UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – CAMPUS ALEGRETE
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

MATHEUS RAMALHO CHIM

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E APLICABILIDADE COMERCIAL DE VIDRO PRODUZIDO A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO SUBSTITUTO À SÍLICA DE MINÉRIO

ALEGRETE
2024

MATHEUS RAMALHO CHIM

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E APLICABILIDADE COMERCIAL DE VIDRO PRODUZIDO A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO SUBSTITUTO À SÍLICA DE MINÉRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia - PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Profª. Drª. Chiara Valsecchi

Alegrete
2024

MATHEUS RAMALHO CHIM

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO E APLICABILIDADE COMERCIAL DE VIDRO PRODUZIDO A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO SUBSTITUTO À SÍLICA DE MINÉRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia - PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 14/01/2025

Banca examinadora:

_____

Profª Drª. Chiara Valsecchi
Orientadora
(Unipampa)

_____

Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes
(Unipampa)

_____

Prof. Dr. Silvio Buchner
(UFRGS)

Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/01/2025, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **Silvio Buchner**, **Usuário Externo**, em 15/01/2025, às 08:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/01/2025, às 15:59, 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, informando o código verificador **1642927** e o código CRC **D3ECE3F6**.

Agradecimentos

Durante muito tempo, pensei em deixar esta seção em branco, acreditando que aqueles que me ajudaram saberiam o quanto sou grato. Contudo, percebi que é importante registrar aqui os nomes de todos que estiveram ao meu lado durante este período tão significativo.

Dedico primeiramente ao meu avô, Osmar Corrêa Ramalho, a quem sempre recordarei como o pai que moldou o homem que sou hoje.

À minha noiva, Kássia Martins Machado, médica veterinária, que esteve ao meu lado em cada passo dessa jornada. Nada disso seria possível sem o teu apoio e companheirismo.

À minha mãe, Leandra Rodrigues Ramalho, que sempre me colocou em primeiro lugar, e ao meu pai, Wilson José Rodrigues Chim, e Andreia Victória das Neves, que, mesmo à distância, nunca deixaram de estar comigo.

À minha família do Alegrete, que me deram força para superar os desafios: João Victor Cardoso e Aline Castro. À Paola Lira, que contagia com alegria qualquer ambiente. À Félix Vietta, que sempre será um irmão para mim e junto ao Ivan Mangini, transformaram minhas dificuldades em suas prioridades.

Aos colegas do GOMNDI, Patrícia Lira e Ingrid Teixeira, pela parceria e pelo apoio constante. Aos laboratoristas, Clarissa, Dieison, Milene, Felipe e Rafaela que sempre estavam prontos para contribuir.

Agradeço também à banca avaliadora deste trabalho: ao Dr. Silvio Buchner e ao Dr. Jacson Weber de Menezes, meu conterrâneo e amigo. Em especial, à Dra. Chiara Valsecchi, que sempre confiou em mim e, mesmo estando do outro lado do mundo, nunca deixou de me dar direção e orientação.

RESUMO

O vidro é amplamente utilizado em diversas atividades humanas, e as técnicas de sua produção evoluíram ao longo dos anos, assim como suas aplicações, que variam desde a construção civil até as embalagens. O vidro é produzido a partir de areia de quartzo, cuja extração provoca impactos ambientais significativos. Alternativas que utilizam materiais ricos em sílica, como a cinza da casca do arroz, têm sido empregadas com o objetivo de substituir a areia, reduzindo os impactos ecológicos e aproveitando um resíduo abundante. Neste estudo, foram produzidas amostras de vidro borossilicato utilizando cinza da casca do arroz (CCA) e quartzo como fontes de sílica, com a seguinte composição: 70% de SiO_2, 13% de Na_2O, 7% de CaO e 10% de B_2O_3. Para fins comparativos, também foi utilizado o vidro plano comercial. As amostras foram fabricadas a 1500°C e submetidas a testes normativos para avaliar suas propriedades. As análises foram realizadas de acordo com as normas brasileiras aplicáveis a vidros utilizados em embalagens, produtos farmacêuticos, construção civil e sinalização viária. Para caracterizar as amostras, foram realizadas análises de Fluorescência de Raios X (FRX) e Difração de Raios X (DRX), além de microscopia eletrônica de varredura (MEV), conforme as normas técnicas brasileiras. As propriedades avaliadas incluíram densidade, microdureza, resistência ao choque térmico, absorção de água e resistência ao ataque ácido. Também foram realizados testes ópticos por meio de espectroscopia UV-VIS e análise de condutividade térmica. Os resultados mostraram que os vidros produzidos com diferentes fontes de sílica possuem propriedades comparáveis às dos vidros comerciais, apresentando estrutura amorfa e transparência no visível. A densidade das amostras produzida condiz com os parâmetros normativos, assim como a resistência ao choque térmico, ataque ácido e absorção de água. Além disso, os três tipos de vidro apresentaram comportamento térmico equivalente, e a análise da acidez do azeite mostrou que o vidro com CCA preserva a qualidade do alimento de maneira semelhante ao vidro comercial. Portanto, a utilização de CCA na produção de vidros é comercialmente viável, oferecendo uma alternativa ecológica à utilização de areia e contribuindo para a sustentabilidade da indústria vidreira.

Palavras-chave: Sustentabilidade, economia circular, descarte agrícola.

ABSTRACT

Glass is widely used in various human activities, and the techniques for its production have evolved over the years, as have its applications, which range from civil construction to packaging. Glass is produced from quartz sand, the extraction of which causes significant environmental impacts. Alternatives using silica-rich materials, such as rice husk ash (RHA), have been employed with the aim of replacing sand, reducing ecological impacts and making use of an abundant waste product. In this study, borosilicate glass samples were produced using RHA and quartz as silica sources, with the following composition: 70% SiO_2, 13% Na_2O, 7% CaO, and 10% B_2O_3. For comparative purposes, commercial flat glass was also used. The samples were fabricated at 1500°C and subjected to normative tests to evaluate their properties. The analyses were carried out in accordance with Brazilian standards applicable to glasses used in packaging, pharmaceuticals, civil construction, and road signage. To characterize the samples, analyses of X-ray fluorescence (XRF) and X-ray diffraction (XRD) were performed, along with scanning electron microscopy (SEM), following Brazilian technical standards. The properties evaluated included density, microhardness, thermal shock resistance, water absorption, and acid resistance. Optical tests were also conducted using UV-VIS spectroscopy and thermal conductivity analysis. The results showed that glasses produced with different silica sources exhibit properties comparable to those of commercial glasses, presenting an amorphous structure and transparency in the visible spectrum. The density of the produced samples met the normative parameters, as did their thermal shock resistance, acid resistance, and water absorption. Furthermore, all three types of glass exhibited equivalent thermal behavior, and the analysis of olive oil acidity demonstrated that RHA-based glass preserves food quality similarly to commercial glass.Therefore, the use of RHA in glass production is commercially viable, offering an ecological alternative to the use of sand and contributing to the sustainability of the glass industry.

