recordar para digitar esse agradecimento as lágrimas escorrem no rosto. Aos meus irmãos Nando e Zeca, que fazem parte do alicerce da minha vida, e são um comigo. Obrigado é pouco! Também aos demais familiares e padrinhos que torcem e celebram comigo.

Aos amigos, que muito me apoiaram e encorajaram até aqui, tiveram paciência e relevaram minha ausência muitas vezes ao longo desses anos de faculdade. Aos colegas de curso, principalmente pelo companheirismo e ajuda durante as dificuldades nas disciplinas.

A banca avaliadora deste trabalho, Dra. Simone Venquiaruto e Dr. Jacson Weber de Menezes, pela disponibilidade e participação desta etapa marcante da vida acadêmica, conselhos e ensinamentos. Em especial a minha orientadora, Dra. Chiara Valsecchi, pelo apoio e confiança que depositou em mim nesses anos de pesquisas, trabalhos desenvolvidos, participações em congressos e que com excelência cumpriu muito além das suas obrigações como orientadora, obrigado professora!

À Universidade Federal do Pampa, pela estrutura do *campus* Alegrete, e também aos técnicos dos laboratórios, cuja colaboração e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

O vidro é um material utilizado em larga escala mundial. Além da sua grande aplicação, extensos são os danos ao meio ambiente causados para que sua produção possa acontecer. Isso ocorre pelo fato de que a areia, principal matéria prima utilizada para a produção do mesmo, é fruto de mineração. Matérias primas sustentáveis que substituam a areia como fonte de sílica já são realidade, como por exemplo a cinza da casca do arroz. Ampliando a utilização do resíduo agroindustrial da casca do arroz, a cinza da casca do arroz é uma fonte de sílica alternativa para a areia mineral na fabricação de vidros. Essa abordagem inovadora e sustentável necessita de aprofundamento e investigação suplementares para que se torne possível descobrir se esse vidro sustentável pode ser aplicado e substituir o vidro comercial de areia mineral nas suas aplicações. Um dos maiores empregos do vidro é na construção civil, como em portas, janelas e fachadas, entre outros. Esse estudo buscou analisar propriedades relevantes às aplicações do vidro na construção civil, especialmente quando utilizado em aberturas, como resistência química e mecânica, conforme normas brasileiras existentes. Assim, foi analisado se o vidro produzido em baixas temperaturas (1200 °C) com a cinza da casca do arroz se assemelha em propriedades químicas, físicas e mecânicas ao vidro comercial com areia de minério, fabricados nas mesmas condições, e com o vidro comercial de vidraçaria. A comparação do desempenho foi verificada em relação à densidade, densidade de microbolhas, choque térmico, ataque ácido, absorção de água, dureza, Uv-Vis e transmissão de calor. Os resultados obtidos mostram que o vidro com cinza de casca de arroz produzido em baixa temperatura tem desempenho semelhante ao comercializado de areia mineral, com exceção da resistência química. Logo, ele se torna uma alternativa promissora, econômica e, principalmente, sustentável que pode ser aplicada na construção civil.

Palavras-Chave: vidro comercial; vidro sustentável; construção civil.

## **ABSTRACT**

Glass is a material used on a large scale worldwide. In addition to its widespread application, extensive environmental damage is caused for its production to take place. This is because sand, the main raw material used in its production, is a product of mining. Sustainable raw materials that replace sand as a source of silica are already a reality, such as rice husk ash, for example. Expanding the use of agro-industrial waste from rice husks, rice husk ash is an alternative source of silica for mineral sand in glass manufacturing. This innovative and sustainable approach requires further in-depth investigation to determine whether this sustainable glass can be applied and replace commercial mineral sand glass in its applications. One of the major uses of glass is in construction, such as doors, windows, and facades, among others. This study aimed to analyze properties relevant to the applications of glass in construction, especially when used in openings, such as chemical and mechanical resistance, according to existing Brazilian standards. Thus, it was analyzed whether glass produced at low temperatures (1200°C) with rice husk ash resembles in chemical, physical, and mechanical properties the commercially available glass with ore sand, manufactured under the same conditions, and the commercial glass from a glassworks. Performance comparison was verified regarding density, microbubble density, thermal shock, acid attack, water absorption, hardness, UV-Vis, and heat transmission. The results obtained show that glass with rice husk ash produced at low temperatures performs similarly to commercially available mineral sand glass, except for chemical resistance. Therefore, it becomes a promising, economical, and, above all, sustainable alternative that can be applied in construction.

**Keywords:** Commercial glass; sustainable glass; construction industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da produção de arroz no Rio Grande do Sul.....	16
Figura 2 - Amostra de vidro produzida em laboratório.....	18
Figura 3 - Estrutura molecular do vidro simplificada.....	19
Figura 4 - Materiais vítreos de vidro de borossilicato comuns de laboratório. ....	21
Figura 5 - Panorama da transmissividade do vidro .....	23
Figura 6 – Ciclo do processo de flutuação. ....	26
Figura 7 – Panorama da cadeia do vidro no processo de produção float. ....	27
Figura 8 – Ciclo do processo de têmpera térmica. ....	28
Figura 9 – Ciclo do processo térmico de têmpera. ....	28
Figura 10 – Fratura em vidro temperado. ....	29
Figura 11 – Ciclo do processo de laminação.....	30
Figura 12 - Programa experimental para as amostras de CCA-I e AM.....	32
Figura 13 - Programa experimental para as amostras de vidro comercial (VC). ....	33
Figura 14 - Amostra de vidro comercial.....	34
Figura 15 - Processo de forno do vidro. ....	36
Figura 16 – Processo de fabricação de uma amostra de vidro.....	36
Figura 17 - Procedimento de análise da resistência ao choque térmico. ....	37
Figura 18 – Aparato utilizado para a análise. ....	39
Figura 19 – Aparato utilizado para a análise. ....	39
Figura 20 - Espectrofotômetro utilizado.....	40
Figura 21 - Paquímetro universal quadrimensional.....	41
Figura 22 - Amostra após o embutimento, pronta para o ensaio de microdureza. ....	42
Figura 23 - Microdurômetro utilizado durante a leitura da dureza.....	42
Figura 24- Amostras de VC submersas durante A) ataque ácido B) absorção de água. ....	44
Figura 25 - Amostras de vidro de CCA-I após todo o processo de fabricação. ....	45
Figura 26 - Amostras de vidro a) de AM e b) de CCA-I.....	46
Figura 27 - Gráfico de transmitância por comprimento de onda.....	50
Figura 28 – Amostra de AM a) antes e b) depois do choque térmico. ....	53
Figura 29 – Amostra de CCA-I a) antes e b) depois do choque térmico.....	54
Figura 30 – Amostra de Vidro Comercial (VC) a) antes e b) depois do choque térmico. ....	54
Figura 31 – Amostra de AM a) antes e b) depois do ataque ácido.....	57

Figura 32 – Amostra de CCA-I a) antes e b) depois do ataque ácido. ....	57
Figura 33 Amostra de vidro VC a) antes e b) depois do ataque ácido. ....	57
Figura 34 - Gráfico do Vidro CCA-I ao longo do tempo. ....	60
Figura 35 - Gráfico do Vidro AM ao longo do tempo.....	61
Figura 36 - Gráfico do Vidro Comercial (VC) ao longo do tempo. ....	63
Figura 37 - Gráfico do Comportamento dos vidros juntos.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação dos materiais utilizados na produção do vidro. ....	35
Tabela 2 - Valores medidos para o vidro de AM. ....	46
Tabela 3 - Valores medidos para o vidro de CCA-I. ....	47
Tabela 4 - Valores medidos para o vidro de VC. ....	47
Tabela 5 – Valores medidas para o vidro de AM. ....	48
Tabela 6 – Valores medidas para o vidro de CCA-I. ....	48
Tabela 7 – Valores medidas para o vidro de VC. ....	49
Tabela 8 - Valores medidos para o vidro de AM. ....	52
Tabela 9 - Valores medidos para o vidro de CCA. ....	52
Tabela 10 - Valores medidos para o vidro VC. ....	52
Tabela 11 – Variação da massa e pH de cada vidro. ....	55
Tabela 12 – Variação da massa e pH de cada vidro. ....	55
Tabela 13 – Variação da massa e pH de cada vidro. ....	58
Tabela 14 - Comportamento do CCA-I ao longo do tempo. ....	59
Tabela 15 - Comportamento do AM ao longo do tempo. ....	60
Tabela 16 - Comportamento do Vidro Comercial (VC) ao longo do tempo. ....	62
Tabela 17 - Fluxo de calor ( $\phi$ ) e condutividade térmica (k) dos vidros. ....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% – Porcentagem

ABIVIDRO – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos

AM – Areia Mineral

CCA-I – Cinza da casca do arroz obtida diretamente da indústria

*et al.* – e outros

GOMNDI – Grupo de Óptica, Micro e Nano fabricação de Dispositivos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

nm – Nanômetros

ONU – Organização das Nações Unidas

pH – Potencial Hidrogeniônico

UNEP – United Nations Environment Programme

R – Perda por refletividade

UV – Região ultravioleta do espectro electromagnético

VC – Vidro comercial obtido de vidraçaria

VIS – Região Visível do espectro electromagnético

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo geral .....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Organização do Trabalho .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1	Sustentabilidade.....	15
2.2	Cinza da casca do arroz.....	16
2.3	Vidro .....	17
2.3.1	Características gerais do vidro.....	18
2.3.2	Vidros comuns .....	19
2.3.2.1	Vidro sódico-cálcicos.....	20
2.3.2.2	Vidro de Borossilicato.....	20
2.3.3	Propriedades do vidro.....	21
2.3.3.1	Propriedades Ópticas.....	22
2.3.3.2	Resistência Química.....	23
2.3.3.3	Propriedades Mecânicas e Térmicas .....	24
2.4	O Vidro na Construção Civil .....	25
2.4.1	Vidro <i>Float</i> .....	26
2.4.2	Vidro Temperado .....	27
2.4.3	Vidro Laminado .....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
3.1	Vidro comercial.....	33
3.2	Vidros produzidos.....	34
3.3	Choque térmico .....	36
3.4	Condutividade térmica .....	37
3.5	UV-VIS.....	40
3.6	Dureza .....	41

3.7	Densidade do vidro e densidade de microbolhas .....	43
3.8	Adsorção de água e ataque ácido.....	43
4	RESULTADOS .....	45
4.1	Vidros produzidos.....	45
4.2	Densidade.....	46
4.3	Densidade de microbolhas .....	48
4.4	Avaliação dos espectros Uv-Vis .....	49
4.5	Dureza .....	51
4.6	Choque térmico .....	53
4.7	Absorção de água .....	55
4.8	Ataque ácido.....	56
4.9	Condutividade térmica .....	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

# 1 INTRODUÇÃO

Na contemporaneidade, a preocupação com a sustentabilidade tornou-se uma temática central no contexto global, permeando as agendas de organizações em âmbito mundial. A crescente atenção e zelo em relação aos impactos ambientais resultantes das práticas humanas são aspectos que têm angariado a atenção de governos e empresas. Nesse contexto, a Organização das Nações Unidas (ONU) surge como um agente propulsor no fomento da sustentabilidade, buscando não apenas proteger, mas também mitigar os danos causados ao precioso ecossistema do planeta Terra. Tal comprometimento encontra-se refletido de maneira expressiva nas metas consagradas pela Agenda 2030, na qual a preservação ambiental figura como objetivo primordial (ONU, 2018).

Dentre as diversas vertentes contempladas pela Agenda 2030 e demais programas da ONU, destaca-se a discussão acerca da exploração de recursos minerais. Em 2022, a United Nations Environment Programme (UNEP) emitiu um documento exclusivo que focaliza a questão da sustentabilidade relacionada à areia, não apenas com o intuito de sensibilizar a comunidade global acerca dos impactos ambientais decorrentes de sua extração, mas também visando antecipar e alertar sobre a iminente escassez desse recurso nos próximos anos. Não é demais frisar que os recursos de areia ocupam a segunda posição no ranking mundial de exploração de minerais (UNEP, 2019)

Essencialmente, a areia é destinada a ser matéria prima para a fabricação de concreto, pilar da construção civil, e vidros. O próprio vidro também apresenta utilização crucial na construção civil, além de ser fonte para produção de outros produtos (UNEP, 2019). Dentro da construção civil, existem diversos tipos de vidros, sendo mais utilizado o sódico-cálcico. A aplicação do vidro nesse setor é especialmente em aberturas, nas fachadas, portas e janelas.

Desse modo, este estudo tem como foco avaliar se o comportamento do vidro da cinza da casca de arroz, produzido sem adição de areia mineral, possui um desempenho semelhante ao vidro comercial, para que se torne possível a ampliação da aplicação desse vidro alternativo na construção civil. Principalmente, busca-se verificar como esse vidro se comporta quando comparado ao vidro plano comercial não temperado vendido nas vidraçarias, feito com areia, quando usado especificamente em janelas ou demais aberturas. Sendo assim, com esse trabalho, além de aumentar o conhecimento sobre o assunto, buscou-se instigar ideias que possam ser aplicados na construção civil de forma mais ecológica e inovadoras.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Produzir e avaliar o vidro produzido a partir da cinza da casca do arroz e da areia mineral tradicional, comparando com os vidros comerciais, em termos de diferentes propriedades químicas, físicas, mecânicas e térmicas visando a aplicação em aberturas (esquadrias) na construção civil.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Produzir vidro a partir da cinza da casca de arroz e de areia de minério em laboratório, em baixas temperaturas;
- Realizar avaliação da resistência térmica dos vidros de cinza da casca do arroz obtida diretamente da indústria (CCA-I) e da areia mineral (AM), produzidos a baixa temperatura e também do vidro comercial obtido direto da vidraçaria (VC);
- Avaliar a resistência química dos vidros de CCA-I e AM, produzidos a baixa temperatura, e do vidro comercial (VC);
- Mensurar a dureza dos vidros de CCA-I e AM, produzidos a baixa temperatura, e do vidro comercial (VC);
- Avaliar a resistência ao choque térmico dos vidros de CCA-I e AM, produzidos a baixa temperatura, e do vidro comercial (VC);
- Avaliar a propriedades físicas (densidade, microbolhas) dos vidros de CCA-I e AM, produzidos a baixa temperatura, e do vidro comercial;
- Comparar o desempenho dos vidros de CCA-I e AM, produzidos a baixa temperatura, em relação ao vidro comercial em termos de transmissão de calor.

## **1.2 Justificativa**

Nos últimos anos, o grupo de pesquisa da Unipampa *campus* Alegrete GOMNDI (Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos) vem produzindo vidro em baixa temperatura, 1200 °C, com a cinza da casca do arroz. Isso se deve pelo alto teor de sílica na casca de arroz carbonizada, podendo ser utilizada no lugar da areia mineral como a principal

matéria prima na produção de vidros. Desse modo, o vidro da cinza da casca do arroz já é uma realidade, porém é necessário ampliar o estudo das propriedades desse vidro alternativo para verificar em quais setores ele pode ser aplicado conforme seu comportamento. Por sua vez, este trabalho visa avaliar se o vidro produzido com a cinza do arroz, em baixa temperatura, pode ser aplicado na construção civil, especificamente em aberturas. Assim, foi analisado se o vidro produzido em baixas temperaturas com a cinza da casca do arroz se assemelha em propriedades químicas, físicas e mecânicas ao vidro comercial com areia de minério, fabricados nas mesmas condições, e com o vidro comercial de vidraçaria.

### 1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

- 1. Introdução:** neste capítulo, são expostas informações detalhadas sobre o tema a ser abordado no trabalho, incluindo uma análise do assunto estudado, seus propósitos e a razão pela qual a pesquisa é relevante.
- 2. Revisão bibliográfica:** neste capítulo, realiza-se uma análise da literatura disponível, explorando os conceitos relevantes relacionados ao tema abordado no presente trabalho, explorando desde sustentabilidade até a história, composição, métodos de produção e aplicações do vidro.
- 3. Materiais e métodos:** neste capítulo estão os métodos, técnicas, materiais e instrumentos empregados na implementação da proposta deste estudo, detalhando as etapas dos experimentos realizados para a fabricação e análise das amostras de vidro.
- 4. Resultados:** neste capítulo estão os resultados obtidos nas análises descritas previamente.
- 5. Considerações finais:** por fim, neste capítulo está a análise e consignaões finais do estudo a partir dos resultados obtidos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Sustentabilidade

De acordo com Boff (2017) a sustentabilidade pode ser definida como ações que visam assegurar a integridade da Mãe Terra, significado sucinto para algo que carrega uma relevância gigantesca. Boff (2017) afirma que nas últimas décadas a preocupação e procura por sustentabilidade tem se destacado ao redor do mundo. Destaca-se ainda, que a ênfase por sustentabilidade alcança grande parte das vidas de todo o planeta, pois o empenho de governos, empresas e meios de comunicações pela causa influenciam diretamente nas práticas na sociedade.

Pela relevância desta causa, a Organização das Nações Unidas (ONU) (2018) está fortemente empenhada em apoiar o desenvolvimento sustentável. Em 2015, a Organização das Nações Unidas formulou a Agenda 2030, que contém 17 metas a serem alcançadas até o ano de 2030, visando a proteção do meio ambiente e a garantia do desenvolvimento sustentável.

A UNEP tem abordado nos últimos anos a sustentabilidade, especialmente relacionada à areia mineral, pois a areia é utilizada na maioria dos setores, principalmente na construção civil, mas também como matéria prima para fabricação de produtos eletrônicos, recipientes de vidros, entre outros. Isso faz com que ela seja utilizada em grande escala (material mais extraído no mundo todo), sendo também o material mais consumido em volume, perdendo apenas para a água. Ainda, segundo dados da UNEP, em 2019, o consumo de areia anual médio está beirando as 50 bilhões de toneladas. Este valor expressivo da demanda do material, fez com que atualmente os recursos de areia às ordens se esgotem com maior velocidade em relação à formação de novas fontes do mesmo. Principalmente, um próprio relatório da ONU está já prevendo uma escassez em curto prazo de areia de minério específica, matéria prima essencial na construção civil e para fabricação de materiais vítreos e cerâmicos (UNEP, 2019 e 2022). Além da questão da disponibilidade do recurso frente a grande utilização, Peduzzi, 2014, expõem os impactos negativos causados ao meio ambiente e a economia pela mineração da areia. Peduzzi lista os impactos provocados por esta atividade, que gera efeitos nocivos na biodiversidade marinha e nos rios, erosão costeira em praias, no clima e turismo, entre outros, além de não possuir regulamentação no processo mineratório em vários países.

Com a finalidade de aliviar este transtorno mundial é apresentado como proposta pela UNEP (UNEP, 2022, p.46) “Reciclar e substituir areia e cascalho naturais será essencial para

resolver muitos dos desafios na gestão de resíduos de produtos derivados de areia e para fechar o ciclo de materiais.” Alinhado a isto, entre as metas na agenda da ONU 2030, está a meta 12, que inclui: " Consumo e produção responsáveis". Em particular, há uma meta específica no tópico 12.5 que menciona "até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso".

## 2.2 Cinza da casca do arroz

De acordo com o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2022, a produção anual de arroz no Brasil é de 11.620.292 toneladas. Deste valor, a maioria está concentrada na região sul do país. Aproximadamente, 8.295.840 toneladas do grão são geradas somente no estado do Rio Grande do Sul, representando 71,39% do rendimento da produção do arroz por ano (Figura 1).

Figura 1 - Mapa da produção de arroz no Rio Grande do Sul.



Fonte: Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA).