Keywords: Sustainability, circular economy, agricultural disposal.

Lista de Figuras

Figura 1- Objetivos de desenvolvimento sustentável da agenda 2030 da ONU.....16
Figura 2- Estimativa da safra de arroz 2024/2025.....20
Figura 3- Rede vítrea da sílica (SiO_4) – a) estrutura cristalina; b) rede vítrea.....22
Figura 4- Diferentes utilizações para o vidro. A) Vidros Sodo-Cálcico, plano utilizado em janela B) Vidros Sodo-Cálcico coloridos em garrafas C) Vidros Borossilicatos próprios para uso em laboratório D) Sílica-vítrea utilizado em fibra óptica.....25
Figura 5- Interação da radiação incidindo na superfície do vidro.....33
Figura 6- Evolução do comércio exterior de embalagens de vidro, em mil toneladas, Brasil.....34
Figura 7- Preço médio em reais dos materiais por kg em 2017 e 2018.....36
Figura 8- Produção de derivados de uva no Rio Grande do Sul de 2015 a 2019.....37
Figura 9- Zoneamento agroclimático da cultura da oliveira no Rio Grande do Sul.....38
Figura 10- Produção de azeites no Rio Grande do Sul de 2010 a 2022.....39
Figura 11- a) Pesagem dos reagentes. b) processo de homogeneização.....40
Figura 12- a) Cadinho de ouro/platina. b) vidro em 1500°C sendo vertido.....41
Figura 13- Vidro comercial plano.....42
Figura 14- a) Proveta ao lado da amostra. b) Amostra inserida na proveta.....44
Figura 15- a) Setup para a avaliação das microbolhas. b) Exemplo de microbolha em amostra de vidro.....45
Figura 16- a) Espectrofotômetro de UV-VIS. b) Amostra acoplada ao equipamento.....46
Figura 17- a) Microdurômetro. b) Exemplo de indentação na amostra de vidro.....46
Figura 18- a) Processo de elevação da temperatura das amostras. b) Amostra submetida (abaixo) e amostra controle (em cima) não submetida ao teste.....47
Figura 19- a) Teste de adsorção em água destilada. b) Phmetro portátil digital.....48
Figura 20- Amostras submetidas ao ensaio de ataque ácido.....49
Figura 21- Caixa de isopor adaptada para realização do teste.....50
Figura 22- a) Amostras depositadas nos béqueres. b) modo de armazenamento até a próxima medida. c) Coloração da solução antes do teste (esquerda) e após o teste (direita) apresentando coloração rósea.....52
Figura 23- Difratograma da CCA e areia mineral utilizadas como fontes de sílica.....54
Figura 24- Imagens dos vidros produzidos: A) com CCA e B) com quartzo como fonte se sílica.....55

Figura 25- Difratograma dos vidros produzidos e do vidro plano comercial.....56
Figura 26- Micrografia dos vidros produzidos: A) CCA B) Vidro plano e C) Quartzo. Escala: 10 **μ**m.....57
Figura 27 – Variação da transmitância das amostras de vidros da cinza da casca de arroz, de quartzo como fonte de sílica e vidro plano comercial.....58
Figura 28- Vidro de Quartzo (A e B), vidro de Cinza da casca do arroz (C e D) e Vidro comercial plano (E e D) antes e após o teste de choque térmico.....62
Figura 29- Vidro feito em 1200°C com cinza da casca do arroz como fonte de sílica submetida ao teste de choque térmico a) antes do teste b) após o teste.....64
Figura 30 – Variação pH de cada vidro.....66
Figura 31- Vidro de Quartzo (A e B), Vidro comercial plano (C e D) e vidro de Cinza da casca do arroz (E e D) antes e após o teste de choque térmico.....66
Figura 32- Vidro de Quartzo a) antes do teste b) após o ataque ácido. Vidro de Cinza da casca do arroz c) antes do teste d) após o ataque ácido. Vidro comercial plano e) antes do teste f) após o ataque ácido.....69
Figura 33- Vidro produzido a 1200°C com CCA como fonte de sílica c) antes e d) depois o ataque ácido.....70
Figura 34 – Cinza vs Quartzo.....71
Figura 35 – CCA vs Plano.....71
Figura 36 – Quartzo vs Plano.....71

Lista de Tabelas

Tabela 1- Porcentagem comum de componentes para diferentes tipos de vidro.....28
Tabela 2- Composição das fontes de sílica por fluorescência de raios-X……...53
Tabela 3- Composição dos vidros produzidos e o vidro plano comercial……...55
Tabela 4 – Tabela das médias de deslocamento e massa das amostras…….…..….58
Tabela 5 – Tabela das densidades das amostras……...59
Tabela 6 - Densidade de microbolhas dos vidros produzidos……..60
Tabela 7 – Variação de microdureza para cada vidro em vickers (HV).....61
Tabela 8 – Variação de massa e pH de cada vidro……...65
Tabela 9 – Variação de massa de cada tipo de vidro……68
Tabela 10 – Fluxo de calor (ϕ) e condutividade térmica (k) dos vidros……..72
Tabela 11 – Variação de pH de cada tipo de vidro em 3 e 7 dias após o início do teste..73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivos 15
1.2 Objetivo geral 15
1.3 Objetivos específicos 15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
2.1 Considerações sobre impactos no meio ambiente 16
2.1.1 Sustentabilidade e meio ambiente 16
2.1.2 Extração de areia e meio ambiente 17
2.1.3 Resíduo agrícola: a cinza da casca de arroz 19
2.2 O material vidro: classificações, funcionalidades e propriedades 22
2.2.1 O Vidro 22
2.2.2 Materiais que constituem o vidro e funcionalidades 24
2.3 Propriedades do material vidro 28
2.3.1 Propriedades térmicas 28
2.3.2 Propriedades mecânicas 29
2.3.3 Propriedades químicas 30
2.3.4 Propriedades físicas 31
2.4 Contexto regional e aplicabilidade comercial 33
2.4.1 O mercado de recipientes de vidro 33
2.4.2 Reciclagem de vidro no Brasil 35
2.4.3 Potenciais consumidores de recipientes de vidro na Fronteira Oeste (RS) 36
3 MATERIAIS E MÉTODOS 40
3.1 Processo de produção das amostras 40
3.1.1 Vidro Comercial 42
3.2 Testes e ensaios de caracterização das amostras. 42
3.2.1 Caracterização das amostras produzidas 43
3.2.2 Densidade e densidade de microbolhas 44
3.2.3 UV-VIS 45
3.2.4 Microdureza 46
3.2.5 Choque térmico 47
3.2.6 Adsorção de água 48
3.2.7 Ataque ácido 48
3.2.8 Condutividade Térmica 49
3.2.9 Determinação de acidez do azeite de oliva 51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 53
4.1 Caracterização dos Materiais e Amostras Produzidas 53
4.1.1 Caracterização das Fontes de Sílica 53
4.2 Caracterização dos Vidros Produzidos 54
4.3 Análises das propriedades dos vidros produzidos 57
4.3.1 Transmissão Óptica 57
4.3.2 Densidade 58
4.3.3 Densidade de microbolhas 60
4.3.4 Microdureza 60
4.3.5 Resistência ao Choque térmico 62
4.3.6 Resistência a Adsorção de água 64

4.3.7 Resistência ao Ataque ácido 67
4.3.8 Estudo lab-made para condutividade térmica 70
4.3.9 Determinação de acidez de Azeite de oliva 73
5 CONCLUSÕES 75
5.1 Perspectivas futuras 75
Referências Bibliográficas: 76

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Em quase todas as atividades humanas, como ciência, indústria e arte, é possível encontrar a utilização de um material bem característico: o vidro. A utilização desse material antecede o ano de 1500 A.C quando era utilizado como adorno; a partir de 300 A.C, através da nova técnica de sopro, foram formados os primeiros recipientes (AKERMAN, 2000). Conforme o desenvolvimento científico e tecnológico, a composição e o método de fabricação deste material foi se aprimorando, possibilitando a expansão do seu uso ao longo dos anos, como em aplicações na construção civil, em fachadas e aberturas de edificações (CARTER; NORTON, 2007), e no mercado de embalagens. Neste setor, sua grande difusão comercial deriva de sua capacidade ímpar de corresponder a duas características essenciais das embalagens modernas: a proteção do produto, pois não há necessidade da utilização de aditivos, e a possibilidade de reuso/reciclagem (AKERMAN, 2000).

A produção do vidro utiliza como matéria prima areia de quartzo, do qual o Brasil, atualmente, possui grandes reservas. Contudo, mundialmente a extração desse material é extremamente prejudicial ao meio ambiente, causando degradação do mesmo: as atividades desenfreadas afetam significativamente a qualidade dos corpos d'água, a saúde dos ecossistemas associados e a segurança das barragens adjacentes (DUAN, 2019; MAIA et al., 2017).

Por outro lado, existem materiais que podem substituir a areia (quartzo) como fonte de sílica na produção de vidro, como cinza da casca do arroz, capaz de conter 97,37% de dióxido de Silício (COSTA et al., 2018; WAHAB et al., 2020). A sílica oriunda da indústria arrozeira é um material abundante, e atualmente, um descarte sem fins comerciais, se tornando assim um peso econômico para indústria, além de um outro problema ambiental. Segundo o Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em 2021 a safra produziu, somente no estado do Rio Grande do Sul, 7.708.229 toneladas do cereal, 20% desse peso representa a casca, conhecida por possuir uma grande quantidade de sílica amorfa, obtida em suas cinzas após sua combustão (Lima et al., 2019).

Segundo Bondioli et al. (2009), a utilização da sílica proveniente da cinza da casca do arroz permite a fabricação de vidros com as mesmas características dos vidros industriais em capacidade de fusão, viscosidade e colorabilidade. Gonçalves et al. (2020) demonstraram a viabilidade deste processo, embora a temperaturas inferiores às

comerciais, e alguns parâmetros importantes de fabricação, como a adição de reagentes para conferir diferentes características associadas à resíduo da indústria do arroz (GONÇALVES et al., 2020; WAHAB et al., 2020).

A cinza da casca de arroz também foi usada como matéria-prima na produção de vidros e materiais vítreos (GONÇALVES et al., 2020; PASE NETO, 2020; HOSSAIN, 2018), substituindo a sílica de quartzo. Enquanto Gonçalves et al. abordaram a transparência e o aspecto incolor do vidro feito com RHA, seja com tratamento ácido ou adição de elementos descolorantes como óxido de antimônio, as propriedades mecânicas e térmicas não foram analisadas. Resultados promissores também foram obtidos pela substituição de areia mineral por cinza de casca de arroz para produzir microesferas de vidro para sinalização rodoviária (PASE NETO, 2023), mas novamente, nenhuma propriedade física ou mecânica foi relatada, como no trabalho de Ravangvong, onde foi promovida a ideia de emulações de pedras preciosas a partir de vidro colorido de cinza de casca de arroz (RAVANGYONG, 2022). Além disso, outros estudos anteriores tem demonstrado a viabilidade de produzir vidros de soda-cálcio ou borossilicato usando apenas RHA como fonte de sílica para aplicações específicas, como vidro absorvente de calor dopado com Pb (BERKIN, 2008), vidro fotoluminescente (LEE 2013), vidro dopado com zinco para aplicações optoeletrônicas (LEE 2017) e com adições de cascas de ostras/ovos (MAIA, 2017); no entanto, todos os itens acima foram produzidos para aplicações específicas, assim, um estudo sistemático sobre as propriedades deste material para uso comercial em larga escala como recipiente de vidro não foi encontrado na literatura.

Com isso, o objetivo deste trabalho é produzir vidros em que houve substituição da areia de minério pela cinza da casca de arroz, nas mesmas condições de produção de vidro borossilicato comercial com temperatura de 1500ºC, avaliar as suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e óticas. Para a realização dos testes foram utilizadas como base normas brasileiras de certificação de materiais vítreos para diferentes aplicações. A utilização dessa alternativa em grande escala, poderá ser capaz de reduzir o impacto ambiental causado pela extração de areia, além de destinar o resíduo da indústria orizícola, possibilitando a criação de opções sustentáveis na escolha da matéria prima utilizada na indústria vidreira.

1.1 Objetivos

1.2 Objetivo geral

Fabricar, caracterizar e estudar as propriedades mecânicas, químicas, térmicas e físicas do vidro produzido com cinza da casca do arroz como fonte de sílica, de acordo com as normas brasileiras existentes, e comparar o desempenho com vidro produzido com areia de minério e vidro plano comercial não temperado.