A produção do arroz é de extrema importância para a vida humana pois o arroz possui nutrientes valiosos além de ser de fácil acesso à todas as classes, logo está presente nas refeições do cotidiano da maioria dos cidadãos de todas as regiões do mundo. Porém, a indústria do arroz apresenta alguns problemas, o principal deles é que ela cria em grande quantidade um resíduo

agroindustrial, que é a casca do arroz. Com o passar dos anos, desenvolveu-se uma utilização primária para a casca do arroz, que consiste na sua queima para geração de energia: ainda assim, apresenta-se como subproduto a cinza da casca do arroz (HOSSAIN, 2018).

Mesmo que exista destino para uma parcela da casca do arroz (queima e cama de animais), ainda assim, existe uma fração que permanece sem aplicação no mercado, sem aproveitamento. Somado a isso, está a questão da cinza da casca do arroz, que precisa ampliar seus horizontes de aplicações com a finalidade de agregar valor a este resíduo, já que apresenta alto teor de sílica, cerca de 92% da sua composição, e representa aproximadamente 18% do peso da casca. A grande maioria da cinza é descartada no meio ambiente de forma incontrolada, gerando problemas ecológicos. Com a utilização da cinza será fechado com êxito econômico e sustentável da produção de arroz, respeitando o conceito de economia circular (FOLETTO *et al.*, 2005).

Em seus estudos, Foletto *et al.* (2005), Ganesan, Rajagopal, Thangavel (2008) e Pode (2016), abordam aplicações comerciais da cinza da casca do arroz. Algumas das possibilidades são como suporte de catalisadores metálicos, ingrediente para baterias de íons de lítio, componente para produção de cimento, uso em concreto, como adsorventes, entre outras. Assim como demonstrado por Gonçalves *et al.* (2020) que entre outros materiais pode-se produzir vidro com a cinza da casca do arroz. Bem como Hossain *et al.* (2018) listam que refratários, vidros, louças brancas, entre outros materiais cerâmicos podem ser fabricados com cinza de casca de arroz como fonte de sílica.

### **2.3 Vidro**

O vidro é um material amplamente utilizado na engenharia civil devido às suas propriedades estéticas, transparência e durabilidade (SAINTIVE; BRUNI, 1994). Sua composição é baseada em sílica, soda e cal, resultando em uma estrutura molecular amorfa (VAN VLACK, 2000). Essa estrutura amorfa permite a transmissão eficiente de luz, conferindo ao vidro sua característica distintiva (VARSHNEYA, 1994). O vidro mais utilizado comercialmente é identificado como sódico-cálcico, onde cerca de 65%-70% do seu conteúdo em massa é constituído por sílica (quartzo), oriunda de areia de minério (VAN VLACK, 2000). Devido ao seu alto consumo e à necessidade de matérias primas minerais, a produção convencional de vidro enfrenta desafios em termos de sustentabilidade, principalmente no sentido de gasto energético e utilização de matérias primas de minério que causa impacto

ambiental, pois a mineração de areia afeta negativamente o meio ambiente, sua extração devasta matas, provoca erosões e assoreamento de rios (APARECIDA, M. et al, 2021). Sendo assim, necessita-se de alternativas sustentáveis como por exemplo matérias primas para o vidro com menos impacto ambiental. Buscando alternativas mais sustentáveis, estudos têm explorado o uso da cinza da casca do arroz como fonte de sílica na fabricação de vidro, como apresentado em Figura 2 (GONÇALVES, 2020). Essa abordagem visa reduzir o uso de matérias-primas não renováveis, como a areia de minério, contribuindo para soluções mais conscientes que podem ser aplicadas em vários setores do mercado, incluindo a engenharia civil.

Figura 2 - Amostra de vidro produzida em laboratório.

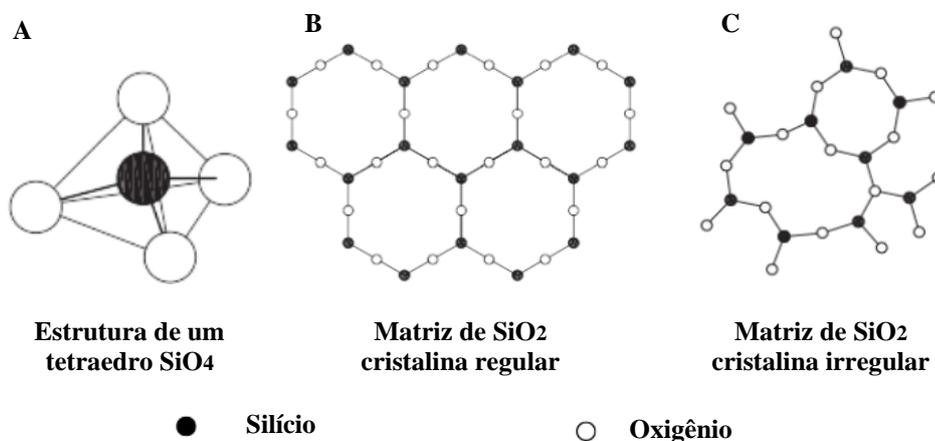


Fonte: Grupo de pesquisa do autor.

### 2.3.1 Características gerais do vidro

Conforme Fokin *et al.* (2006, p. 2681) “Vidros podem ser definidos como sólidos não cristalinos que sofrem uma transição vítrea no decorrer de sua preparação”. Pelo fato dele não apresentar uma estrutura cristalina, suas propriedades estão mais próximas das dos líquidos em relação aos sólidos. Popularmente, o vidro é referenciado como um líquido super resfriado. Logo, sendo semelhante a um líquido, ele é de natureza amorfa e não possui simetria de grande extensão (ARAUJO, 1997).

Figura 3 - Estrutura molecular do vidro simplificada.



Fonte: Adaptado de (WURM, 2007).

ALVES, GIMENEZ, MAZALI (2001) explicam que os materiais que formam o vidro desempenham algumas funções, a principal delas é ser um formador de vidro. O material que é encarregado disso na maioria dos vidros comerciais é a sílica (SiO<sub>2</sub>). Nos seus estudos, os autores afirmam que apenas com sílica é possível produzir vidro, porém isso torna-se caro tendo em vista que a temperatura de fusão ultrapassa os 2000°C. Ainda, eles contextualizam que materiais com finalidades diferentes, são acrescentados à mistura, para deixar o processo mais econômico, mais eficiente, e para trabalhar as propriedades do vidro conforme os fins desejados (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001). Dentro deles, existem reagentes que atuam como transformadores de redes: óxido de boro, alumínio e potássio; os afinantes são aqueles materiais que deixam a matriz vítrea mais fluida, podendo favorecer a eliminação de bolhas: os mais usados são o sulfato de sódio e óxido de boro. Por fim, existem os aditivos, como os corantes: muitas vezes são usados por fins estéticos, mas também possuem finalidade de proteção à radiação UV, como a cor âmbar de frascos (SICHERI; CARAM; DOS SANTOS, 2007; AKERMAN, 2000 e SANTOS, 2009).

São inúmeras as combinações de matrizes vítreas a base de sílica: sílicas vítreas, silicatos alcalinos, sodo-cálcicos, vidros ao chumbo, vidros borossilicatos, e vidros alumino-borossilicatos. O vidro sodo-cálcico, é o tipo de vidro mais utilizado comercialmente no mundo é composto, basicamente, de sílica, óxido de sódio e de cálcio (AKERMAN, 2000).

### 2.3.2 Vidros comuns

Os vidros mais comuns utilizados comercialmente, nos mais diferentes setores de mercado, são os vidros sódico-cálcico e borossilicatos. Este último surgiu depois, e ganhou espaço por ser mais resistente, principalmente quando usado associado ao processo de têmpera, principalmente usado na construção civil, normalizado pela ABNT NBR 7199 identificada como Vidros na construção civil - Projeto, execução e aplicações (ABNT, 2016).

### **2.3.2.1 Vidro sódico-cálcicos**

Os vidros sódico-cálcico são os mais utilizados em aplicações cotidianas como recipientes e garrafas de alimentos, lâmpadas e alguns tipos de janelas, além de outras áreas. Esses vidros apresentam a composição do vidro soda-cal-sílica, com cerca de 70% de ( $\text{SiO}_2$ ), 15% de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$  - soda), 10% de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$  - calcário), podendo conter até 5% de outros óxidos, como os corantes. Os vidros sódico-cálcico são os primórdios desse material, e como Kurkjian e Prindle (1988. p.797) alegam, “os primeiros vidros no mundo ocidental eram quase todos compostos de soda-cal-sílica que variam dependendo da disponibilidade de matérias-primas, mas geralmente diferem pouco dos vidros comerciais atuais.” Saintive e Bruni (1994) seguem afirmando que desde que o vidro surgiu sua composição química passou por leves alterações desde a antiguidade, se tornando assim um método de fabricação robusto e reprodutível.

Varshneya (1994) expõem que o vidro sódico cálcico é o mais utilizado comercialmente devido a seu ótimo custo benefício, pois apresenta custo baixo quando comparado a outros tipos de vidros e também bom desempenho em várias propriedades, exceto quanto ao choque térmico.

### **2.3.2.2 Vidro de Borossilicato**

Além do clássico vidro de soda-cal-sílica, outro tipo de vidro moderno utilizado em grande escala foi desenvolvido na década de 1880 por Ernst Abbe, professor na universidade de física de Jena, junto com Otto Schott, químico alemão. Eles realizaram pesquisas com a finalidade de aprimorar a composição e expandir a aplicação do vidro, até que desenvolveram o vidro de borossilicato, que adicionava óxido bórico na composição do vidro. Esta nova receita, estabelecia melhora em propriedades do vidro, como por exemplo na resistência ao choque térmico (KURKJIAN; PRINDLE, 1998).

Varshneya (1994) nomeia as principais utilizações do vidro de borossilicato em materiais vítreos que necessitam não se expandir termicamente e uma boa resistência a ataque químico, sendo indicado para vidros aplicados em matérias de cozinhas, materiais laboratoriais e faróis automotivos, por exemplo. Como exemplo de materiais desse tipo de vidro tem-se a Figura 4.

Figura 4 - Materiais vítreos de vidro de borossilicato comuns de laboratório.



Fonte: Elaboração própria.

### 2.3.3 Propriedades do vidro

As propriedades dos vidros dependem de duas variáveis principais: primeiramente a composição química e a segunda é relacionada às condições de velocidade em que o vidro é resfriado (Akerman, 2000). Trabalhando com essas variáveis, torna-se possível gerar propriedades que fazem com que ele apresente suas características de estéticas, de transparência e brilho, de resistência, segurança, conforto térmico e acústico, eficiência energética, entre outras (WESTPHAL, 2016).

Em sua abordagem sobre os principais materiais de engenharia, Mano (1991. p. 7) mostra que “o desempenho dos materiais se relaciona com uma série de características

significativas, que podem ser distribuídas em 3 grandes grupos: propriedades físicas, as propriedades químicas e as propriedades físico-químicas”.

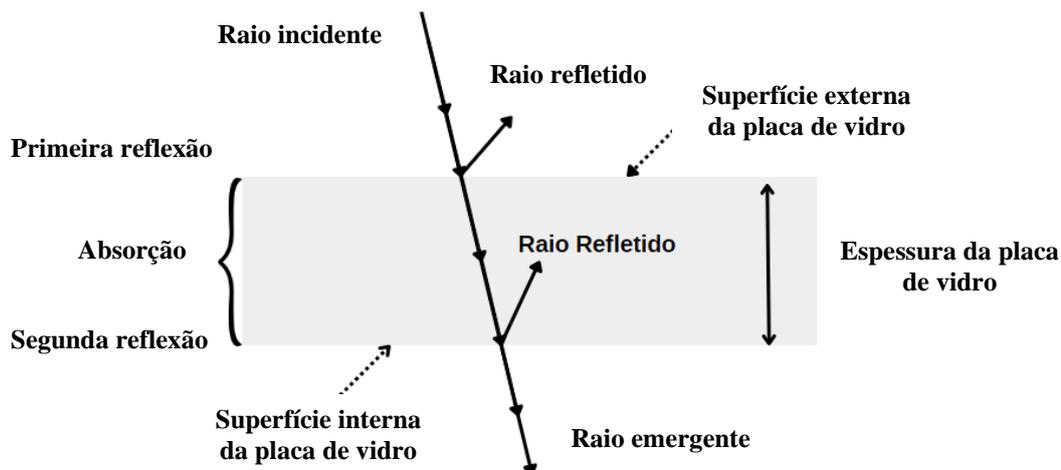
De maior interesse para seus diferentes fins comerciais, as propriedades do vidro mais importantes são: as propriedades óticas (cor, transparência, transmissão de luz), a resistência química e as resistências mecânica e térmica.

### **2.3.3.1 Propriedades Óticas**

Como parte das propriedades físicas, as propriedades óticas dos materiais são muito importantes como forma de caracterizar o material (VAN VLACK, 2000). Em se tratando de vidros, tais propriedades determinam a cor por exemplo, sendo está uma das características mais marcantes deste material.

Um parâmetro muito importante para a caracterização dos materiais, principalmente vidros, é a transmitância. Esta é definida como a razão entre a intensidade de luz que passa pela amostra a ser caracterizada e a intensidade de luz que passa pela referência. Para avaliação das cores dos vidros, a transmitância é um dos parâmetros mais importantes e tal medida é feita com um equipamento chamado espectrofotômetro, o qual mede a transmitância em função do comprimento de onda. Na Figura 5 é mostrado os fenômenos que ocorrem quando a luz incide em uma superfície como um vidro por exemplo. Basicamente, três fenômenos acontecem nesta interação. Primeiramente, uma parcela da luz é refletida (tanto na primeira superfície de contato do material, quanto na segunda), outra é absorvida no seu interior e a outra, restante, é transmitida através do material vítreo. A absorção da luz é uma função das características do material e da espessura (CASTRO, 2006; CALLISTER, JR; RETHWISCH, 2018 e SICHIERI; CARAM; DOS SANTOS, 2007).

Figura 5 - Panorama da transmissividade do vidro



Fonte: Adaptado de (SICHIERI; CARAM; DOS SANTOS, 2007).

A capacidade de transmissão de calor dos materiais está associada à condutividade térmica ( $k$ ) do material. A quantidade de calor chega por meio de uma fonte de calor, a qual é irradiada através do material. No vidro esse processo ocorre da seguinte maneira: a radiação chega na superfície externa do material, de modo direto ou difuso; parte é refletida no primeiro contato com a superfície; parte é absorvida ao percorrer ao longo da espessura do material e parte é irradiada. Quanto maior for a quantidade de calor irradiada, maior será a condutividade térmica do material. (POTTER; SCOTT, 2007 e SICHIERI; CARAM; DOS SANTOS, 2007).

### 2.3.3.2 Resistência Química

O vidro é composto, em sua essência, por elementos químicos que desempenham as seguintes funções na sua composição: função vitrificante, fundente e estabilizante. Ainda assim, outras substâncias podem ser acrescentadas à composição para aprimorar determinadas propriedades. A composição do material é de extrema importância pois dita o processo de fabricação do mesmo, como por exemplo a temperatura de forno necessária (PINTO; MARTINS, 2004). Diferente da madeira, o vidro é um material isotrópico e suas propriedades dependem somente do processo de resfriamento e da sua composição química (WURM, 2007).

Os vidros mais comuns, como vidro de recipientes e de janelas, precisam apresentar duas qualidades químicas essenciais: resistência à absorção da água e resistência ao ataque ácido. Isso se deve ao fato de que nos vidros sódico-cálcico existe o elemento sódio, o qual

pode ser lixiviado da superfície, enfraquecendo o material, se exposto por longos períodos à soluções aquosas, principalmente ácidas (Jang, 2000). Esse ataque químico ocorre no vidro aplicado em aberturas, na construção civil, que conectam ao ambiente externo, ficando expostas as adversidades climáticas em regiões industriais, onde pode ocorrer o fenômeno de chuva ácida. De fato, de acordo com Fornaro (1991) em regiões industriais a acidez da chuva chega perto de ter o pH na casa de 4,5. Conforme relatado também por Miller (1990), um dos efeitos da chuva ácida nas cerâmicas e vidros é a erosão na sua superfície.

É de conhecimento comum que vidro sódico-cálcico ou borossilicatos possuem a resistência química necessária e não existe uma norma específica para testar as propriedades químicas em vidros de aberturas. Contudo, a norma ABNT NBR 16184, nomeada de Sinalização horizontal viária - Esferas e microesferas de vidro - Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2021) apresenta os testes de verificação quanto a absorção de água e resistência ao ataque de ácido clorídrico em vidros, podendo assim caracterizar estas propriedades químicas do vidro, principalmente em casos de produtos novos.

### **2.3.3.3 Propriedades Mecânicas e Térmicas**

Dentro das propriedades mecânicas do material, destacam-se para o material vidro as propriedades de dureza, resistência ao choque térmico e transmissão de calor.

Como propriedade mecânica do material, a dureza é a caracterização da capacidade de resistência do material ao ser riscado ou indentado. Conforme a NBR 7199: 2016 identificada como Vidros na construção civil - Projeto, execução e aplicações, a dureza do vidro é de 6,0 unidades na escala de Mohs. A variação dessa grandeza é de 1 até 10 Mohs e quanto maior mais duro e resistente a riscos é o material (CALLISTER, JR; RETHWISCH, 2018 e MARTINS; PINTO, 2004).

O fenômeno de choque térmico faz parte das propriedades térmicas do vidro, ele é descrito por tensões térmicas que são geradas após variações repentinas de temperaturas. Essas tensões fazem com que o material frature superficialmente, trinque ou até rompa em casos críticos. Os materiais frágeis estão mais suscetíveis a sofrerem a atuação das tensões térmicas. O vidro é classificado como um material frágil, devido a seu comportamento que apresenta pouca deformação plástica. Então, a resistência ao choque térmico diz respeito ao máximo acréscimo de tensões térmicas por meio de mudança brusca de temperatura que o material pode ser exposto sem sofrer danos. Ela pode ser medida através de ensaios colocando o material na

situação de variação de temperatura analisando o comportamento do mesmo (CALLISTER, JR; RETHWISCH, 2018; PADILHA, 2000 e ASHBY; JONES 2007).

## 2.4 O Vidro na Construção Civil

O vidro está presente na humanidade há milhares de anos. Afirma-se que há cerca de 3000 anos a.C o vidro já apresentava funcionalidade para os egípcios, com papel decorativo e como material para confecção de peças de joalheria. Desde então, o vidro começou a desempenhar um encargo importante na sociedade. Conforme o desenvolvimento de novas descobertas científicas e tecnológicas, aprimorou-se sua composição e fabricação. Então, o vidro expandiu sua utilidade ao longo dos anos. Esse processo fez com que ele chegasse a ser aplicado na construção civil, especialmente nas fachadas e aberturas de edificações, em janelas e portas (CARTER; NORTON, 2007).

No século XX, na França, ocorreu um exponencial aumento na utilização de vidro na construção civil. Na época, a principal motivação deste acontecimento foi o custo, pois com a aplicação de vidro nas fachadas e aberturas das edificações o valor do metro quadrado diminuía consideravelmente (SAINTIVE; BRUNI, 1994). Desde então, a utilização do vidro na construção civil tornou-se tão grande que nos últimos anos é responsável por cerca de 70% do consumo mundial de vidro plano em média ao ano (ROSA; COSENZA; BARROSO. 2007). Schittich *et al.* (2007) desmistificam ainda mais a ampla utilização do vidro no setor da construção civil, listando que o vidro proporciona uma interação necessária entre o interior e o exterior das edificações, possibilitando mais troca de luz solar, ventilação e visão. Sendo assim, Westphal (2016), aponta que no Brasil 70% da produção total de vidro é utilizada neste setor.