1.3 Objetivos específicos

- Produzir vidro a 1500 °C usando como fonte de sílica a cinza da casca de arroz
- Produzir vidro a 1500 °C usando como fonte de sílica areia de minério
- Caracterizar a homogeneidade do vidro produzido por DRX, MEV;
- Avaliar as propriedades físicas (densidade, microbolhas, índice de refração, transmitância UV-Vis) dos vidros de cinza da casca do arroz (CCA), de areia de minério (AM) e vidro comercial plano (VC).
- Avaliar a dureza dos vidros de cinza da casca do arroz (CCA), de areia de minério (AM) e vidro comercial plano (VC);
- Avaliar a resistência química dos vidros de cinza da casca do arroz (CCA), de areia de minério (AM) e vidro comercial plano (VC), por ensaio de absorção de água e ataque ácido;
- Avaliar a resistência ao choque térmico dos vidros de cinza da casca do arroz (CCA), de areia de minério (AM) e vidro comercial plano (VC);
- Avaliar o desempenho em termos de condução de calor dos vidros de cinza da casca do arroz (CCA), de areia de minério (AM) e vidro comercial plano (VC).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações sobre impactos no meio ambiente

Nesta sessão serão abordados os conceitos gerais relacionados com sustentabilidade e preservação do meio ambiente, os impulsos para criação de processos produtivos mais sustentáveis, e alguns tópicos mais específicos que se relacionam com as matérias primas utilizadas na produção de vidros.

2.1.1 Sustentabilidade e meio ambiente

O conceito de sustentabilidade vem ganhando visibilidade e importância nos últimos anos, tanto que governos (reuniões COP dos últimos anos), acionistas de empresas e os próprios consumidores buscam alternativas para que possam colaborar com o meio ambiente. Particularmente, empresas que não se adequam ao desenvolvimento sustentável são rejeitadas pelos seus consumidores, tornando cada vez mais necessário superar este desafio (Borges Júnior, 2023).

No contexto mundial, como uma forma de contribuir para a sustentabilidade e proteção do meio ambiente, a Organização das Nações Unidas (ONU) formulou uma agenda com 17 metas a serem alcançadas até o ano de 2030 (Figura 1) (ONU, 2018).

Figura 1- Objetivos de desenvolvimento sustentável da agenda 2030 da ONU.

Fonte: ONU, 2022.

A utilização de descartes industriais como matéria prima de novos produtos se enquadra no conceito de economia circular, assim como se atém aos objetivos da ONU.

Particularmente, o uso do resíduo agrícola, cinza de casca de arroz para produção vidro em substituição a areia mineral descrito neste trabalho se alinha com seis dos itens da agenda de 2030 da ONU (2018):

- **Objetivo 15 - Vida Terrestre:** Reduzir a pressão sobre ecossistemas terrestres causados pela mineração da areia.
- **Objetivo 14 - Vida na Água:** A extração da areia causa impactos diretos nos ecossistemas aquáticos, como assoreamento de rios e desvio dos seus percursos; a substituição desse material por outro mais sustentável causaria impacto positivo na vida marinha.
- **Objetivo 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima:** A produção de vidro com cinza da casca do arroz se torna mais sustentável pois reduz as emissões de carbono associadas à mineração de areia.
- **Objetivo 12 - Consumo e Produção Sustentável:** Contribui com a promoção de uma fonte de sílica alternativa e sustentável, dentro do contexto de economia circular.
- **Objetivo 09 - Indústria, Inovação e Infraestrutura:** Promove inovação na indústria vidreira, tornando mais sustentável e alinhada às práticas de produção mais limpas.
- **Objetivo 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis:** promove a remoção de um descarte agrícola que pode criar danos à comunidade, além de promover o conhecimento de alternativas de produção sustentável.

Neste contexto, nos últimos anos, a UNEP também tem se dedicado a abordar a questão da sustentabilidade no contexto da extração de areia mineral. O comércio indica tendências de aumento constante na demanda, principalmente no mercado do vidro ou da construção civil: segundo dados da UNEP (2019), o consumo anual médio de areia aproximou-se das 50 bilhões de toneladas. Essa elevada demanda está causando uma rápida exaustão dos recursos disponíveis, superando em velocidade a capacidade de formação de novas fontes de areia, causando preocupação.

2.1.2 Extração de areia e meio ambiente

A areia é um recurso amplamente utilizado em diversos setores, principalmente na construção civil e na produção de recipientes de vidro, além de servir como matéria-prima

para a fabricação de produtos eletrônicos, moldes para fundição, produtos cerâmicos, carga mineral em tintas e plásticos, fabricação de ácidos e fertilizantes na indústria química, dentre outros, apesar de suas aplicabilidades, para cada uma de suas funções deve conter especificação granulométrica e química bem definida, sendo que a areia de deserto não respeita essas condições (SCHANDL et al., 2016; HACKNEY et al., 2020). Como relata um estudo de caso da Universidade da British Columbia (Vancouver, Canadá), países em desenvolvimento com altas taxas de urbanização como os Emirados Árabes, cujo território é predominantemente desértico, precisam importar areia da Austrália para a construção civil devido à baixa granulometria e a presença de sais (cloreto de sódio principalmente) na areia da região (SCHANDL et al., 2016; UBC, 2018). Sua aplicação generalizada resulta assim em uma demanda massiva, tornando-a o recurso mais extraído globalmente e, em termos de volume, o segundo material mais consumido, perdendo apenas para a água (UNEP, 2022).

A areia mais utilizada é extraída de rios, cuja extração é realizada por dragas de sucção posicionadas em balsas que retiram o material de depósitos que se formam nos leitos; também pode ser obtida por depósitos aluvionares em fundo de vales, sendo extraída de forma mecânicas através da escavação. De forma menor, a areia pode ser também obtida através do processo de classificação de britas e por escória, uma técnica que produz areia diferente proveniente de rochas, sendo composta de SiO_2, $Al2O_3$, CaO e MgO. Por fim, em baixa quantidade, a areia pode ser extraída de praias e dunas próximas ao litoral: contudo, no Brasil a quantidade de cloreto de sódio presente no material e sua granulometria impedem que sejam utilizadas na construção civil (GASQUES, 2014). A principal vantagem da utilização de areia provenientes de rios está em poder dispensar a necessidade de tratamento, como adição ou eliminação de componentes ou de substâncias químicas. Devido ao processo de lixiviação natural constante, o material não irá apresentar componentes indesejáveis de forma significativa. Este processo também pode ser feito em instalações industriais, sendo praticado com lixiviação a quente com ácido sulfúrico, para eliminar a cobertura ferrosa das partículas individuais (VIEIRA; REZENDE, 2015; BGS, 2004).

Para extração da areia é necessário haver o processo de licenciamento ambiental, composto de determinadas leis e definições. No entanto, atividades de exploração sem licenciamento ocorrem em áreas protegidas com índices preocupantes, agravando impactos ambientais de forma descontrolada, causando degradação de ambientes que possuem um delicado equilíbrio ecológico, alterando canais naturais de rios além de

aspectos paisagísticos (VIEIRA; REZENDE, 2015). As atividades de mineração de areia afetam assim significativamente a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas (DUAN, 2019). Seus impactos podem acontecer de forma direta e indireta. A forma direta se dá quando a extração do material é responsável pelos impactos físicos no ecossistema, por remoção de várzea, de leitos de cascalho e por mudanças físicas no sistema fluvial. Os impactos indiretos são relacionados com as mudanças no ecossistema, como a hidráulica do rio e do balanço de sedimentos, alteração na qualidade da água afetando suas condições físico-químicas, impactando o fluxo de peixes e a disponibilidade de habitats (KOEHNKEN, 2020; SCHUMM, 1979). Além disso, a remoção de corpos de areia em rios e zonas costeiras (erosão) causa diversos problemas, capazes de colocar em risco comunidades e seus meios de subsistência (UNEP, 2019). Apesar da preocupação ambiental 70 países ainda extraem areia de maneira ilegal (KOEHNKEN, 2018).

Assim, à vista das tendências de aumento constante de demanda de areia, dos fortes impactos ambientais negativos que a sua extração causa, além da escassez global prevista para o futuro próximo, o relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) destaca a necessidade imediata de encontrar novas soluções para enfrentar a escassez da areia de forma sustentável (UNEP, 2019).

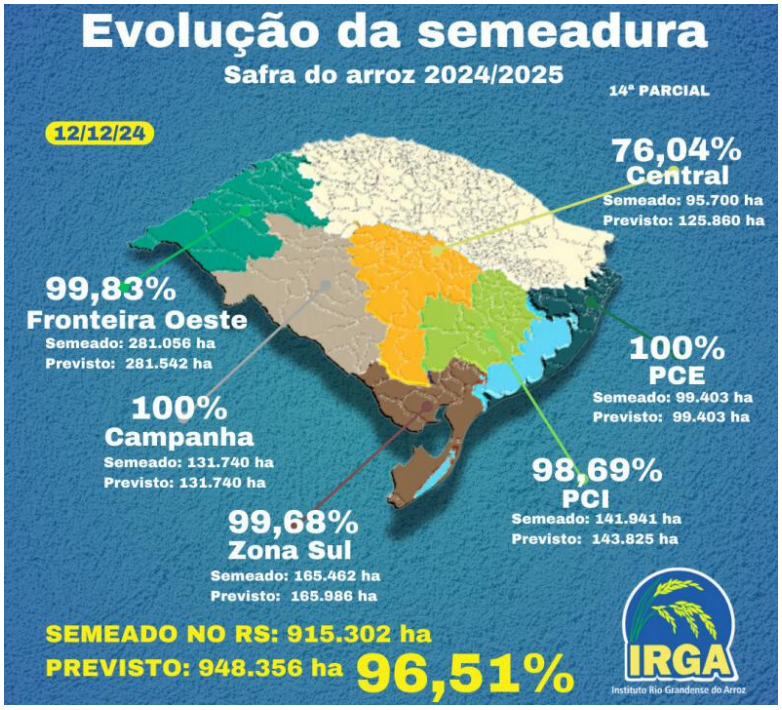
2.1.3 Resíduo agrícola: a cinza da casca de arroz

O arroz é considerado uma *commodity* mundialmente, sendo o principal produto de sustento alimentar dos países em desenvolvimento: América do Sul e Central, Ásia e África (FAO, 2021). Em 2021, a produção mundial de arroz foi de 787,3 milhões de toneladas (FAO, 2021); somente no Rio Grande do Sul, Brasil, no mesmo ano foram produzidas 7.708.229 toneladas do cereal (Figura 2) (IRGA, 2021), sendo que 20% desse valor é constituído pela casca (LIMA et al., 2019). A casca de arroz é um resíduo sem finalidades comerciais, que precisa ser estocado pelas indústrias produtoras em lotes definidos por controle e legislação ambiental. Arrozeiros de agricultura familiar, muitas vezes, acabam queimando a casca de arroz sem qualquer controle, provocando as emissões de VOCs (compostos orgânicos voláteis), gases poluentes e causadores de efeito estufa (SO2, CO, NO2) e particulados microscópicos (PM10) que promovem riscos para a saúde humana, apresentando até relações de ligação com diabetes tipo II (MATIN et al., 2023; NJOKU et al., 2021).

Recentemente, a cinza da casca de arroz tem sido utilizada como combustível para geração de energia elétrica, através de um processo mais controlado dentro da indústria

orizícola, assim como produção de energia por termelétricas em geral (COLTRO et al., 2017). Através deste processo vem-se a gerar um segundo resíduo, a cinza da casca de arroz (CCA). Novamente, sem destino comercial definido, este material precisa ser estocado corretamente para não arrecadar danos ambientais.

Figura 2- Estimativa da safra de arroz 2024/2025.



Fonte: Secretaria da agricultura, pecuária, produção sustentável e irrigação.

A cinza da casca do arroz possui um alto teor de sílica, além de outros componentes químicos como: CaO, K_2O, MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3, SO_3, P_2O_3 podendo variar de acordo com a região de cultivo (SILVA et al., 2020). Seu alto teor de sílica amorfa, que pode ultrapassar 90%, valoriza este subproduto; contudo, somente se a qualidade desta sílica for alta, com alta superfície específica, tamanho e pureza elevada que a mesma poderá possuir alto valor econômico. Sendo assim, seu descarte se torna um possível desperdício de matéria-prima para ramos industriais, tais como a eletrônica, a construção civil, produção de cerâmica, a indústria química, a fabricação de células fotovoltaicas, e produção de vidro, entre outros (FOLETTO et al., 2005). Existem diversos métodos para obter sílica com alto teor de pureza da cinza da casca de arroz, como o sol-gel, lavagem química com ácido ou base fortes antes de combustão controlada, e tratamento térmico-solvente seguido de lixiviação com ácido clorídrico (ABDUL SALIM et al., 2023; CHUNG; KIM, 2023; TAUFIK et al., 2023). Infelizmente, muitos deles utilizam

solventes e reagentes pouco sustentáveis, que por sua vez geram resíduos poluentes para o meio ambiente. Com isso, usos da cinza da casca de arroz em natura, sem processamento químico, foram avaliados, como na agricultura, na construção civil, como aditivo de borracha e na produção de vidro.