A construção civil é um dos campos que mais consome o vidro no formato plano (MONTANO; BASTOS, 2013). A Norma Brasileira (NBR) e Norma do Mercosul (NM) 293 da ABNT designada por “Terminologia de vidros planos e dos componentes acessórios a sua aplicação”, (2004, p.12) identifica como definição de vidro plano o clássico sódico cálcico que é “obtido pelo processo de fabricação *float* ou estirado podendo ser beneficiado e transformado em produtos tais como vidro curvo, temperado, laminado, espelho, metalizado, entre outros.”

Além disso, a NBR 7199 (2016) também dá as diretrizes para o setor estabelecendo e regulando requisitos a serem cumpridos para enfim a aplicação de vidros na construção civil. Nesta norma são delimitadas as instruções a serem seguidas no momento de especificação, propriedades, aplicações e classificação do vidro, como por exemplo conforme o tipo,

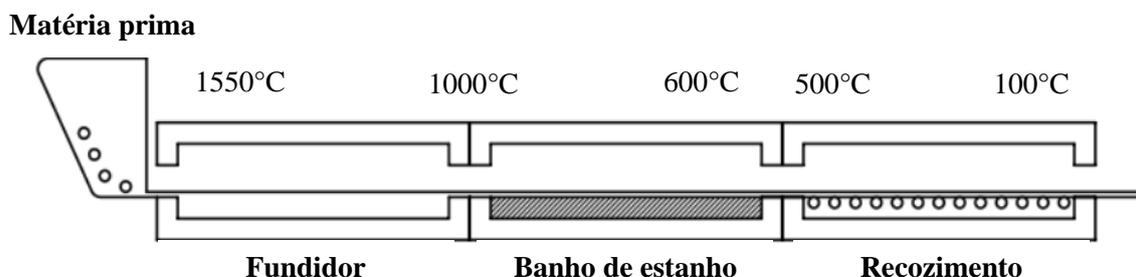
transparência, planicidade, colocação, desempenho térmico e acústico, entre outros (ABNT, 2016).

### 2.4.1 Vidro *Float*

Os processos de fabricação do vidro foram evoluindo, devido à necessidade de sanar vários problemas de produção ao decorrer dos anos. Entre eles, a intenção de uma produção mais barata, que pudesse ser executada com mais agilidade, que diminuísse os desperdícios de vidro ao longo do processo, além da busca por um vidro plano em ambas as faces. A partir disso, na década de 1960 surgiu o vidro *float*, flutuante em inglês, por via do seu método de fabricação. No processo, a mistura fundida sai do forno e flutua ao longo de uma superfície plana de estanho fundido, já que os dois materiais não se misturam; à medida que a flutuação acontece, a temperatura do vidro é estabilizada até que ele possa ser retirado do banho (PILKINGTON, 1969).

Do mesmo modo, a NBR NM 294:2004 intitulada de “Vidro *float*” da ABNT (2004) dita as conformidades e também conceitua as características de um vidro *float*, o qual é normalmente produzido conforme o processo esquematizado na Figura 6.

Figura 6 – Ciclo do processo de flutuação.

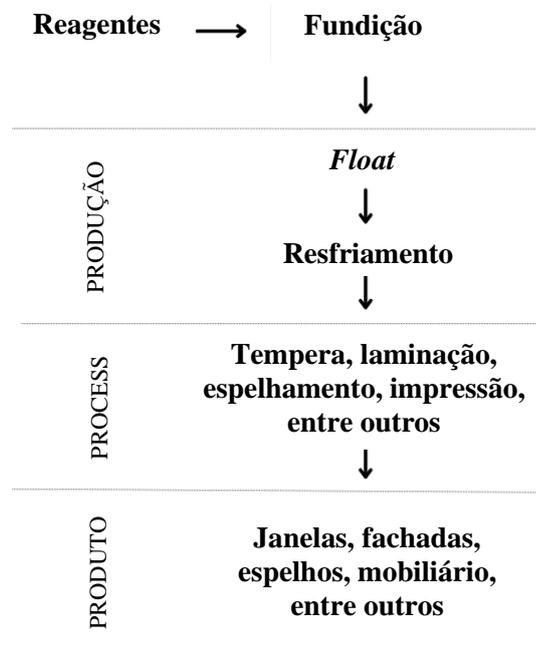


Fonte: Adaptado de (HALDIMANN *et al.*, 2007).

Além disso, a metodologia de fabricação de vidro *float* é a mais utilizada mundialmente, incorporando 90% de toda a produção no mundo (HALDIMANN *et al.*, 2007). Vidros *floats* são ótimas alternativas para revestimento de edifícios, construção de janelas e para-brisas de carros. Para mais, eles ainda podem passar por uma porção de processamentos, entre eles o desenvolvimento de têmpera ou de laminação com a finalidade de aprimorar essências adequando-os para determinados fins de utilização do produto final (MONTANO; BASTOS,

2013). Na Figura 7, é possível perceber o panorama geral da cadeia de produção de vidro *float*, desde a própria fabricação do vidro, processamento até o produto final.

Figura 7 – Panorama da cadeia do vidro no processo de produção float.



Fonte: Adaptado de (HALDIMANN *et al.*, 2007).

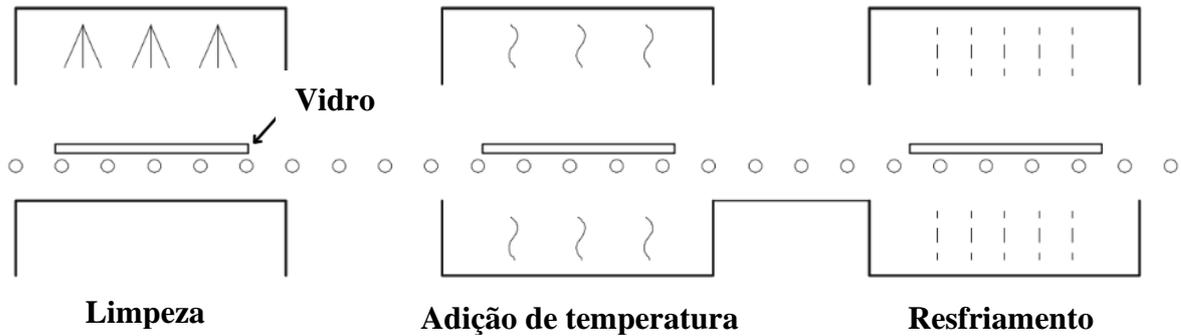
Na construção civil, a NBR 7199 (2016) estabelece que o vidro *float* sem receber nenhum tratamento (por exemplo, têmpera) pode ser utilizado e aplicado como vidro vertical nos casos em que é instalado acima da cota de 1,10 em relação ao piso, por exemplo, ou também como envidraçamentos projetantes móveis nos casos de projetante, basculante, projetante-deslizante, entre outros que a norma estabelece (ABNT, 2016).

#### 2.4.2 Vidro Temperado

O vidro temperado é aquele vidro comum, como por exemplo o vidro *float* sódico cálcico, que passa por um processo térmico, a tempera. Além deste método, existe o tratamento à têmpera química, que é pouco utilizada na construção civil pois não é adequada para vidros soda-cal, sendo que esse tipo de vidro é o mais utilizado no setor. O processo de têmpera térmica envolve levar o material a uma alta temperatura, próxima do seu ponto de amolecimento, seguido de resfriamento imediato por meio de jatos de ar, assim como ilustrado na Figura 8. Com isso, a superfície externa do vidro é resfriada no primeiro momento, uma vez que o interior

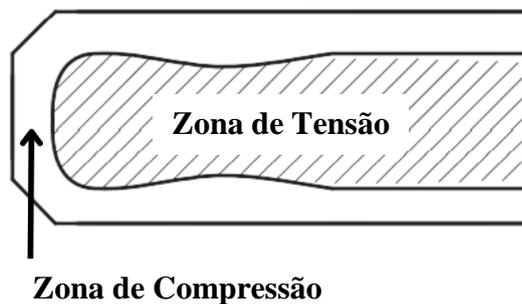
começa a esfriar, ele tende a encolher o exterior, que já está rígido, resistindo ao movimento da contração e, finalmente, criando tensão compressiva na superfície do vidro e tracionada na interna da peça, tal qual ilustrado na Figura 9(SAINTIVE; BRUNI, 1994).

Figura 8 – Ciclo do processo de têmpera térmica.



Fonte: Adaptado de (WURM, 2007).

Figura 9 – Ciclo do processo térmico de têmpera.

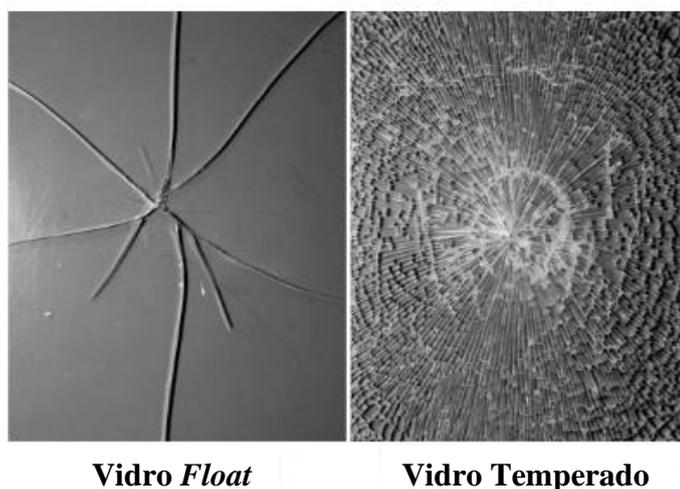


Fonte: Adaptado de (WURM, 2007).

O vidro que passa por têmpera tem resistência aumentada em até cinco vezes a de sua forma original. Como o vidro temperado não pode mais ser processado, perfurado ou cortado, qualquer alteração deve ser feita antes da têmpera. Mesmo assim, ele possui várias características positivas que fazem com que o vidro temperado seja validado e muito utilizado, que são a resistência ao choque térmico, flexão, flambagem, torção e peso. Além disso, outro ponto em destaque que este tipo de vidro possui é a fragmentação total imediata, quando quebrado, quebra em pequenos pedaços que reduzem o risco de acidentes com cortes, como exposto na Figura 10 (MONTANO; BASTOS, 2013). Por isso, ele acaba sendo classificado como vidro de segurança, devido às propriedades aprimoradas que ele contém (WESTPHAL, 2016). Sendo ele um vidro de segurança, a NBR 7199 especifica que ele é conceituado como

“Vidros cujo processamento de fabricação reduz o risco de ferimentos em caso de quebra” (ABNT, 2016, p.2).

Figura 10 – Fratura em vidro temperado.



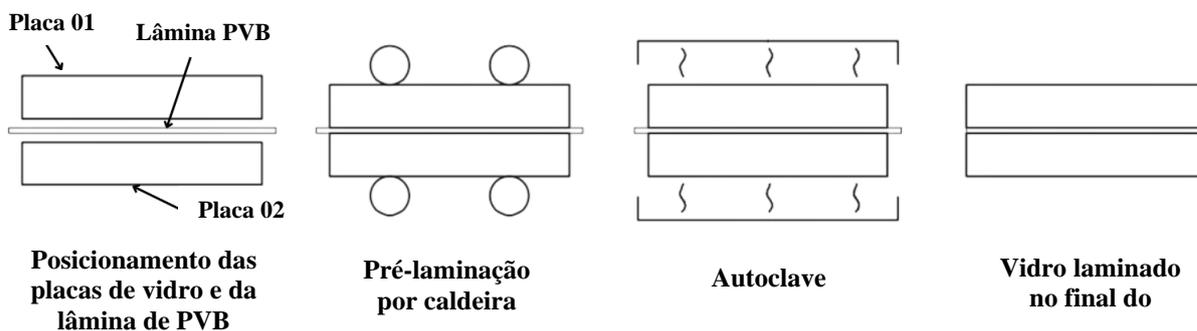
Fonte: Adaptado de (HALDIMANN *et al.*, 2007).

O vidro temperado deve estar em ordem da ABNT NBR 14698:2001 nomeada de “Vidro temperado”. Então, quanto a utilização na construção civil, se ele seguir os conformes da NBR 14698 (2001) pode ser aplicado de acordo com a NBR 7199 (2016), nas seguintes ocasiões: vidros verticais suscetíveis ao impacto humano, vidros verticais (na circunstância em que é instalados acima da cota de 1,10 m em relação ao piso) e envidraçamentos projetantes móveis (ABNT, 2016).

### 2.4.3 Vidro Laminado

O vidro laminado é constituído por duas ou mais chapas de vidro que devem ser ligadas entre si por meio de uma película de um material que apresenta grande resistência e adesão. O material mais utilizado para esse fim é polimérico polivinil butiral (PVB). Para a ligação ocorrer ao longo do processo de laminação são adicionadas temperatura e pressão entre as chapas, do modo apresentado na Figura 11. O resultado disso é um vidro com propriedades aprimoradas (COSTA *et al.*, 2005).

Figura 11 – Ciclo do processo de laminação.



Fonte: Adaptado de (WURM, 2007).

No que diz respeito a este tipo de vidro, as normas a ser empregada é a ABNT NBR 14697, chamada de “Vidro laminado”. Seguindo os procedimentos de ensaio da norma descrita acima, o vidro laminado pode ser considerado de segurança. Mas além do aspecto de segurança, existe uma propriedade que o destaca entre os demais tipos, que é ser ótimos filtros (mais do que 99,6%) contra a radiação ultravioleta, nociva para nossa pele (SAINTIVE; BRUNI, 1994).

O vidro laminado ainda pode ser subdividido em duas categorias, os laminados simples, constituída por duas lâminas de vidro e uma película PVB, e os laminados múltiplos que são formados por três ou mais lâminas de vidro e duas ou mais películas de PVB. As propriedades que se destacam num geral nos vidros laminados são ópticas, acústicas, de resistência e segurança, porém a escolha da aplicação entre os dois modelos de laminados varia de acordo com as necessidades a serem atendidas. Os simples são indicados para automóveis, fachadas, paredes de divisórias, portas, parapeitos, vitrines, entre outros. Já os múltiplos, aplicados nos casos em que se deseja isolamento acústico ou segurança elevados, janelas de carros blindados, visores para navios, joalherias, entre outros. (SAINTIVE; BRUNI, 1994 e FELDMANN *et al*, 2014 e WURM, 2007).

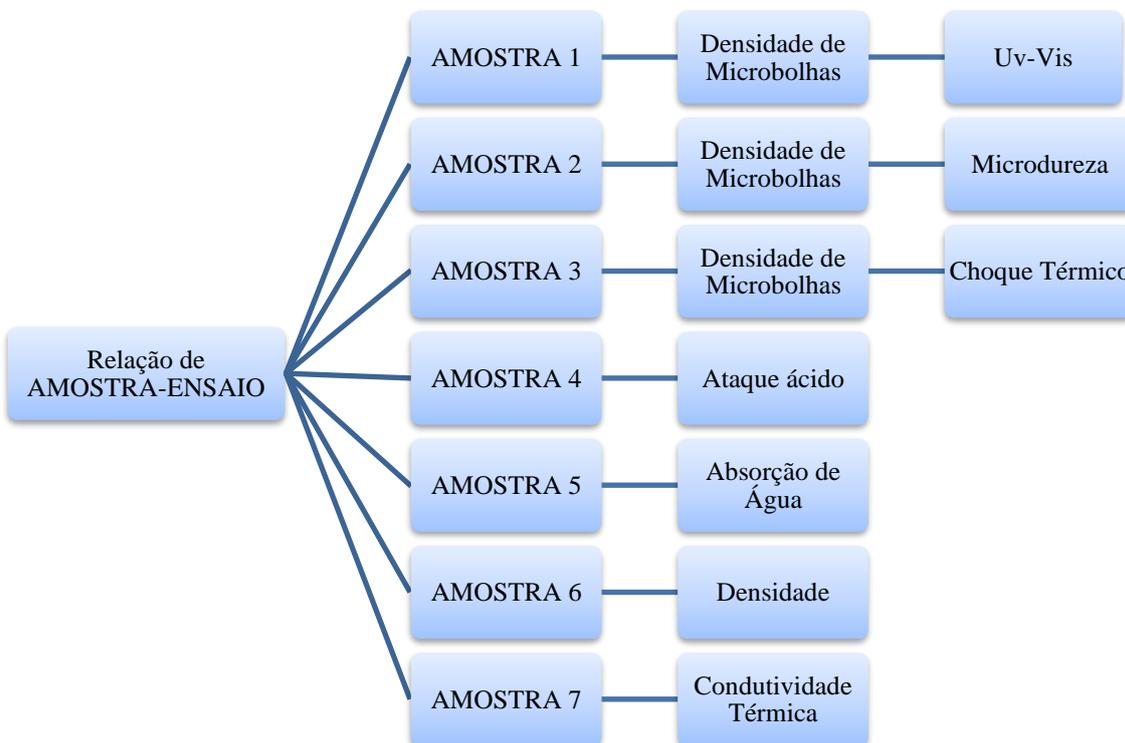
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo desenvolveu-se a partir da produção de amostras de vidro utilizando a Cinza da Casca do Arroz da Indústria (CCA-I) e a Areia Mineral (AM), além da realização de análises comparativas do vidro da cinza com vidro comercial, por meio de ensaios normativos. Analisou-se o vidro da cinza da casca do arroz produzido em baixa temperatura em relação com vidro de areia mineral (AM), também produzido em baixa temperatura (1200 °C), para ter um parâmetro mais fiel do comportamento do vidro de CCA-I quanto a de areia mineral, ambos sendo produzidos nas mesmas condições. Além disso, comparou-se também os resultados com o vidro obtido diretamente de uma vidraçaria (VC), para ter como critério e parâmetro dados do vidro que é produzido nas condições normais na indústria, que é uma produção em alta temperatura, cerca de 1500°C.

As amostras foram produzidas no laboratório do Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) no Campus de Alegrete, Rio Grande do Sul. Foram fabricadas uma amostra de vidro CCA-I e uma amostra de vidro AM para cada ensaio realizado. O processo de fabricação das amostras foi o mesmo para ambos os tipos de vidro, seguindo um padrão estabelecido, abordado com mais detalhes do tópico 3.2. Quanto ao formato das amostras, não foi possível um controle detalhado do mesmo, porém, tentou-se produzir amostras de dimensões semelhantes.

Os ensaios realizados incluíram medição de densidade, presença de microbolhas, ataque ácido, choque térmico, absorção de água e microdureza, Uv-vis e condutividade térmica. Produziu-se um total de 7 amostras de vidro de CCA-I, assim como 7 amostras de vidro de AM. A Figura 12, ilustra o programa experimental, relacionando cada ensaio realizado com cada unidade de amostra. As amostras que passaram por duas análises diferentes, deu-se pelo fato de que o primeiro ensaio não foi destrutivo, ou seja, a amostra não sofre qualquer dano ou alteração.

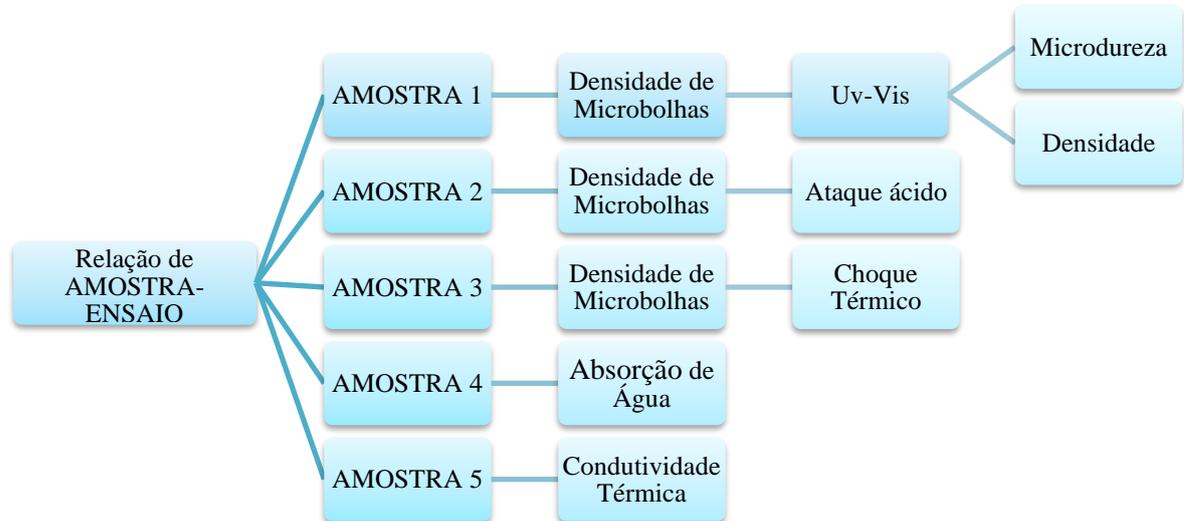
Figura 12 - Programa experimental para as amostras de CCA-I e AM.