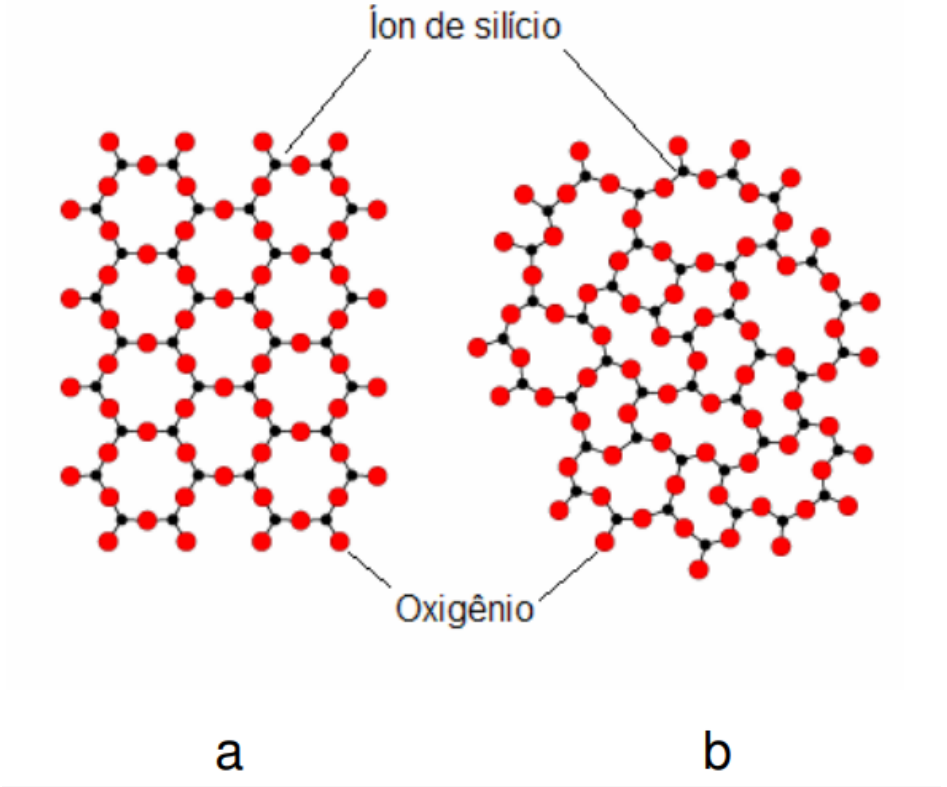
Na agricultura, a principal aplicação da cinza da casca do arroz está na melhoria na aeração do solo, tendo em vista que ela não possui nutriente em quantidade relevante em sua composição (IRGA, 2007). Também pode ser utilizada como corretivo de acidez do solo, embora não possa ser usada sozinha pelo baixo valor de neutralização que ela possui (ISLABÃO et al., 2014). A cinza da casca de arroz pode ser utilizada também em natura na construção civil, como substituição parcial de até 20% cimento, devido às suas propriedades pozolânicas, e melhorando as propriedades de resistência à compressão e diminuindo custos (SANTOS, 2023; HU et al., 2020). No setor das borrachas, historicamente a substituição da sílica pelo negro de fumo na composição dos pneus contribuiu para diminuir a resistência ao rolamento possibilitando redução no consumo de combustível; no entanto a partir da substituição de 25% do material por cinza da casca de arroz foram apresentados benefícios como resistência abrasão e redução a resistência ao rolamento. (FERNANDES et al., 2013). Por fim, uma outra aplicação deste descarte agrícola explorada foi a substituição parcial ou total da areia mineral na produção de materiais cerâmicos, como vidros, vitrocerâmicos e espumas de vidro. Uma das primeiras substituições foi feita por Berkin (2008), o qual conseguiu um vidro de cor acinzentada com capacidade de absorver calor. Bondioli (2009) também evoluiu a ideia, obtendo vidros com diversas semelhanças com o vidro comercial, como capacidade de fusão, viscosidade e colorabilidade. Wahab (2020) utilizou a cinza da casca do arroz associada ao ZnO, que proporcionou aumento da transparência nos vidros. Neste mesmo sentido, Gonçalves et al. (2020) produziram e avaliaram o vidro da cinza da casca de arroz com a adição de óxido de antimônio (Sb_2O_5) para a completa transparência do vidro produzido, independentemente da presença de impurezas de manganês e ferro, óxidos corantes. Resultados positivos também foram obtidos com substituição da areia mineral pela cinza da casca de arroz para produção de microesferas de vidro para sinalização viária (PASE NETO et al., 2023). Por fim, Ravangvong et al. (2022) promoveram a ideia de emulações de pedras preciosas a partir de vidros coloridos da cinza da casca de arroz.

2.2 O material vidro: classificações, funcionalidades e propriedades

2.2.1 O Vidro

O material vidro pode ser produzido por qualquer matéria prima que possa alcançar um estado de estrutura completamente amorfa. Contudo, a maioria dos vidros comerciais são fabricados a partir da sílica (SiO_2), onde o íon silício ocupa o centro de um tetraedro, ligando-se a quatro oxigênios, e cada um desses oxigênios se conecta a outro íon de silício, estabelecendo uma rede estruturada aleatoriamente, como pode ser visto em Figura 3b (MARAN, 2010). A Figura 3a mostra a representação de uma estrutura cristalina possuindo a mesma composição, como a encontrada no quartzo, para comparação.

Figura 3: Rede vítrea da sílica (SiO4) – a) estrutura cristalina; b) rede vítrea.



Fonte: MARAN, 2010.

Os óxidos que formam o vidro podem ser classificados como: formadores de rede, modificadores de rede e intermediários. Os formadores de rede são responsáveis pela criação de uma estrutura tridimensional contínua e altamente conectada. Os modificadores de rede, Na_2O, K_2O, CaO e Li_2O, alteram a estrutura introduzindo descontinuidades, podendo diminuir a temperatura de fusão para valores inferiores a

1600°C. No caso dos modificadores fundente, eless aumentam a resistência química do vidro e sua durabilidade junto aos modificadores estabilizantes. Os óxidos intermediários, não são capazes de formar uma rede vítrea sozinho, mas podem atuar como formadores quando acrescentados a uma matriz já estruturada ou como modificadores ao quebrarem ligações na rede, auxiliando no ponto de fusão do material. Além dessas três categorias principais, há os agentes de refino, acrescentados em pequenos proporções para auxiliar com a remoção de bolhas formadas durante o processo de fusão, e os agentes corantes, responsáveis pela tonalidade do vidro (ASKELAND; PHULÉ, 2008; VOGEL, 1994).