Fonte: Elaboração própria.

Os vidros produzidos com CCA-I e AM passaram pelo mesmo programa experimental para análises, salientando que seu procedimento de produção não é idêntico ao comercial, especialmente em referência à temperatura de produção (1500 C vs 1200 C). Contudo, foram efetuadas também análises com vidro comercial (VC): o programa experimental ocorreu do modo representado na Figura 13. Tendo em vista que se obteve 5 amostras de vidro VC da vidraçaria X de Alegrete, Rio Grande do Sul, o processo e ordem de experimentos foi alterado em relação aos vidros de CCA-I e de AM. Seguiu-se o mesmo padrão, realizando os ensaios não destrutivos primeiro, nos casos em que a mesma amostra passou por mais de uma análise diferente. Ressalta-se que a amostra 1 foi dividida em duas partes, uma para realizar a medida de dureza e outra para densidade.

Figura 13 - Programa experimental para as amostras de vidro comercial (VC).

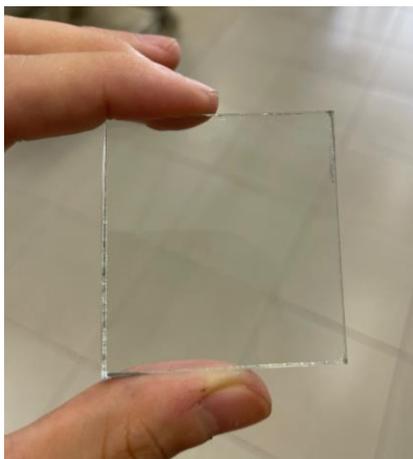


Fonte: Elaboração própria.

### 3.1 Vidro comercial

As amostras de vidro comercial consumidas neste trabalho foram do vidro *float* fornecidas comercialmente por uma vidraçaria X de Alegrete, Rio Grande do Sul. A empresa disponibilizou 5 amostras com dimensões, em média, de 5 cm de base, 5 cm de altura e 0,3 cm de espessura. A Figura 14 apresenta a amostra do vidro fornecido pela vidraçaria.

Figura 14 - Amostra de vidro comercial.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.2 Vidros produzidos

Foram produzidas amostras de vidro borossilicato com as diferentes fontes de sílica para a realização dos estudos: cinza da casca do arroz obtida diretamente da indústria (CCA-I) e areia mineral (AM). A cinza da casca do arroz utilizada foi fornecida pela indústria Pilecco Nobre LTDA, de Alegrete.

Os vidros produzidos neste estudo foram do tipo borossilicato em baixa temperatura (1200°C). Para alcançar a fusão adequada dos materiais, foi necessário aumentar a quantidade de bórax na mistura em comparação com a quantidade normalmente utilizada na produção comercial de vidros. É importante ressaltar que essa decisão foi tomada devido às limitações do equipamento disponível. Portanto, o aumento do bórax foi uma medida adotada para adaptar o processo às condições específicas do experimento, fazendo com que a temperatura de fusão diminuísse e tornasse possível a fabricação das amostras dos vidros. Enfatizando que o vidro produzido comercialmente é fabricado normalmente a 1500°C.

Os reagentes utilizados na composição das misturas de todas as amostras foram: sílica (variando a fonte entre CCA-I e AM); carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ); carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e bórax. A Tabela 1 lista a quantidade de reagente utilizada no contexto de fabricação de 10 gramas de vidro. A quantidade em gramas da fonte de sílica depende, mesmo que se mantenha a produção de 10 gramas de vidro, da porcentagem de sílica presente na sua fonte. Como a AM é mais rica em sílica (99,9%), quando a mesma é fonte de sílica para o vidro sua quantidade em gramas é reduzida em relação ao caso da CCA-I como fonte. A CCA-I possui

menos sílica na composição (87%), logo necessitou-se de mais gramas dela para chegar à porção de sílica demandada.

Tabela 1 - Relação dos materiais utilizados na produção do vidro.

	Quantidade em gramas		Quantidade em porcentagem	
	AM (g)	CCA-I(g)	AM (%)	CCA-I(%)
<b>Sílica</b>	3,77	4,38	24,29	27,16
<b>Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></b>	0,74	0,74	4,74	4,56
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	0,47	0,47	3,03	2,92
<b>Bórax</b>	10,53	10,53	67,94	65,36

Fonte: Elaboração própria.

Primeiramente os reagentes foram pesados, em seguida misturados e homogeneizados com auxílio do pistilo e almofariz. Após isso, a mistura foi depositada no cadinho, que na sequência foi levado ao forno mufla (F1) (marca INTI Fornos e Equipamentos e modelo QR 1300/3). O processo do forno, exposto na Figura 15, deu-se da seguinte maneira: inicialmente a mistura ficou ao longo de 1 hora a uma temperatura de 1000°C, e depois mais 2 horas a uma temperatura de 1200°C, sempre com uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto. No fim do período do forno o vidro foi vertido em uma chapa metálica. A chapa metálica foi pré-aquecida à uma temperatura de 480°C em um segundo forno mufla (F2) (marca Fortelab e modelo 1300 - Pechini), e depois de receber o vidro foi inserido novamente no forno F2 para o acondicionamento do vidro a 480°C por mais 1 hora, para enfim resfriar até temperatura ambiente gradativamente evitando possíveis choques térmicos. O procedimento descrito acima, para a produção do vidro em laboratório, resultou em uma amostra de vidro, replicando-se o processo até que todas as amostras de vidro necessárias para o estudo estivessem fabricadas. Vale ressaltar que os vidros produzidos em laboratório apresentaram formato diferente em relação ao vidro obtido da vidraçaria, as amostras de vidros produzidas podem ser visualizadas no item 4.1.

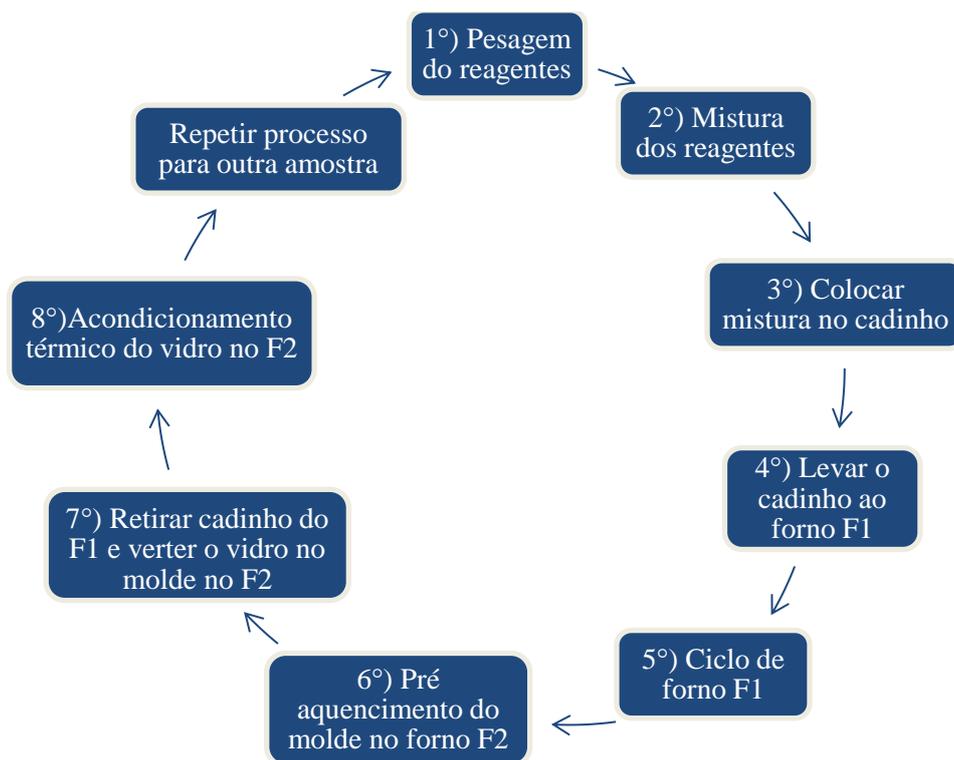
Figura 15 - Processo de forno do vidro.



Fonte: Elaboração própria.

Com a finalidade de melhor ilustração, a Figura 16 exemplifica a sequência do processo de fabricação dos vidros, que é o mesmo para todas as amostras independente da fonte de sílica.

Figura 16 – Processo de fabricação de uma amostra de vidro.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.3 Choque térmico

A análise do comportamento das amostras em relação ao choque térmico foi baseada na ABNT NBR 14910:2002 intitulada de “Embalagens de vidro para produtos alimentícios -

Requisitos e métodos de ensaio”. O ensaio para mensurar a resistência ao choque térmico referido na NBR 14910 foi adaptado e elaborado como descrito no seguinte parágrafo. Foram ensaiadas uma amostra de cada tipo de vidro, ou seja, uma do vidro da CCA-I, outra do vidro da AM, e outra do vidro comercial.

No primeiro instante foram efetuadas imagens da amostra, por meio do microscópio óptico (MO) (marca Kontrol ® e modelo IM-713), com a finalidade de obter referências das mesmas antes do processo experimental. Logo, encheu-se o béquer 1 (B1) de água e colocou-se o mesmo sobre uma base quente. Com o auxílio do termômetro, controlou-se a temperatura desta água até que chegasse à temperatura de ebulição. Neste momento, colocou-se a amostra no B1 com o auxílio da pinça. A mesma ficou submersa na água em ebulição durante o período de 30 minutos. Assim que completou esse ciclo a amostra foi retirada do B1, com o auxílio da pinça, e depositada imediatamente em água a temperatura ambiente no béquer 02. Por fim, foram capturadas as imagens no MO após o ensaio para obter com maior precisão os resultados obtidos. O resumo do processo de ensaio para verificação quanto a resistência ao choque térmico está ilustrada na Figura 17.

Figura 17 - Procedimento de análise da resistência ao choque térmico.



**Nota \***. Amostras durante a imersão na água em ebulição no béquer, sobre a base quente.  
Fonte: Elaboração própria.

### 3.4 Condutividade térmica

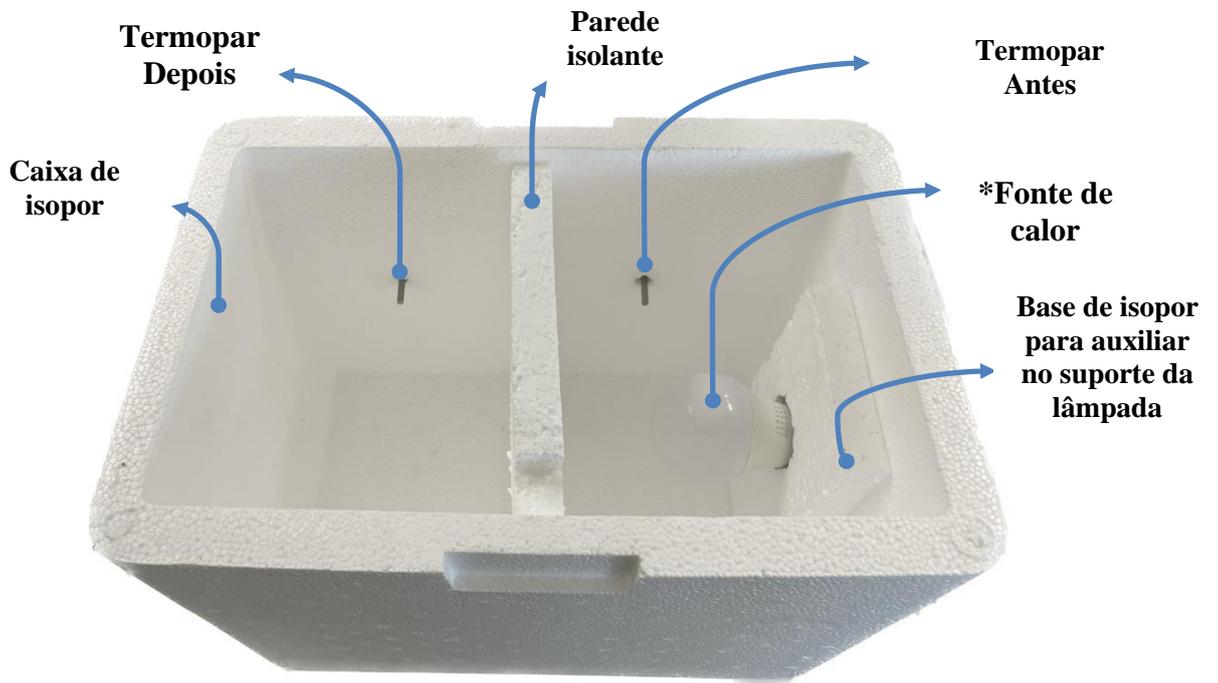
No âmbito do procedimento experimental para a condutividade térmica, a análise concentrou-se na medição da temperatura em ambos os lados de uma amostra de vidro, visando quantificar a transferência de calor através do material. Para atingir esse objetivo, foram

utilizados dispositivos de medição de temperatura (termopar). A amostra de vidro foi submetida a condições controladas, permitindo a observação das variações térmicas em tempo real. Durante o experimento, a temperatura foi registrada e coletada através de um Arduino, em intervalos regulares, possibilitando a análise da condutividade térmica do vidro e sua capacidade de transmitir ou resistir à transferência de calor. O controle da temperatura foi feito ao longo de 15 minutos, com medições com intervalo de tempo de 30 segundos. O desenvolvimento do experimento foi planejado para garantir precisão nas medições e controle das variáveis.

A idealização deste experimento não seguiu normativas, porém foi pensada e elaborada pelo autor e orientadora deste trabalho a partir de conceitos e análises semelhantes para o fim de medição e controle de variação de temperatura. Inicialmente, a metodologia envolveu a montagem de um ambiente controlado de temperatura para essa análise. Uma caixa de isopor foi adaptada e dividida em dois compartimentos, sendo um deles destinado a conter uma fonte de calor controlada. A separação entre esses compartimentos foi garantida por uma espessa folha de isopor, configurando uma "parede" isolante. A única abertura nessa estrutura isolante permitia a inserção da amostra de vidro, estabelecendo o único meio pelo qual o calor poderia ser transferido de um lado para o outro. A abertura realizada para inserção da amostra foi posicionada de maneira alinhada com a fonte de calor. Em cada lado foram instalados termopares, conectados ao Arduino, que por sua vez foi conectado ao computador através de uma conexão USB. Com um código de programação no aplicativo IDE Arduino as temperaturas foram registradas no aplicativo e exportados para uma tabela em Excel para análises subsequentes. A posição adotada para os termopares escolhida foi no centro de cada ambiente, antes e depois a fonte de calor.

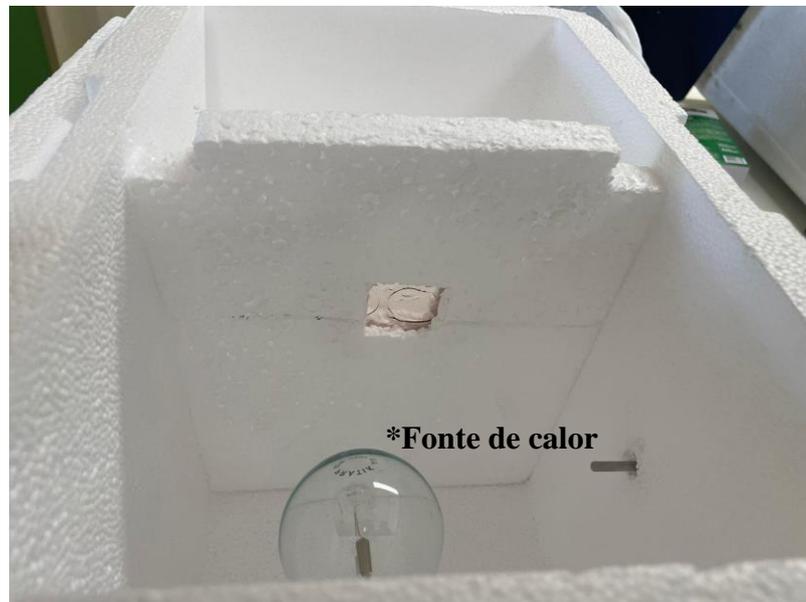
As Figura 18 e Figura 19 demonstram o aparato montado para o teste. Como fonte de calor, escolheu-se uma lâmpada halógena, pois esse modelo de lâmpada gera luz através de emissão radiativa, ou seja, calor (FELICÍSSIMO, 2003).

Figura 18 – Aparato utilizado para a análise.



**Nota \***. Representação da fonte de calor. Durante a análise utilizou-se uma lâmpada halógena de 2700K e 70W.  
Fonte: Elaboração própria

Figura 19 – Aparato utilizado para a análise.



**Nota \***. Lâmpada utilizada durante as análises. Lâmpada halógena de 2700w e 70W.  
Fonte: Elaboração própria.

Foram analisadas, quanto à condutividade térmica, uma amostra de cada tipo de vidro, ou seja, uma do vidro da CCA-I, outra do vidro da AM, e outra do vidro comercial.

### 3.5 UV-VIS

A análise da espectroscopia na região visível (VIS) e ultravioleta (UV) foi realizada conforme ABNT NBR 14910 (ABNT, 2002). Através deste ensaio, verificou-se o comportamento quanto à transmissão de luz UV-VIS de uma amostra de cada tipo de vidro, ou seja, uma do vidro da CCA-I, outra do vidro da AM, e outra do vidro comercial. Com os resultados obtidos é possível comentar a respeito da transparência óptica do material.

Para a observação dessa característica, as amostras, após serem produzidas, passaram por um processo de preparo: elas foram lixadas, com o auxílio das lixas de número 80, 120, 600, 1200 e 2000, depois polidas, através de um politriz com água e alumina líquida, de ambos os lados. Isso evita que a luz seja espalhada por defeitos nas superfícies das amostras.

Após o preparo, antes das análises, foi medida a espessura das amostras de vidro, calibrado o espectrofotômetro utilizado (marca Bel Photonics, modelo UV-M51. UV/VIS Spectrophotometer), Figura 20. Na sequência, foram inseridas as amostras no equipamento para a leitura da transmitância, as amostras foram fixadas para a leitura com a ajuda de uma fita. O espectrofotômetro opera fundamentalmente através de uma fonte luminosa e um monocromador responsável por segmentar a luz em comprimentos de onda individuais, abrangendo desde o ultravioleta (UV) a 190 nanômetros até o infravermelho a 1100 nanômetros. Esse processo inclui todo o espectro visível, de 400nm a 700nm e uma parte da região ultravioleta e infravermelho.

Figura 20 - Espectrofotômetro utilizado.



Fonte: Elaboração própria.

A média da espessura de cada amostra, para a verificação da transmitância, foi realizada com o auxílio de um paquímetro. O paquímetro utilizado foi de modelo universal quadrimestral (Figura 20). Esta atividade foi necessária para normalizar a transmitância de cada amostra pela própria espessura.

Figura 20 - Paquímetro universal quadrimestral.



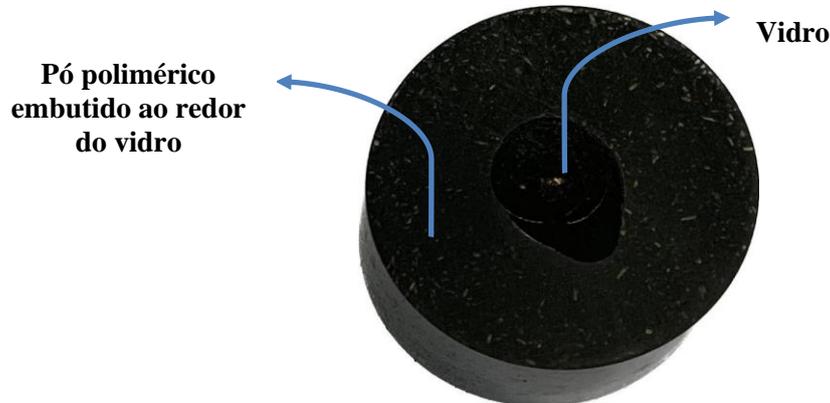
Fonte: Elaboração própria.

### 3.6 Dureza

Para a análise da dureza, as amostras de vidro produzidas em laboratório precisaram passar por um preparo prévio, tendo em vista a seguinte necessidade: essas amostras eram pequenas para o suporte do aparelho utilizado nesse ensaio, e o preparo foi realizado para adequação ao suporte. Já a amostra de vidro comercial tinha dimensões maiores, 5 cm de base, 5 cm de altura e 0,3 cm de espessura, e puderam ser encaixadas no microdurômetro sem preparo prévio.

O microdurômetro utilizado foi de marca Buehler e modelo Micromet 6010. O preparo das amostras ocorreu da seguinte maneira: primeiro foi lixada uma superfície da amostra, deixando-a lisa e limpa. Segundo a amostra passou pelo processo de embutimento (que ocorre devido a amostra ser pequena para ser fixada no suporte do microdurômetro). Para isso, a amostra é colocada em um recipiente e recoberta por Baquelite, uma resina sintética em pó, que através de pressão e calor se transforma em um polímero estável. Sucessivamente, o recipiente é sujeito a pressão máxima de 1000 lbf/pol<sup>2</sup> em temperatura crescente de temperatura ambiente até 143 °C para proporcionar uma estrutura coesa e estável (Figura 21). O embutimento foi realizado com o auxílio de uma prensa de embutimento (Embutidora Metalográfica Manual -

Figura 21 - Amostra após o embutimento, pronta para o ensaio de microdureza.



Fonte: Elaboração própria.

Já no microdurômetro, Figura 22, as amostras receberam aplicação de carga pontual de 0,5 quilos durante 10 segundos. O microdurômetro realiza a medida da indentação após cada aplicação de força, calculando os valores de dureza. Foram realizadas três medidas pontuais em cada amostra, e a dureza final foi a média das três medidas na mesma. Mediu-se a microdureza em uma amostra de cada tipo de vidro, ou seja, uma do vidro da CCA-I, outra do vidro da AM, e outra do vidro comercial.

Figura 22 - Microdurômetro utilizado durante a leitura da dureza.



Fonte: Elaboração própria

### **3.7 Densidade do vidro e densidade de microbolhas**

Para averiguar a densidade, foi aplicado o método de deslocamento de volume tendo como referência, com adaptações, a NBR 16184 (2021). O procedimento de ensaio foi o seguinte: pesagem da amostra; preparo de um becker com água destilada; anotação da medição do volume de água no becker, usando uma pipeta graduada com uma precisão de  $\pm 0,01$  mL.; inserção da amostra no becker; anotação do volume de água no becker com a amostra. O cálculo para a expressão dos resultados foi exatamente igual ao especificado pela NBR 16184 (2021) para determinação da densidade de massa. De modo que  $d = m/v$ , onde  $d$  é a densidade (g/mL),  $m$  a massa (g) e  $v$  volume (mL). Para cada amostra foram realizadas três repetições, sendo a densidade final a média das triplicatas da mesma.

Quanto à densidade de microbolhas, o procedimento de ensaio foi baseado e adaptado da NBR 14910 (2002). Primeiramente, foi feita a pesagem em gramas da amostra; em seguida, foi feita a contagem do número de microbolhas com o auxílio de uma fonte de luz e uma lupa. A relação microbolhas/grama é dada pela razão entre a quantidade de microbolhas e o peso da amostra. Para cada amostra foram realizadas três repetições, a densidade de microbolhas final foi a média das triplicatas da mesma.

Tanto para a verificação da densidade, quanto para a densidade de microbolhas, analisou-se uma amostra de cada tipo de vidro, ou seja, uma do vidro da CCA-I, outra do vidro da AM, e outra do vidro comercial.

### **3.8 Adsorção de água e ataque ácido**

A análise do comportamento das amostras acerca da absorção de água e também do ataque ácido utilizou-se como referência a NBR 16184 (2021).

Para a caracterização quanto a absorção de água o procedimento de ensaio ocorreu da seguinte forma: pesou-se a amostra; preparou-se um becker com água destilada; a amostra foi submersa com o auxílio de uma pinça no béquer; imediatamente, aferiu-se o pH (tempo zero); após um período de 3 horas, foi medido o pH no becker ainda com a amostra nele, depois a mesma foi retirada, secada, e pesada; esse processo de medição do pH e pesagem da amostra foi efetuado também para os tempos de 25, 45, 75 e 90 horas.

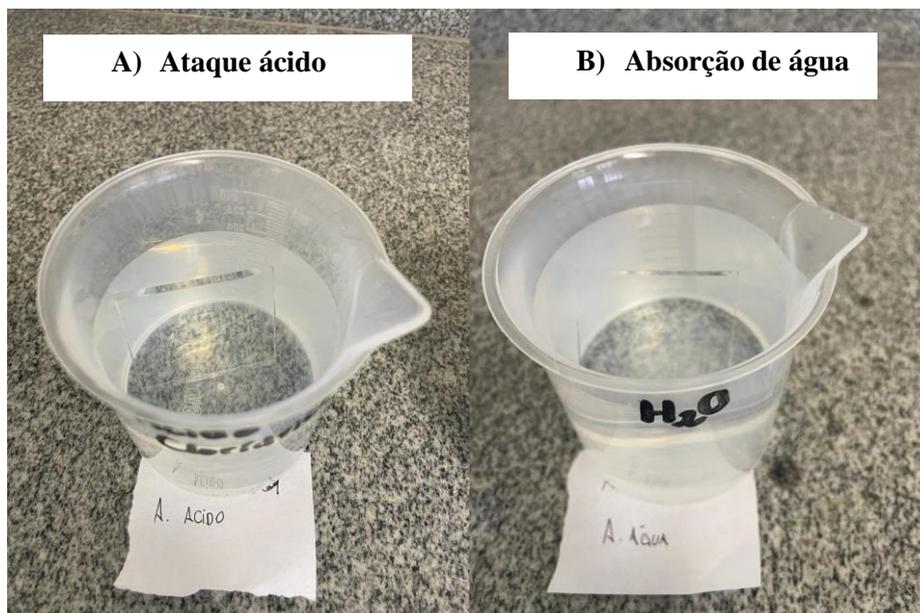
Para a exploração quanto ao ataque ácido também foi referida a norma NBR 16184 (2021) com adaptações. Foram realizadas imagens das amostras antes e depois do processo

através do MO para definir melhor os resultados. O procedimento experimental foi o seguinte: a amostra foi pesada; preparou-se um becker com ácido clorídrico em pH 5,5; a amostra foi submersa com o auxílio de uma pinça no béquer; imediatamente, aferiu-se o pH (tempo zero); após o período de 90 horas finalizou-se o ensaio mensurando o pH da solução, retirando, secando e pesando a amostra.

Para a investigação do comportamento quanto à adsorção de água e ataque ácido, foi analisada uma amostra de cada tipo de vidro, ou seja, uma do vidro da CCA-I, outra do vidro da AM, e outra do vidro comercial.

A Figura 23 ilustra as amostras de AM submersas durante as análises de ataque ácido e absorção de água.

Figura 23- Amostras de VC submersas durante A) ataque ácido B) absorção de água.



Fonte: Elaboração própria.

## 4 RESULTADOS

Neste tópico, serão listados os resultados que foram obtidos a partir das análises descritas anteriormente. Estes resultados serão explorados e examinados na sequência, abordando as descobertas e verificando se as respostas atendem as questões e objetivos propostos do trabalho. Vale ressaltar que em função das condições do laboratório/produção, o formato e as espessuras das amostras foram variáveis.

### 4.1 Vidros produzidos

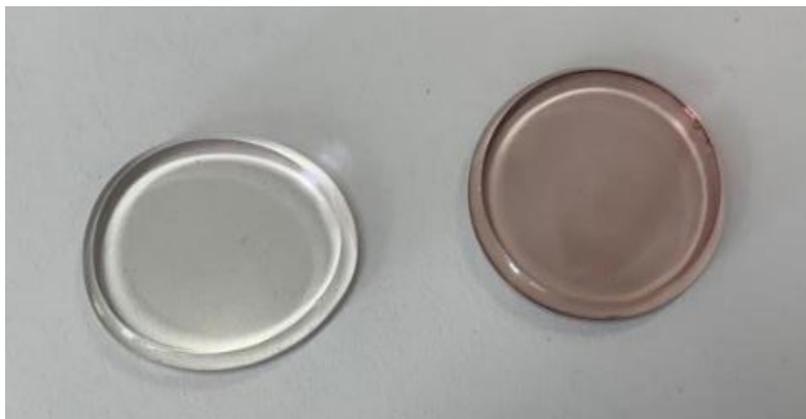
Após o procedimento descrito no tópico 3.2 deste trabalho, teve-se como primeiro resultado a obtenção das amostras de vidros em baixa temperatura de CCA-I e AM. Na Figura 24 são amostras logo após a finalização do processo de forno, ambas de vidro de CCA-I. Já a Figura 25 apresenta uma unidade de amostra de cada tipo de vidro produzido com as diferentes fontes de sílica: estas amostras apresentam-se lixadas e polidas para a realização dos espectros UV-Vis.

Figura 24 - Amostras de vidro de CCA-I após todo o processo de fabricação.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 - Amostras de vidro a) de AM e b) de CCA-I.



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2 Densidade

Como mencionado anteriormente neste estudo, foram realizadas cinco medições de densidade para cada tipo de vidro, com o objetivo de obter uma média. A densidade obtida para os vidros fabricados com AM foi de  $2,968 \pm 0,51$  g/L, enquanto para os vidros de CCA-I foi de  $3,054 \pm 0,14$  g/L. Notavelmente, a densidade para a amostra comercial de areia revelou-se estatisticamente menor, registrando  $2,295 \pm 0,13$  g/L. Os resultados dessas medições estão detalhados nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 2 - Valores medidos para o vidro de AM.

<b>Amostra de Areia Mineral (AM)</b>			
<b>Medida</b>	<b>Massa do vidro (g)</b>	<b>Volume deslocado (ml)</b>	<b>Densidade (g/ml)</b>
<b>1</b>	1,375	0,50	2,750
<b>2</b>		0,37	3,716
<b>3</b>		0,42	3,274
<b>4</b>		0,45	2,644
<b>5</b>		0,56	2,455
<b>Média das 5 medidas de densidade (g/ml)</b>			<b>2,968</b>

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 - Valores medidos para o vidro de CCA-I.

<b>Amostra Cinza da Casca do Arroz (CCA-I)</b>			
<b>Medida</b>	Massa do vidro (g)	Volume deslocado (ml)	Densidade (g/ml)
<b>1</b>	4,788	1,57	3,05
<b>2</b>		1,66	2,884
<b>3</b>		1,08	3,088
<b>4</b>		1,12	2,977
<b>5</b>		1,02	3,269
<b>Média das 5 medidas de densidade (g/ml)</b>			3,054

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4 - Valores medidos para o vidro de VC.

<b>Amostra de Vidro Comercial (VC)</b>			
<b>Medida</b>	Massa do vidro (g)	Volume deslocado (ml)	Densidade (g/ml)
<b>1</b>	4,3858	1,98	2,215
<b>2</b>		1,88	2,333
<b>3</b>		2,03	2,1605
<b>4</b>		1,75	2,5062
<b>5</b>		1,94	2,261
<b>Média das 5 medidas de densidade (g/ml)</b>			2,295

Fonte: Elaboração própria.

A diferença entre os valores de densidade dos vidros produzidos em baixa temperatura, tanto com a cinza da casca do arroz como com areia mineral, é mínima e pode ser atribuída às impurezas que permanecem após a calcinação na cinza da casca do arroz, especialmente de  $Al_2O_3$  (óxido de alumínio), que apresenta quase o dobro do peso molecular do  $SiO_2$  (dióxido de silício). Ou seja, a receita para fazer o vidro em baixa temperatura faz com que a densidade aumente.

Explorando os parâmetros relativos à densidade conforme as diretrizes estabelecidas na norma NBR NM 297:2004 para os vidros normais planos e também pelas orientações estabelecidas pela norma NBR 7199:2016, a qual dispõe de diretrizes destinadas à utilização de vidros no âmbito da construção civil, os mesmos devem apresentar densidade igual a 2,5 g/ml. Desse modo, nas medições realizadas neste estudo a densidade de massa para o vidro VC se

aproximou ligeiramente da solicitada na norma. Enquanto isso, as de CCA-I e de AM, devido às receitas adaptadas para produção em baixa temperatura, se saíram mais densas.

### 4.3 Densidade de microbolhas

Os resultados da análise visual de microbolhas são resumidos na Tabela 5 e Tabela 6. Percebe-se elevada densidade de microbolhas observada na amostra de CCA-I, que pode ser atribuída à presença significativa de carbono na composição da cinza, especialmente na forma de carbonatos. Este componente específico contribui para a formação de bolhas durante o processo de produção, as quais são subsequentemente eliminadas na forma de CO<sub>2</sub>. Como resultado, o tempo necessário para a fabricação no forno deveria ser mais prolongado, visando alcançar uma matriz vítrea mais homogênea e livre de bolhas.

Este fenômeno destaca a influência da fonte de sílica do vidro na densidade de microbolhas do material, pois mesmo que o vidro de AM tenha passado pelo processo de forno equivalente ao do vidro de CCA-I, o vidro de AM possui densidade de microbolhas (Tabela 6) menor do que o de CCA-I.

Tabela 5 – Valores medidas para o vidro de AM.

<b>Amostra AM</b>			
<b>Amostra</b>	<b>microbolhas (unidades)</b>	<b>peso (g)</b>	<b>densidade de microbolhas</b>
01	1	2,024	0,494
02	0	1,7832	0
03	0	2,1436	0

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 – Valores medidas para o vidro de CCA-I.

<b>Amostra CCA-I</b>			
<b>Amostra</b>	<b>microbolhas (unidades)</b>	<b>peso (g)</b>	<b>densidade de microbolhas</b>
01	5	1,36	3,676
02	0	1,7148	0
03	2	1,7326	1,154

Fonte: Elaboração própria.

Percebeu-se essencial um cuidado no controle do tempo de fabricação para garantir a qualidade e uniformidade da matriz vítrea, como por exemplo no vidro comercial obtido da indústria, onde nessa análise a ocorrência de microbolhas nas triplicatas foi de zero microbolhas/grama (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores medidas para o vidro de VC.

<b>Amostra VC</b>			
<b>Amostra</b>	<b>microbolhas (unidades)</b>	<b>peso (g)</b>	<b>densidade de microbolhas</b>
01	0	19,6044	0
02	0	18,7257	0
03	0	19,3958	0

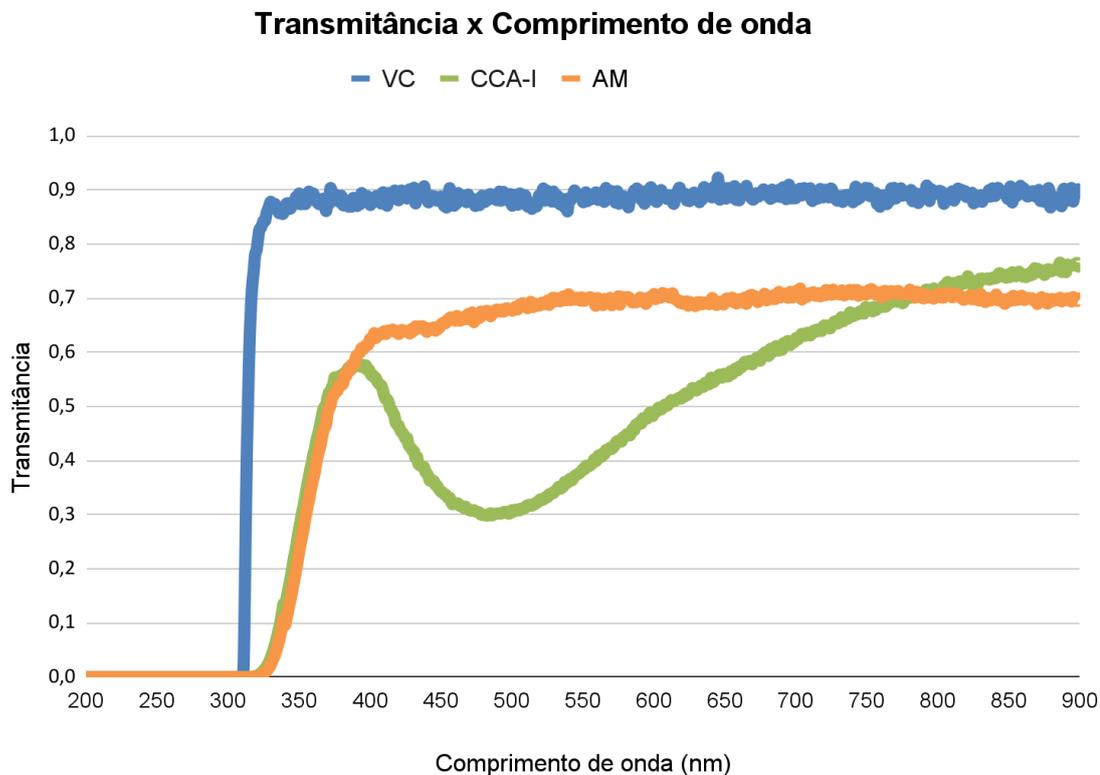
Fonte: Elaboração própria.

#### **4.4 Avaliação dos espectros Uv-Vis**

A partir das medições realizadas pelo espectrofotômetro, gerou-se um gráfico que representa a relação entre a transmitância e o comprimento de onda para cada amostra de vidro. Como as amostras de CCA-I, AM e VC apresentavam espessuras diferentes, embora cada uma delas possuísse as suas duas faces paralelas, as medidas individuais de transmitância foram normalizadas pela espessura da sua respectiva amostra, sendo convertida em uma espessura padrão de 1 milímetro, com a finalidade de realizar uma análise e comparações absoluta entre elas.

A análise que foi realizada foi uma análise de transmitância, ou seja, medindo a luz que é transmitida através da amostra. A amostra de vidro comercial é transparente, isso se explica pelo fato de que todos os comprimentos de onda (cores) passam através sem serem absorvidos, o que fica explícito nos resultados obtidos, e ilustrados na Figura 26.

Figura 26 - Gráfico de transmitância por comprimento de onda.



Fonte: Elaboração própria.