Assim, os principais óxidos formadores que possuem essas características são os óxidos de silício (SiO2), sendo o principal; o óxido de Boro, B_2O_3, e o óxido de fósforo P_2O_5. Os classificados como fundentes são compostos pelos óxidos de metais alcalinos ou alcalino-terrosos, como os óxidos de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O), que auxiliam o vidro a fundir em temperaturas mais baixas. Alojando-se nos vazios da rede vítrea, e rompendo algumas pontes de oxigênio entre átomos de silício da rede, acabam diminuindo a temperatura de fusão do material e aumentando a viscosidade. O grupo de óxidos alcalinos-terrosos contendo óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxido de bário (BaO), é chamado também de óxidos estabilizadores: esses compostos são responsáveis por diminuir a solubilização em água e a formação de cristalizações. Existem outros óxidos que também desempenham a função de estabilizadores como os óxidos de chumbo (PbO) e zinco (ZnO). O óxido de chumbo e de alumínio (Al_2O_3) são também chamados de óxidos intermediários, porque sozinhos não podem formar uma estrutura vítrea, mas reforçam a mesma e conferem propriedades específicas: entre outras, alto brilho (PbO) e maior resistência química (Al_2O_3). O último grupo, os aditivos, é formado por aqueles óxidos que conferem cor ao vidro, através da absorção de frequências na região do visível (400 a 700nm), são eles: óxido de cromo (Cr_2O_3), que confere cor verde; óxido de cobre (CuO) de cor azul; óxido de manganês (MnO), de cor violeta; óxido de ferro (Fe_2O_3) que confere uma coloração esverdeada. O óxido de cádmio (CdO) pode produzir coloração vermelha/amarela devido ao mecanismo sinérgico de absorção-dispersão da luz de agregações coloidais ou microcristalinas. Além disso, o óxido de arsênio e de antimônio podem ser usados como agente descolorantes, através da indução de formação de Fe3+, além de reduzir a viscosidade da matriz vítrea (afinante) e auxiliar na remoção de bolhas no vidro durante a fusão (VOGEL, 1994; FERNANDEZ, 2003; PALOMAR et al., 2019).

Para a formação dos vidros mais utilizados comercialmente é utilizada como fonte de sílica a areia (quartzo); o calcário, como fonte de óxido de cálcio, e de barrilha, como fonte de óxido de sódio. Esses três componentes juntos formam mais de 90% da matéria-prima. Outros componentes podem ser adicionados visando conferir algum atributo específico ao vidro, como durabilidade ou estabilidade, dependendo do tipo de vidro que será produzido, conforme detalhado na seção 2.2.2 (AKERMAN, 2000; SHREVE; BRINK 1977; BGS, 2004).

A areia utilizada na fabricação do vidro deve ser rígidamente controlada, para conter pelo menos 98,5% de sílica, e para não haver a presença de elementos deletérios as propriedades do vidro, como Fe_2O_3 e Cr_2O_3, possíveis corantes, além de outros. Especificamente quanto ao óxido de ferro, existem limites de concentração em massa dependendo do vidro que será fabricado, sendo em torno de 0,08% em vidros planos, 0,1% em fibra de vidro e 0,3% em recipientes coloridos, o principal limitante está em produzir um vidro transparente ou cristal, por sua ação que gera certa tonalidade esverdeada ao produto final (HARBEN; KUZVART, 1996; ZDUNCZYK; LINKOUS, 1994).

2.2.2 Materiais que constituem o vidro e funcionalidades

O vidro é utilizado há mais de 4000 anos, sendo a primeira aplicação industrial da sílica (DAVIS; TEPORDEI, 1985). Os vidros que possuem maior produção no Brasil são principalmente os vidros planos, os mais importantes em volume de produção; em segundo lugar constam os vidros para embalagens, podendo ser transparente ou colorido; por fins, vidros especiais e domésticos, como os vidros temperados encontrados em mobílias. Os vidros também são encontrados em diversas aplicações específicas, como pode ser visto na Figura 4: na fabricação de bulbos de lâmpadas e tubos de luz fluorescentes, telas de televisão e computadores, fibra de vidro para comunicação, entre outros (LINS et al., 2007; BGS, 2004).

Figura 4 - Diferentes tipos de vidros e seus usos. A) Vidros Sodo-Cálcico, plano utilizado em janela B) Vidros Sodo-Cálcico coloridos em garrafas C) Vidros Borossilicatos próprios para uso em laboratório D) Sílica-vítrea utilizado em fibra óptica.

Fonte: Adaptado de Canva.

Para poder obter o melhor desempenho do material vidro em cada finalidade, diferentes formulações e classificações foram estabelecidas, sempre tendo como base os três ingredientes principais: areia (70%), calcário e barrilha (SHREVE; BRINK, 1977; BGS, 2004). Segundo Akerman (2000), as variações dos diferentes tipos de vidro podem ocorrer devido às infinitas formulações existentes para cada função de aplicação, processo de produção e disponibilidade de matéria prima. Esses diferentes tipos de vidro são divididos em famílias, e as principais são:

- Sílica-vítrea: produzida a partir do aquecimento da areia rica em sílica ou cristais de quartzo em uma temperatura superior ao seu ponto de fusão (1725°C). Este processo acontece lentamente, e torna o vidro tão viscoso que as bolhas de ar não conseguem escapar. Contudo, existe uma segunda técnica para sua produção, baseada em um processo de deposição de vapor, onde o tetracloreto de silício reage com o oxigênio em temperaturas acima de 1500°C, formando micropartículas sílica, que se depositadas a

um substrato mantido em temperatura acima de 1800°C acabam se condensando. Devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmico, e assim além da resistência a choques térmicos, a sílica vítrea se torna ideal para janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos. A pureza deste vidro o torna também o material ideal para a produção de fibras ópticas (AKERMAN, 2000).