A transmitância da amostra de vidro VC permanece constante e elevada em 90% em todo o espectro, sugerindo que essa amostra não está absorvendo substancialmente nenhuma luz. Quando ocorrem oscilações na linha de transmitância, indica-se que está sendo absorvida a cor correspondente àquele comprimento de onda específico. Portanto, a coloração visível no objeto será a cor oposta na gama do espectro àquela que foi absorvida. Esse fenômeno destaca a relação intrínseca entre a absorção de luz e a percepção de cores em materiais transparentes, no caso deste trabalho, os vidros.

Considerando a situação do vidro de CCA-I, que exibe uma tonalidade vermelha, observou-se uma banda de absorção, variação na transmitância em um comprimento de onda, em 488nm. Destaca-se que o pico dessa absorção no vidro de CCA-I ocorre aproximadamente no comprimento de onda de 500nm. O intervalo entre 500 e 565nm de comprimento de onda, a coloração equivalente é verde, conforme esclarecido por Martins, Sucupira e Suarez (2015). Diante desse contexto, a amostra manifesta uma tonalidade complementar ao verde no espectro. Isso ocorre porque, quando uma substância absorve na faixa do verde, a percepção visual

resultante é a cor oposta, ou seja, o vermelho, e vice-versa (MARTINS, SUCUPIRA E SUAREZ, 2015).

No contexto do vidro de AM, é observada uma transmitância notavelmente alta, acima de 70%, comparável à do vidro VC, mantendo-se constante em todas as faixas de comprimento de onda. Isso atesta a transparência do vidro AM em diferentes regiões espectrais, estabelecendo uma consistência de desempenho semelhante à do vidro VC. Esse comportamento uniforme ao longo dos comprimentos de onda reforça a caracterização de transparente do vidro de AM.

No que diz respeito a absorção UV os vidros de CCA-I e de AM apresentam melhor desempenho, visto que a transmitância é menor ao longo dos comprimentos de onda da região ultravioleta, entre cerca de 200nm até 400nm.

Nesta análise, todos os vidros entram no padrão da norma NBR 7199:2016 que estabelece orientações e classificações quanto à utilização de vidros na construção civil, sendo o vidro de CCA-I como vidro colorido e transparente e o vidro de AM e VC como vidros transparentes e incolores.

#### **4.5 Dureza**

Obteve-se os valores de dureza para as amostras através do microdurômetro, que por sua vez, basicamente, através da indentação nas amostras, aplicando uma carga pré-determinada de 0,5 kgf e as dimensões da marcação no material calculando a dureza denominada de Vickers, que é o quanto ele resiste em ser penetrado.

Dessa maneira, obtivemos a média de três medidas para a amostra de AM, alcançando o valor de dureza de 1011,9 HV 0,5, conforme evidenciado na Tabela 8. Quanto à amostra de CCA-I, observamos a dureza igual a 541,13 HV 0,5, conforme registrado na Tabela 9. Já para a amostra de VC, a dureza atingiu o valor de 524,43 HV 0,5 como indicado na Tabela 10.

É importante destacar a notável similaridade observada entre a amostra comercial (VC) e a proveniente da cinza da casca de arroz (CCA-I). Ambas apresentaram características de dureza próximas, com valores de 524,43 e 541,13 HV 0,5, respectivamente (Tabela 9 e Tabela 10). Essa semelhança sugere uma afinidade nas propriedades de resistência de ambos os vidros, o que pode ser significativo ao considerar possíveis aplicações práticas.

Tabela 8 - Valores medidos para o vidro de AM.

<b>Amostra de AM</b>				
	d1(μm)	d2 (μm)	valor de dureza (HV)	carga
<b>Medida 1</b>	32,98	27,72	1006,6	0,5
<b>Medida 2</b>	28,18	29,55	1112,8	0,5
<b>Medida 3</b>	30,99	32,63	916,3	0,5
<b>Média das medidas</b>			1011,9	

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9 - Valores medidos para o vidro de CCA.

<b>Amostra de CCA</b>				
	d1(μm)	d2 (μm)	valor de dureza (HV)	carga
<b>Medida 1</b>	38,18	38,244	635,1	0,5
<b>Medida 2</b>	44,3	43,12	485,3	0,5
<b>Medida 3</b>	44,35	44,35	503	0,5
<b>Média das medidas</b>			541,133	

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10 - Valores medidos para o vidro VC.

<b>Amostra de Vidro Comercial (VC)</b>				
	d1(μm)	d2 (μm)	valor de dureza (HV)	carga
<b>Medida 1</b>	40,76	41,10	553,5	0,5
<b>Medida 2</b>	42,43	42,28	516,8	0,5
<b>Medida 3</b>	43,82	42,05	503,0	0,5
<b>Média das medidas</b>			524,433	

Fonte: Elaboração própria.

Dentro da regulamentação das propriedades do vidro dentro da norma NBR 7199:2016, que fornece diretrizes sobre o emprego, classificação e projeto de vidros na construção civil, refere-se que o vidro deve ter um valor 6 na escala Mohs. Porém a escala Mohs é uma escala

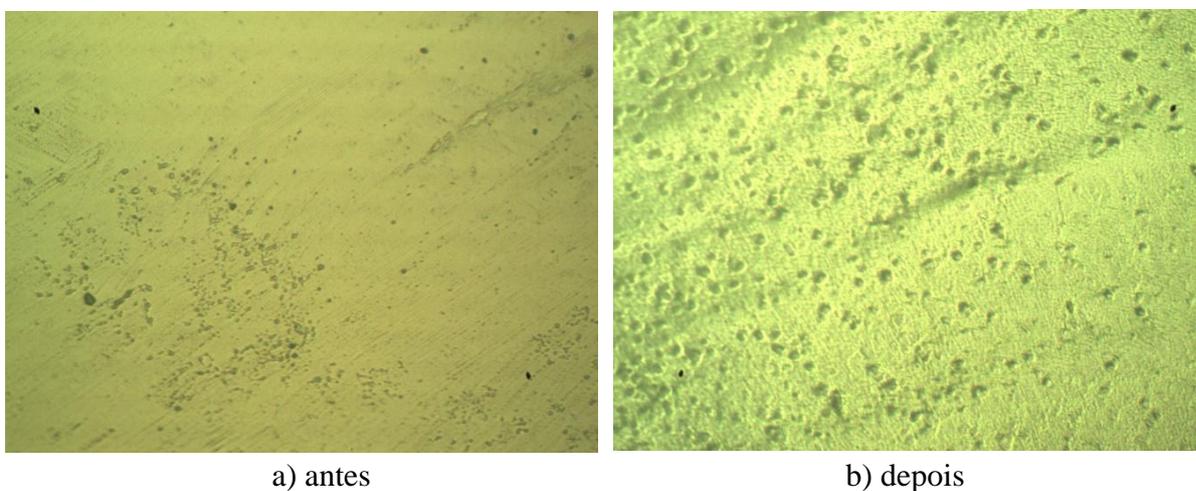
relativa que não possui conversão com outras medições de dureza. Contudo, tendo como parâmetro o vidro comercial que obteve dureza medida em 524,43 HV 0,5, pode-se dizer que ele e o vidro de CCA-I se equivalem quanto à propriedade mecânica de dureza. Já o vidro de AM, apresentou valores mais elevados, quase o dobro. Esta grande diferença é inesperada, e pode ser explicada pensando na microestrutura do material produzido, onde a AM pode ter criado fases diferentes no interior do material, gerando uma propriedade macroscópica diferente. Isso não acontece com a CCA-I por causa de outras impurezas contidas na fonte de sílica.

#### 4.6 Choque térmico

Os resultados após a avaliação da resistência ao choque térmico são apresentados nas Figura 27, 28 e 29, tiradas através do microscópio óptico, todas elas com uma ampliação de 100x. As imagens feitas antes e após o ensaio tornam possível a avaliação do comportamento da superfície do vidro após a avaliação. A variação na textura das amostras ocorreu apenas devido aos moldes nos quais foram vertidas, e nenhuma das amostras passou por lixamento ou polimento antes do experimento.

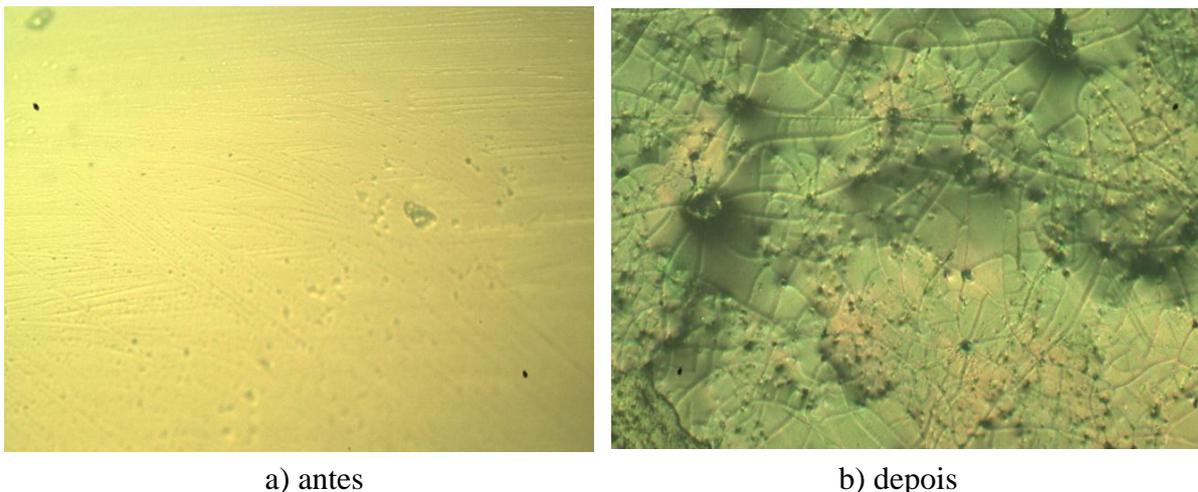
O comportamento da amostra de AM, vidro de areia mineral produzido a baixa temperatura, é apresentado na Figura 27, a) antes e b) depois do choque térmico. Assim como, o vidro de CCA-I, produzido a baixa temperatura, e o VC, vidro comercial, são exibidos, respectivamente, nas Figuras 28 e 29.

Figura 27 – Amostra de AM a) antes e b) depois do choque térmico.



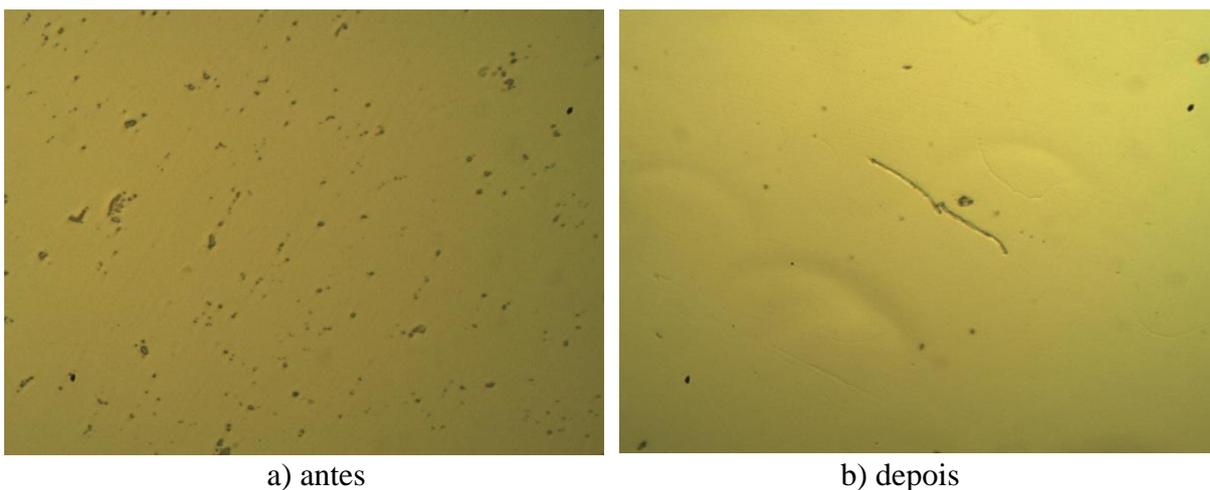
Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Amostra de CCA-I a) antes e b) depois do choque térmico.



Fonte: Elaboração própria

Figura 29 – Amostra de Vidro Comercial (VC) a) antes e b) depois do choque térmico.



Fonte: Elaboração própria

A variação de temperatura provoca o choque mecânico, ocasionando que o material, em diferentes partes, se expanda ou contraia em proporções distintas. Usualmente, a camada externa fria não consegue encolher ao mesmo tempo em que o interior permanece aquecido. Isso resulta em tensões de tração, e quando essa tensão ultrapassa a capacidade de o material resistir, ocorrem rachaduras.

Logo, ao analisar as Figuras 28 e 29, percebe-se pequenas rachaduras em formato de teia na superfície da amostra de vidro de areia mineral (Figura 27, b). Essas microfissuras não foram medidas, mas são ainda mais frequentes no vidro de CCA-I (Figura 28, b) e não estão presentes no vidro comercial (Figura 29, b) após o choque térmico. Conforme a norma NBR

14190:2002, todos os vidros estariam aptos para serem embalagens no que diz respeito ao choque térmico, pois nenhum quebrou. De qualquer forma, os resultados identificam que o vidro comercial aparenta ser mais resistente ao choque térmico, por falta das rachaduras superficiais.

#### 4.7 Absorção de água

É possível acompanhar nas Tabela 11 e Tabela 12 a variação de pH e de massa das amostras ao longo dos intervalos de medições durante o estudo temporal da absorção de água. A partir dos dados, é possível calcular a variação de massa dos vidros. A amostra de AM, no final das 90 horas de ensaio, perdeu 1,04% de sua massa, a de CCA-I perdeu 0,52% e a de VC 0,016%. Evidentemente, observa-se uma notável diferença em relação à resistência à absorção de água entre o vidro comercial e os vidros que foram produzidos em baixa temperatura. Este contraste pode ser atribuído, principalmente, à composição dos vidros. De fato, por causa da adição do Bórax nas receitas, constata-se uma concentração mais elevada de sódio na formulação dos vidros produzidos (vidro CCA-I e AM).

Tabela 11 – Variação da massa e pH de cada vidro.

Amostra	medida 0h		medida 3h		medida 25h	
	pH	Peso (g)	pH	Peso (g)	pH	Peso (g)
AM	7,43	1,159	9,21	1,157	9,05	1,154
CCA-I	7,43	1,929	8,75	1,931	8,84	1,926
Vidro comercial	5,31	18,726	5,52	18,726	5,73	18,724

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Variação da massa e pH de cada vidro.

Amostra	medida 45h		medida 75h		medida 90h	
	pH	Peso (g)	pH	Peso (g)	pH	Peso (g)
AM	8,79	1,151	9,00	1,149	8,92	1,147
CCA-I	8,68	1,923	8,92	1,921	8,77	1,919
Vidro comercial	5,82	18,731	5,55	18,725	6,55	18,723

Fonte: Elaboração própria

O sódio, de acordo com a literatura (SMITH E PANTANO, 2007), tem a característica de ser lixiviado juntamente com grupos OH<sup>-</sup> da superfície do vidro. Este fenômeno contribui para um aumento do pH, tornando a solução mais básica, que fica evidente já nas medidas das amostras de CCA-I e AM após 3 horas de ensaio apenas. Dessa forma, ao analisarmos a resistência à absorção de água entre o vidro comercial e nossos vidros, a presença significativa de sódio na formulação destes últimos se torna um fator relevante a ser considerado, fornecendo uma explicação para a evidente lixiviação nestes vidros que contém mais sódio.

Analisando os resultados quanto a resistência a água de acordo com a norma NBR 16184:2021, apenas a amostra de VC está normalizada com os parâmetros exigidos, tendo em vista que, não ocorreu lixiviação nela e sua superfície manteve-se sem embaçar ou perder o brilho. Vale ressaltar que, para a NBR 7199:2016, vidros laminados na construção civil não devem ter contato direto e permanente com a água ou umidade, mesmo que possa ficar com as bordas expostas às intempéries.

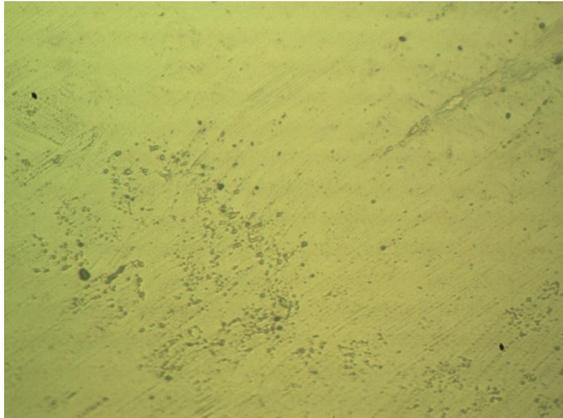
#### **4.8 Ataque ácido**

As Figuras 30, 31 e 32 exibem os resultados do antes e depois da análise de ataque ácido. Quanto à aparência, nas imagens de todas as amostras anteriormente ao ataque ácido é possível perceber uma superfície lisa, sem micro fraturas, com uma coloração uniforme, mesmo que esverdeada ou amarelada devido a lâmpada do microscópio que foi utilizado para realizar as imagens. Já após o ataque, pode-se perceber a aparência de microfraturas, desgastes na superfície e uma diferente coloração, indicando que há uma nova composição química, comprovando que houve uma lixiviação ácida das amostras, excepcionalmente nas amostras de AM e CCA-I.

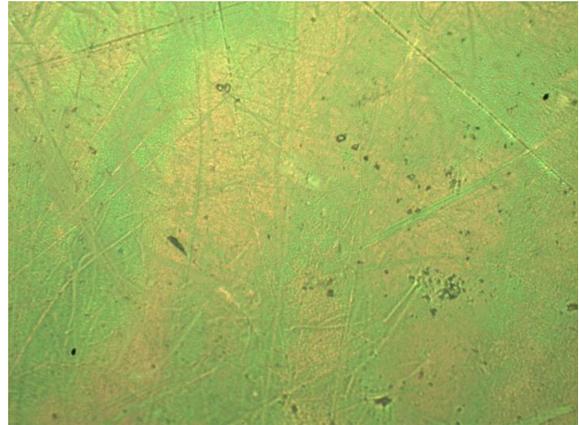
Conforme a norma NBR 16184:2021, tem-se como requisito para as esferas e microesferas de vidro que após o ensaio de resistência ao ácido clorídrico, o vidro não possa apresentar superfície embaçada. Como os vidros de AM e CCA-I lixiviam suas superfícies, elas se apresentaram com perda de brilho e embaçadas após as 90 horas, logo eles não estão de acordo com os parâmetros desta norma.

Essa lixiviação e embaçamento da superfície também foi evidenciada por Smith e Pantano (2007) ao examinarem os efeitos do ácido bórico em vidros que contêm soda e cal.

Figura 30 – Amostra de AM a) antes e b) depois do ataque ácido.



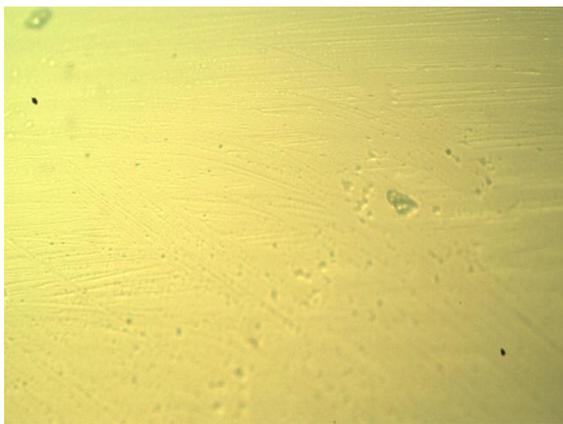
a) antes



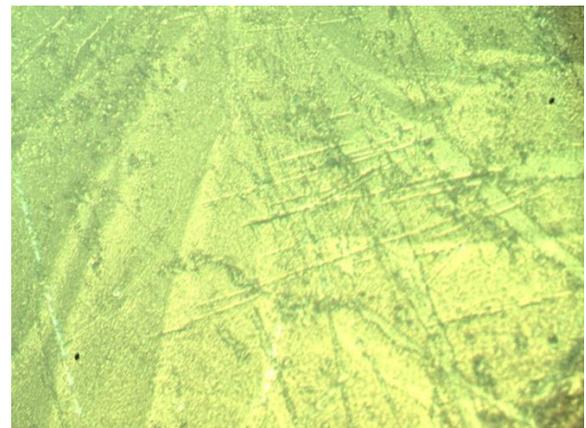
b) depois

Fonte: Elaboração própria

Figura 31 – Amostra de CCA-I a) antes e b) depois do ataque ácido.



a) antes



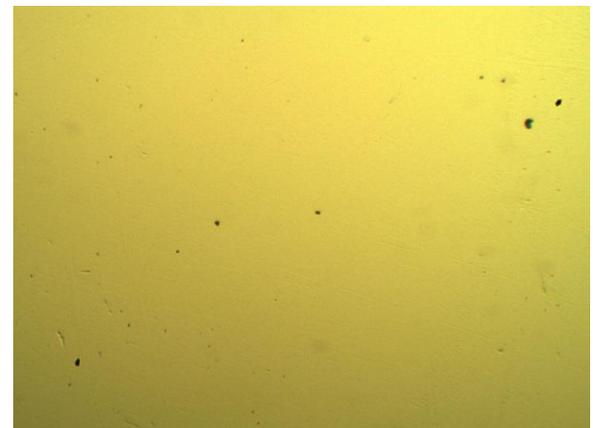
b) depois

Fonte: Elaboração própria

Figura 32 Amostra de vidro VC a) antes e b) depois do ataque ácido.



a) antes



b) depois

Fonte: Elaboração própria

Comparando com o resultado da amostra de vidro comercial (VC), pode-se evidenciar que a coloração permanece a mesma no vidro, pois não houve nenhum desgaste da superfície, antes e após o ataque ácido. Além disso, tanto a massa quanto o pH da amostra de VC mantiveram-se quase constantes, comprovando que este vidro possui alta resistência química.

É possível verificar na Tabela 13, que os vidros de CCA-I e AM tiveram variações consideráveis de massa e principalmente de pH. Após as 90 horas de imersão a massa diminuiu 1,54% para o vidro de AM, 0,86% no vidro de CCA-I e 0,004% no VC, sendo o vidro comercial muito mais resistente que os vidros produzidos em baixa temperatura. Entre os vidros produzidos em baixa temperatura a amostra de CCA-I perdeu o dobro, em porcentagem, em relação ao vidro de AM.

Tabela 13 – Variação da massa e pH de cada vidro.

Amostra	Massa antes (g)	Massa depois (g)	pH antes	pH depois
AM	1,7527	1,7259	6,27	8,80
CCA-I	2,1448	2,1264	6,58	9,10
VC	19,6044	19,6036	5,28	5,60

Fonte: Elaboração própria.

Salienta-se que o vidro com cinza da casca do arroz como fonte de sílica é menos resistente quimicamente no que diz respeito ao vidro com areia mineral como fonte de sílica. A diminuição de peso está principalmente ligada à remoção de sódio por lixiviação, como já relatado na sessão anterior e conforme observado por Jang *et al.* (2000). Eles indicaram que a lixiviação ácida resulta em uma redução de pelo menos 2% da concentração de sódio na superfície em vidros ricos neste elemento.

#### 4.9 Condutividade térmica

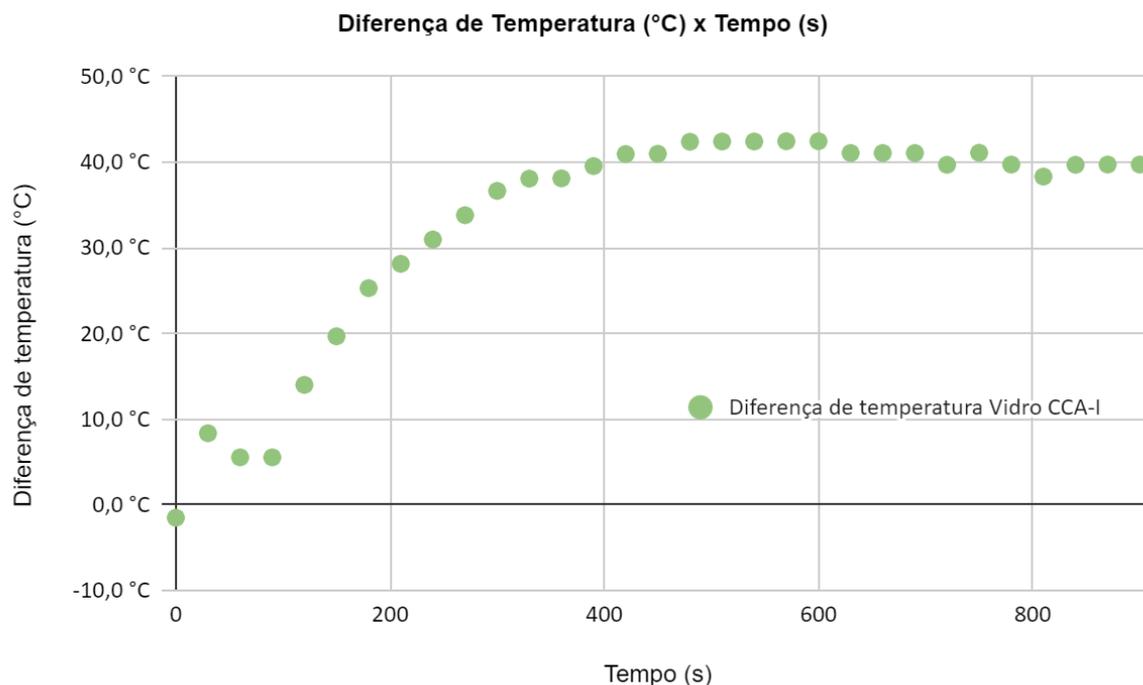
A Tabela 14 e a Figura 33 ilustram os resultados obtidos nesta análise apresentando o comportamento da diferença de temperatura do vidro de CCA-I ao longo do tempo, com medidas a cada 30 segundos, no aparato construído para medição do coeficiente de condutividade térmica dos vidros produzidos. Do mesmo modo, a Tabela 15 e a Figura 34 listam os valores obtidos para o vidro de AM e a Tabela 16 e a Figura 35 do VC.

Tabela 14 - Comportamento do CCA-I ao longo do tempo.

TEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)		Diferença de temperatura
	mesmo lado	lado oposto	
0	59,74 °C	61,25 °C	-1,51 °C
30	70,98 °C	62,63 °C	8,35 °C
60	68,17 °C	62,63 °C	5,54 °C
90	68,17 °C	62,63 °C	5,54 °C
120	78,00 °C	64,00 °C	14,00 °C
150	86,43 °C	66,75 °C	19,68 °C
180	92,05 °C	66,75 °C	25,30 °C
210	96,26 °C	68,13 °C	28,14 °C
240	100,48 °C	69,50 °C	30,98 °C
270	104,69 °C	70,88 °C	33,82 °C
300	108,90 °C	72,25 °C	36,65 °C
330	111,71 °C	73,63 °C	38,09 °C
360	113,12 °C	75,00 °C	38,12 °C
390	115,93 °C	76,38 °C	39,55 °C
420	117,33 °C	76,38 °C	40,96 °C
450	118,74 °C	77,75 °C	40,99 °C
480	120,14 °C	77,75 °C	42,39 °C
510	121,55 °C	79,13 °C	42,42 °C
540	121,55 °C	79,13 °C	42,42 °C
570	122,95 °C	80,50 °C	42,45 °C
600	122,95 °C	80,50 °C	42,45 °C
630	122,95 °C	81,88 °C	41,08 °C
660	122,95 °C	81,88 °C	41,08 °C
690	122,95 °C	81,88 °C	41,08 °C
720	122,95 °C	83,25 °C	39,70 °C
750	124,36 °C	83,25 °C	41,11 °C
780	124,36 °C	84,63 °C	39,73 °C
810	122,95 °C	84,63 °C	38,33 °C
840	122,95 °C	83,25 °C	39,70 °C
870	124,36 °C	84,63 °C	39,73 °C
900	124,36 °C	84,63 °C	39,73 °C

Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 - Gráfico do Vidro CCA-I ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria.

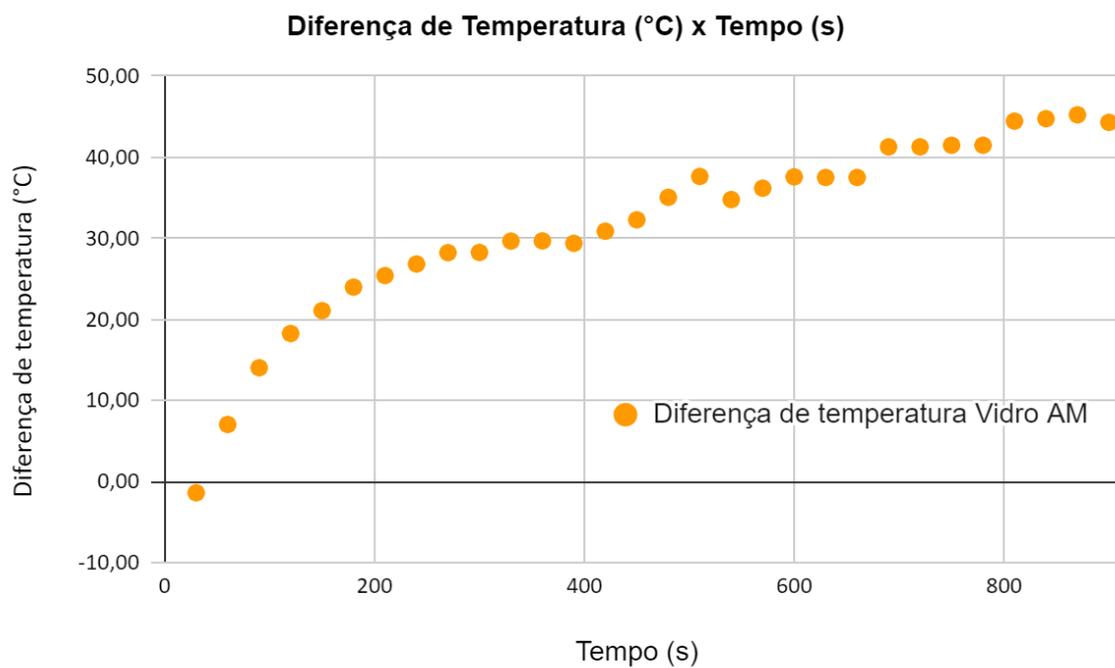
Tabela 15 - Comportamento do AM ao longo do tempo.

TEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)		Diferença de temperatura
	mesmo lado	lado oposto	
0	62,60 °C	64,00 °C	-1,40 °C
30	72,39 °C	65,38 °C	7,02 °C
60	79,43 °C	65,38 °C	14,06 °C
90	85,02 °C	66,75 °C	18,27 °C
120	89,20 °C	68,13 °C	21,08 °C
150	92,11 °C	68,13 °C	23,99 °C
180	94,93 °C	69,50 °C	25,43 °C
210	97,76 °C	70,88 °C	26,89 °C
240	99,16 °C	70,88 °C	28,29 °C
270	100,56 °C	72,25 °C	28,31 °C
300	101,93 °C	72,25 °C	29,68 °C
330	103,35 °C	73,63 °C	29,73 °C
360	103,25 °C	73,63 °C	29,63 °C
390	104,53 °C	73,63 °C	30,91 °C
420	105,90 °C	73,63 °C	32,28 °C
450	107,38 °C	72,25 °C	35,13 °C
480	108,51 °C	70,88 °C	37,64 °C
510	108,49 °C	73,63 °C	34,87 °C

540	109,84 °C	73,63 °C	36,22 °C
570	111,21 °C	73,63 °C	37,59 °C
600	112,58 °C	75,00 °C	37,58 °C
630	112,57 °C	75,00 °C	37,57 °C
660	114,94 °C	73,63 °C	41,32 °C
690	114,94 °C	73,63 °C	41,32 °C
720	115,13 °C	73,63 °C	41,51 °C
750	115,13 °C	73,63 °C	41,51 °C
780	116,70 °C	72,25 °C	44,45 °C
810	117,59 °C	72,25 °C	45,34 °C
840	118,48 °C	73,17 °C	45,31 °C
870	118,48 °C	73,70 °C	44,78 °C
900	119,31 °C	75,00 °C	44,31 °C

Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 - Gráfico do Vidro AM ao longo do tempo.



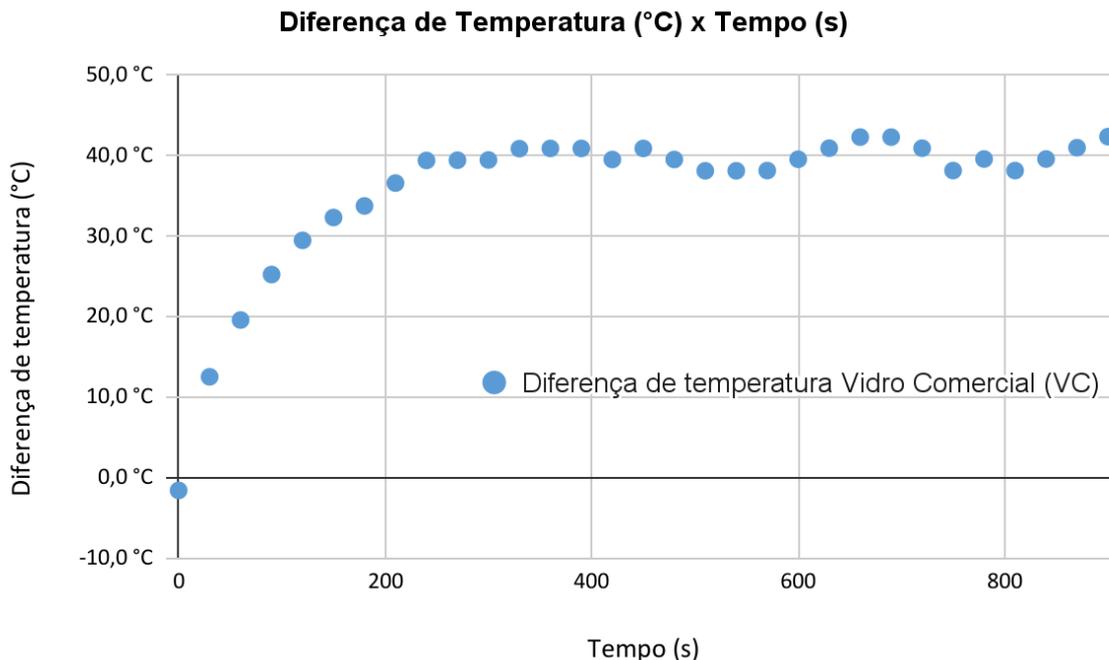
Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 - Comportamento do Vidro Comercial (VC) ao longo do tempo.

TEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)		Diferença de temperatura
	mesmo lado	lado oposto	
0	58,33 °C	59,88 °C	-1,54 °C
30	75,19 °C	62,63 °C	12,57 °C
60	83,62 °C	64,00 °C	19,62 °C
90	90,64 °C	65,38 °C	25,27 °C
120	96,26 °C	66,75 °C	29,51 °C
150	100,48 °C	68,13 °C	32,35 °C
180	103,29 °C	69,50 °C	33,79 °C
210	107,50 °C	70,88 °C	36,63 °C
240	110,31 °C	70,88 °C	39,43 °C
270	111,71 °C	72,25 °C	39,46 °C
300	113,12 °C	73,63 °C	39,49 °C
330	114,52 °C	73,63 °C	40,90 °C
360	115,93 °C	75,00 °C	40,93 °C
390	115,93 °C	75,00 °C	40,93 °C
420	115,93 °C	76,38 °C	39,55 °C
450	115,93 °C	75,00 °C	40,93 °C
480	115,93 °C	76,38 °C	39,55 °C
510	114,52 °C	76,38 °C	38,15 °C
540	114,52 °C	76,38 °C	38,15 °C
570	115,93 °C	77,75 °C	38,18 °C
600	117,33 °C	77,75 °C	39,58 °C
630	117,33 °C	76,38 °C	40,96 °C
660	117,33 °C	75,00 °C	42,33 °C
690	117,33 °C	75,00 °C	42,33 °C
720	117,33 °C	76,38 °C	40,96 °C
750	115,93 °C	77,75 °C	38,18 °C
780	118,74 °C	79,13 °C	39,61 °C
810	115,93 °C	77,75 °C	38,18 °C
840	118,74 °C	79,13 °C	39,61 °C
870	120,14 °C	79,13 °C	41,02 °C
900	120,14 °C	77,75 °C	42,39 °C

Fonte: Elaboração própria

Figura 35 - Gráfico do Vidro Comercial (VC) ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 36 estão resumidos os resultados referentes ao experimento de transmissão de calor, experimento para testar a capacidade de isolar termicamente dos vidros produzidos em baixa temperatura e do vidro comercial. Como é possível verificar, a lâmpada acabou aquecendo o ambiente 1 dentro da caixa de isopor a partir da temperatura ambiente (temperatura inicial “Ti1”) de 59,7°C até chegar ao máximo (temperatura final “Tf1”) em 15 minutos em 124,4°C na amostra de CCA-I, de Ti1 = 62,6°C até Tf1 = 119,3°C no vidro de AM e de Ti1 = 58,3°C até Tf1 = 120,1°C no vidro comercial (VC). Isso confirma que as condições de calor produzidos no ambiente 1 estão de acordo na medida de cada vidro, com leves variações.

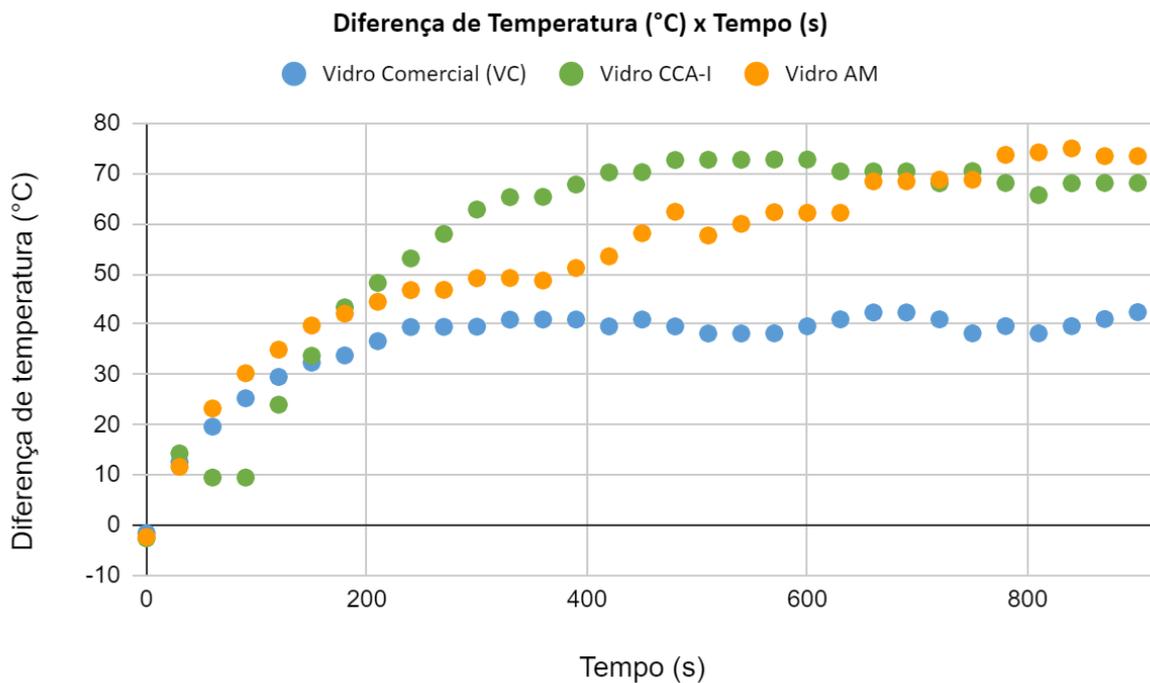
Em contrapartida, do outro lado da caixa, após a parede isolante e a abertura com o vidro, a temperatura inicial (Ti2) se encontrou em 61,3°C e a final (Tf2) em 84,6°C na amostra de CCA-I, Ti2 = 64,0°C e Tf2 = 75,0°C na amostra de AM e Ti2 = 59,9°C e Tf2 = 77,8°C na amostra de VC. Além disso, percebeu-se que no tempo zero os dois sensores, localizados nos lados distintos da caixa, apresentam uma diferença entre um e outro de 1,5 °C.

O que pode ser analisado pelos dados tabulados é que o isolamento com o vidro CCA-I se alcança um equilíbrio de temperatura em aproximadamente 400 segundos após o início do experimento, onde a diferença de temperatura entre os ambientes se torna estável em torno de 40°C. Enquanto isso, no vidro VC isso acontece antes, perto dos 300 segundos.

Quanto às oscilações, mais visíveis no equilíbrio da diferença de temperatura, elas podem ocorrer devido a uma pequena variação da corrente que estava entrando na lâmpada.

Vale ressaltar que a espessura do vidro de cinza da casca do arroz (CCA-I) analisado é de 1,78 mm, a do vidro de areia mineral (AM) é de 2,95 mm e a espessura do vidro comercial (VC) é de 3,05 mm. Os resultados obtidos de diferença de temperatura foram corrigidos assim pela espessura das amostras, considerando a espessura referência a do vidro comercial. Na Figura 36 é possível visualizar de forma comparativa o desempenho de cada vidro.

Figura 36 - Gráfico do Comportamento dos vidros juntos.



Fonte: Elaboração própria

Por fim, utilizando a lei de Fourier que relaciona o fluxo de calor com diferença de temperatura, foi feita uma tentativa de cálculo de coeficiente de condutividade térmica dos vidros produzidos, que se deu pela Equação 1 (Fórmula de Fourier).

$$\Phi = \frac{k \cdot A \cdot \Delta t}{l} \quad (1)$$

Onde:

$\Phi$  – é o fluxo de calor (W);

k – condutividade térmica (W/m \* K);

- A – área da transferência de calor (m<sup>2</sup>);
- Δt – diferença de temperatura entre os dois ambientes (K);
- l – espessura da amostra (m).

O vidro comercial (VC) foi adotado como referência, e seu valor de condutividade térmica (k) foi estabelecido em 1,00 W/(m \* K), conforme especificado pela norma NBR 7199:2016, que fornece diretrizes para o uso de vidros na construção civil. Esse valor de referência foi então empregado para calcular o fluxo de calor após o estabelecimento do equilíbrio térmico. Posteriormente, esse mesmo fluxo de calor, considerando as condições experimentais constantes, foi empregado para determinar o valor da condutividade térmica (k), para as outras amostras, de CCA e AM, que até então possuíam a condutividade térmica desconhecida, utilizando a mesma Equação 1, conforme detalhado na fórmula a seguir (Equação 2).

$$k = \frac{\phi * l}{A * \Delta t} \quad (2)$$

Com isso, encontrou-se o valor de k para o vidro de CCA-I e AM listados abaixo na Tabela 17.

Tabela 17 - Fluxo de calor (ϕ) e condutividade térmica (k) dos vidros.

<b>Vidro</b>	<b>k (W/m * K)</b>	<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>ΔT (K)</b>	<b>l (m)</b>	<b>ϕ (W)</b>
<b>VC</b>	1,00	0,0009	40	0,00305	11,80
<b>CCA-I</b>	0,33	0,0009	70	0,00178	11,80
<b>AM</b>	0,55	0,0009	70	0,00295	11,80

Fonte: Elaboração própria

Com os valores encontrados, a partir de uma variação de temperatura constante, foi possível identificar que o fluxo de calor é proporcional ao coeficiente de condutividade térmica, ou seja, quanto menor o valor de “k”, mais isolante é o material. Sendo assim, os vidros fabricados em laboratório, principalmente o de CCA-I, desempenham um melhor conforto térmico, logo se tornam mais interessante para utilização na construção civil em aberturas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um estudo demonstrando a viabilidade da produção de vidro de cinza da casca de arroz e a sua caracterização, para possível aplicação na engenharia civil, em respeito a algumas propriedades relevantes entre as mecânicas, físicas e químicas, seguindo algumas normativas. Algumas análises foram adaptadas, devido a falta de normalização de ensaios para qualificação de vidros destinados a aplicação na construção civil, especificamente em aberturas.

Vale lembrar que o vidro produzido neste trabalho teve uma receita diferente do vidro comercial disponível em vidrarias para utilização em portas ou janelas, devido a uma limitação no processo de produção. Para melhores condições de comparação dos dados obtidos do vidro de cinza da casca do arroz, foi estudado e fabricado o vidro com areia mineral (AM) como fonte de sílica produzido nas mesmas condições, pois a areia de minério é a fonte de sílica dos vidros comerciais.

Sendo assim, do ponto de vista da densidade de massa do vidro VC se aproximou consideravelmente da solicitada na norma NBR 16184:2021. Enquanto isso, as de CCA-I e de AM, devido às receitas adaptadas para produção em 1200°C, se saíram mais densas. Ademais, pela densidade de microbolhas, também ficou evidente que a diferença nos resultados dos vidros de CCA-I e AM em relação ao vidro VC se deu pelas condições de processo e fabricação distintos, especialmente o tempo de forno e temperatura; mais importante ainda, a fonte de sílica também interfere na quantidade de microbolhas no vidro, quanto mais carbono, mais bolhas terá o material.

Acerca da avaliação dos espectros Uv-Vis ficou notório a diferença entre os vidros, principalmente os oriundos de fonte alternativa de sílica, como o vidro da CCA-I, evidenciada pela sua coloração vermelha. Quanto aos vidros de areia mineral como fonte de sílica, tanto o produzido em baixa temperatura, quanto o fornecido da vidraçaria se apresentaram transparentes, sem absorver nenhum comprimento de onda. Isso afeta a utilidade na do vidro de CCA-I na construção civil, pois para portas e janelas utiliza-se normalmente vidros transparentes. Logo, necessita alteração química na receita do vidro de CCA-I para que o vidro produzido a partir dela se torne transparente.

Adicionalmente, foi possível evidenciar que em termos de propriedades mecânicas, que a dureza do vidro produzido com a cinza da casca do arroz (CCA-I) se equivale com a do vidro comercial (VC). Seguindo nos resultados mecânicos, quanto à resistência ao choque térmico

ficou perceptível o comportamento extremamente semelhante do vidro da CCA-I e do vidro de AM, produzidos a baixa temperatura, apresentando rachaduras microscópicas, diferente do vidro comercial (VC) que permaneceu sem nenhuma. Isso significa que a fonte de sílica não afeta esta propriedade, mas a receita diferente de produção acaba sendo o fator principal desta diferença.

No tocante aos resultados dos ataques químicos, ficou notório que os vidros produzidos a baixa temperatura não desempenham de igual modo ao vidro comercial VC, deixando a desejar quanto a absorção de água e o ataque ácido em respeito à norma NBR 16184:2021, devido à composição adaptada.

Além disso, através dos coeficientes de condução térmica, foi percebido que os vidros produzidos com a receita no laboratório possuem maior resistência à transmissão de calor, sendo assim mais isolantes, e podendo fornecer um melhor conforto térmico se usados em construções.

Por fim, a partir das considerações e resultados apresentados anteriormente neste estudo, conclui-se que o vidro da cinza da casca do arroz (CCA-I) é um forte substituto para o vidro de areia mineral comercializado, mesmo que produzido a 1200°C. Porém torna-se considerável a obtenção de resultados adicionais referentes às propriedades dos vidros provenientes da cinza da casca do arroz. Especialmente, um estudo produzindo vidro da CCA-I em temperatura e receita mais fiéis ao do vidro de areia de minério comercializado. Desse modo, entende-se que continuação e complemento deste estudo é essencial para um entendimento mais abrangente e aprofundado das características deste vidro alternativo. Assim, compreende-se que fortalecerá ainda mais a conclusão de que o vidro da cinza da casca do arroz é uma alternativa promissora, econômica e sustentável para o vidro de areia mineral no contexto de utilização na construção civil, especificamente em aberturas (janelas e portas).

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 293 Terminologia de vidros planos e dos componentes acessórios à sua aplicação.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2004. 30 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199: Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2016. 63 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14697: Vidro Laminado.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2001. 19 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14698: Vidro Temperado.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2001. 19 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14910: Embalagens de vidro para produtos alimentícios - Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2002. 24 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16184: Sinalização horizontal viária — Esferas e microesferas de vidro: Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2021. 32 p.
- ABRAVIDRO. **Vidro float.** Disponível em: [https://abravidro.org.br/vidros/vidro-float/#:~:text=O%20vidro%20float%20\(ou%20comum](https://abravidro.org.br/vidros/vidro-float/#:~:text=O%20vidro%20float%20(ou%20comum). Acesso em: 17 nov. 2023.
- AKERMAN, Mauro. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro.** Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil. 37 p. 2000. Disponível em: [https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcem/wp-content/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut\\_Prop\\_Vidro-Saint-Gobain-2000.pdf](https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcem/wp-content/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut_Prop_Vidro-Saint-Gobain-2000.pdf). Acesso em: 19 jan. 2023.
- ALVES, Oswaldo Luiz; GIMENEZ, Iara de Fátima; MAZALI, Italo Odone. **Vidros.** Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Edição Especial. 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/02/vidros.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- APARECIDA, M. et al. **A importância da reciclagem do vidro para a natureza/ The importance of glass recycling for nature.** Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 5, p. 50239–50246, 19 maio 2021.
- ARAÚJO, Eudes Borges. **Vidro: Uma breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia.** Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 19. n. 3. p. 325-329. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19a34.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2023.
- ASHBY, M. F.; JONES, David R. H.; MARQUES, Arlete Simille. **Engenharia de materiais.** 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2007. v. 2.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é - o que não é**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2017. 200 p.

CALLISTER, JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro - RJ. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. 2018.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. **Ceramic materials: science and engineering**. New York, NY: Springer, 2007. xxii, 716 p. ISBN 9780387462707.

CASTRO, Adriana Petito de Almeida Silva. **Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP. p. 223. 2006.

COSTA, Sandra, *et al.* **As potencialidades do vidro como material estrutural**. Engenharia e Vida. Vol. 18. p. 26-42. 2005. Disponível em:<http://hdl.handle.net/10773/6245> Acesso em: 19 jan. 2023.

FELDMANN, Markus. *et al.* **Guidance for European structural design of glass components-support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes**. Report EUR 26439, Joint Research Centre. Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2014. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/266690283\\_JRC\\_scientific\\_and\\_policy\\_reports\\_-\\_Guidance\\_for\\_European\\_Structural\\_Design\\_of\\_Glass\\_Components\\_-\\_Support\\_to\\_the\\_implementation\\_harmonization\\_and\\_further\\_development\\_of\\_the\\_Eurocodes#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/266690283_JRC_scientific_and_policy_reports_-_Guidance_for_European_Structural_Design_of_Glass_Components_-_Support_to_the_implementation_harmonization_and_further_development_of_the_Eurocodes#fullTextFileContent). Acesso em: 19 jan. 2023.

FELICÍSSIMO, Adriana. **Lâmpadas halógenas**. Lume Arquitetura, v. 4, p. 40-46, 2003.

FOKIN, Vladimir M.. *et al.* **Homogeneous crystal nucleation in silicate glasses: A 40 years perspective**. Journal of Non-Crystalline Solids. Vol. 352. n. 26-27. p. 2681-2714. 2006. Disponível em: Homogeneous crystal nucleation in silicate glasses: A 40 years perspective - ScienceDirect. Acesso em: 19 jan. 2023.

FOLETTTO, Edson Luiz. *et al.* **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. Química Nova. Vol. 28. n. 6. p. 1055-1060. 2005. Disponível em: SciELO - Brasil - Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. Acesso em: 19 jan. 2023.

FORNARO, A. **“Chuva Ácida em São Paulo: Caracterização Química de Amostras Integradas e Sequenciais de Deposição Úmida”**. Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Química, 1991.

GONÇALVES, Jaderson. *et al.* **Production of Transparent Soda-Lime Glass from Rice Husk Containing Iron and Manganese Impurities**. Ceramics. Vol. 3. n. 4. p. 494-506. 2016. Disponível em: Ceramics | Free Full-Text | Production of Transparent Soda-Lime Glass from Rice Husk Containing Iron and Manganese Impurities (mdpi.com). Acesso em: 19 jan. 2023.

HALDIMANN, Matthias; LUIBLE, Andreas; OVEREND, Mauro. **Structural use of glass**. Iabse Structural Engineering Document. 213 p. 2007.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola- Produção por ano da safra e produto (Toneladas)**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html?=&t=destaques>. Acesso em: 19 jan. 2023.

Jang HK, Chung YD, Whangbo, SW, Lyo IW, Whang CN, Lee SJ, Lee S. **Effects of chemical etching with hydrochloric acid on a glass surface**. Journal of Vacuum Science & Technology A. 2000;18:2563-2567.

K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel. **Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete**. Construction and Building Materials. Volume 22. Issue 8. 2008. Pages 1675-1683. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>. Acesso em: 19 jan. 2023.

KURKJIAN, Charles R.; PRINDLE, William R. **Perspectives on the history of glass composition**. Journal of the American Ceramic Society. Vol. 81. n. 4. p. 795-813. 1998. Disponível em: [https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02415.x?casa\\_token=yZ3US9R-zTUA AAAA:w05uGkv9nybhpcbQ2fDMGyZk7LKUcgZINYOPJ3O6WfTi-vjQx\\_0OMYXN4SEZByYHC5ZqF\\_JvcZyHWVs99Q](https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02415.x?casa_token=yZ3US9R-zTUA AAAA:w05uGkv9nybhpcbQ2fDMGyZk7LKUcgZINYOPJ3O6WfTi-vjQx_0OMYXN4SEZByYHC5ZqF_JvcZyHWVs99Q). Acesso em: 19 jan. 2023.

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo - SP. Editora Blucher, 1991.

MARTINS, G. B. C.; SUCUPIRA, R. R.; SUAREZ, P. A. Z. **Chemistry and Colors**. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 4, p. 1508–1534, 2015.

MARTINS, João Guerra; PINTO Emanuel Lopes. **Materiais de Construção I - O vidro: Série Materiais**. 1. ed. 121 p. 2004.

MILLER, G. T. **Living in the Environment: An Introduction to Environmental Science**. 6th edition ed. Belmont, Calif: Brooks/Cole, 1990.

MONTANO, Paulo Fernandes; BASTOS, Hugo Bertha. **A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas**. BNDES Setorial. Rio de Janeiro. n. 38. p. 265-290. set. 2013. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4801>. Acesso em: 19 jan. 2023.

PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de engenharia, microestrutura e propriedades**. Curitiba - PR. Hemus Livraria, Distribuidora e Editora S.A. 342 p. 2000.

PEDUZZI, Pascal. **Sand, rarer than one thinks**. Environmental development. Vol. 11. p. 208-218. 2004. Disponível em: Sand, rarer than one thinks | Archive ouverte UNIGE. Acesso em: 19 jan. 2023.

PILKINGTON, Lionel Alexander Bethune. **Review lecture: the float glass process.** Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, v. 314, n. 1516, p. 1-25, 1969. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1969.0212>. Acesso em: 19 jan. 2023.

PODE, Ramchandra. **Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 53. p. 1468-1485. 2016. Disponível em: Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant - ScienceDirect. Acesso em: 19 jan. 2023.

POTTER, Merle C.; SCOTT, Elaine P. **Ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão de calor.** São Paulo, SP: Thomson, 2007. 772 p. ISBN 8522104905.

ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da; COSENZA, José Paulo; BARROSO, Deise Vilela. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil.** BNDES Setorial, n. 26, p.[101]-137, set. 2007., 2007. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2666>. Acesso em: 19 jan. 2023.

**Safra 2020/2021 de arroz chega ao fim com produtividade recorde no RS.** Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/safra-2020-2021-chega-ao-fim-com-produtividade-recorde-no-rs>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

SAINTIVE, Nilton Soler; BRUNI, Rafael. **Vidros. Publicado em: Materiais de construção.** 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1994. 2 v. ISBN 9788521610038 (v. 2).

SANTOS, Wiliam J. **Caracterização de vidros planos transparentes comerciais.** Scientia Plena, [S. l.], v. 5, n. 2, 2011. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/625>. Acesso em: 19 jan. 2023.

SCHITTICH, Christian et al. **Glass construction manual.** Birkhauser. 2007. 352 p. ISBN 783764382902.

SICHERI; CARAM; DOS SANTOS. **Vidros na Construção Civil. Publicado em: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 1. ed. São Paulo, SP: Ibracon, 2007. 2 v. ISBN 9788598576183 v.1.

SK S. Hossain, Lakshya Mathur & P.K. Roy. **Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review.** Journal of Asian Ceramic Societies, 2018, p. 6:4,299-313. Disponível em: Full article: Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review (tandfonline.com). Acesso em: 19 jan. 2023.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais.** 5. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2012. 707 p. ISBN 9788580551143.

SMITH, N. J.; PANTANO, C. G. **Leached Layer Formation on Float Glass Surfaces in the Presence of Acid Interleave Coatings.** Journal of the American Ceramic Society, v. 91, n. 3, p. 736-744, 11 dez. 2007.

TANAKA, Hugo Shigueo. **Lei de Fourier**. Todo Estudo. Disponível em: <https://www.todoestudo.com.br/fisica/lei-de-fourier>. Acesso em: 25 de Novembro de 2023.

United Nations Environment Programme. **Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis**. 2022. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/38362>. Acesso em: 19 jan. 2023.

United Nations Environment Programme. **Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources**. 2019. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>. Acesso em: 19 jan. 2023.

United Nations, The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals: An opportunity for Latin America and the Caribbean (LC/G.2681-P/Rev.3), Santiago, 2018. Disponível em: [https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/2030\\_agenda\\_and\\_the\\_sdgs\\_an\\_opportunity\\_for\\_latin\\_america\\_and\\_the\\_caribbean.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/2030_agenda_and_the_sdgs_an_opportunity_for_latin_america_and_the_caribbean.pdf). Acesso em: 19 jan. 2023.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciências dos materiais**. São Paulo-SP. Editora Edgard Blucher. 2000.

VARSHNEYA, Arun K. **Fundamentals of inorganic glasses**. Academic Press. 571p. 1994.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. Simplissimo Livros Ltda. 2016. Disponível em: [https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro\\_Manual\\_Tecnico-do-Vidro\\_Plano\\_Edificacoes.pdf](https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2019/01/Abividro_Manual_Tecnico-do-Vidro_Plano_Edificacoes.pdf). Acesso em: 19 jan. 2023.

WURM, Jan. **Glass structures: design and construction of self-supporting skins**. Walter de Gruyter. 2007.