- Silicatos Alcalinos: Nos vidros dessa família são utilizados modificadores de rede, como óxidos alcalinos, para reduzir a sua viscosidade. Normalmente os óxidos alcalinos são incorporados em composições de vidros como carbonatos, reagindo com a sílica em temperaturas acima de 550°C e se decompondo nos óxidos desejados. A adição de alcalinos reduz a resistência do vidro, inclusive, em altas concentrações torna o vidro solúvel em água. Os silicatos alcalinos, como o *water glass* (silicato de sódio), sustentam a indústria de silicato solúvel, utilizados na produção de adesivos, produtos de limpeza e películas protetoras (AKERMAN, 2000).
- Vidros Sodo-Cálcicos: Conhecidos por serem a família de vidros mais antiga e amplamente utilizada, os vidros sodo-cálcicos possuem na sua composição óxidos afinantes e estabilizantes no lugar dos alcalinos, o qual a função é reduzir a solubilidade dos vidros de silicatos alcalinos e manter a facilidade de fusão, como nitrito de sódio e sulfato de sódio. Na sua composição, utiliza-se o estabilizante óxido de cálcio, muitas vezes concomitante ao de magnésio; sua utilização deve ser balanceada em 8-12% de óxido de cálcio com 12-17% de óxido de sódio. O vidro formado por alto teor de cálcio possui tendência a devitrificar, e em contrapartida, a diminuição do cálcio ou aumento do teor alcalino na composição do vidro sodo-cálcico resulta em baixa durabilidade química. Por isso, pode-se acrescentar de 0,6-2,5% de alumina para incrementar a durabilidade química. Este tipo de vidro faz parte da constituição da maior parte de garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas no mercado (AKERMAN, 2000).
- Vidros Borossilicatos: o próprio óxido de boro é um óxido formador de rede, podendo criar vidro a partir da temperatura de fusão de 460°C. Sua principal diferença está na rede que ao invés de tridimensional, como na sílica vítrea, será composto por uma rede de triângulos boro-oxigênio.

Frequentemente, o óxido de Boro é utilizado em substituição dos óxidos alcalinos em concentrações entre 3 e 15%, aumentando a resistência ao choque térmico do material final. Devido a essa característica, os vidros borosilicatos são utilizados em produtos que podem ser levados ao forno, e por possuir também resistência ao ataque químico tornando ideal para ser empregado em laboratório (vidro Pyrex ®) (AKERMAN, 2000).

- Vidros Alumínio-Borossilicato: neste material é adicionado o óxido de alumínio na formulação do vidro silicato alcalino, tornando o vidro mais viscoso em altas temperaturas; seu formato de rede tetraédrico permite o aquecimento desse vidro em temperaturas superiores sem causar deformação, comparado com os vidros sodo-cálcicos e a maioria dos borossilicatos. São geralmente utilizados em tubos de combustão, fibras de reforço, vidros com alta resistência química e vitro-cerâmicos (AKERMAN, 2000).
- Vidros ao Chumbo: Possuindo em sua composição o óxido de chumbo, os vidros alcalinos ao chumbo possuem uma longa faixa de trabalho por haver pouca alteração de viscosidade em temperaturas reduzidas. O chumbo confere aumento do índice de refração do vidro, atribuindo maior brilho ao material, sendo utilizado de forma abundante em produtos ópticos. Este material é utilizado para a produção de artigos de importância artística como peças de arte, copos e taças conhecidas como “cristal”. O vidro com óxido de chumbo na composição, é amplamente utilizado na indústria eletro-eletrônica, por possuir a capacidade de não reduzir a resistividade elétrica, impedindo a condução de corrente elétrica para fora do material (AKERMAN, 2000). Contudo, a produção de vidro ao chumbo para fins de envases e copos foi terminada devido ao alto potencial tóxico do chumbo, o qual foi demonstrado que pode ser lixiviado na bebida contida no recipiente (GRAZIANO; BLUM, 1991). Hoje em dia, são utilizados substitutos como óxido de bário e titânio para alcançar o brilho estético desejado.

Na Tabela 1 encontram-se as principais composições químicas das famílias de vidro mencionadas.

Tabela 1- Porcentagem comum de componentes para diferentes tipos de vidro.

		SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	MgO	PbO
Sodo-cácicos	Embalagem	72,0	2,0	-	12,5	1,0	11,0	1,5	-
	Plano	71,0	1,0	-	13,5	0,5	10,0	4,0	-
	Lâmpada	73,0	1,0	-	16,5	0,5	5,0	4,0	-
Boros-silicato	Pyrex	79,0	2,0	13,0	5,5	-	-	-	-
	Fibra isolação	66,0	1,5	3,5	15,5	1,0	8,0	4,0	-
Chumbo	Cristal	56,0	-	-	4,0	12,0	2,0	2,0	24,0
	Néon	63,0	1,0	-	8,0	6,0	-	-	22,0
	Lente	32,0	-	-	1,0	2,0	-	-	65,0
Alumí-nioboros-silicato	Farmacêutico	72,0	6,0	11,0	7,0	1,0	1,0	-	-
	Fibra reforço	55,0	15,0	7,0	-	-	19,0	4,0	-
	Tubo combustão	62,0	17,0	5,0	1,0	-	8,0	7,0	-

Fonte: Adaptado de (Akerman, 2000).

2.3 Propriedades do material vidro

2.3.1 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas de um material estão relacionadas ao seu desempenho juntamente a uma aplicação ou remoção de calor. Dentro das propriedades relacionadas ao calor estão: a capacidade calorífica do material, sendo a quantidade de calor que um material pode absorver; o coeficiente de expansão térmica, que mede a variação nas dimensões dos materiais submetidos a mudança de temperatura; a condutividade térmica, sendo a capacidade do material de conduzir calor, ou seja, a permissividade de um fluxo de calor entre duas faces. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Uma das propriedades térmicas do vidro mais importante comercialmente é a sua resistência ao choque térmico, que acontece quando após uma mudança repentina de temperatura do material, devido à falta de ductilidade, está desencadeia possíveis lesões e fraturas. O resfriamento rápido do vidro, principalmente, apresenta uma maior probabilidade de induzir ao choque térmico. Isso se deve ao fato do vidro ser um mal condutor de calor: quando submetido ao aquecimento, uma face recebe o calor enquanto a outra face continua fria, e o equilíbrio térmico é alcançado de forma devagar no seu interior. Quando a diferença de tensão devida à diferença de temperatura do material entre

as duas faces fica acima das tensões que o vidro pode suportar, o material quebra (AKERMAN, 2000; CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

As propriedades térmicas dos vidros devem se ater a normativas específicas dependendo da funcionalidade do mesmo. No caso de embalagens de vidro, a NBR 14910:2002 estabelece os parâmetros aceitos em caso de variação rápida de temperatura.

2.3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas de um material estão relacionadas ao seu comportamento quando sujeitos a esforço; não podem ser determinadas através de sua composição, mas por meio de experimentos e testes específicos. Dentre as propriedades mais significativas a serem consideradas estão a elasticidade, resistência à tração, resistência à compressão, resistência à flexão e dureza (MARTINS; PINTO, 2004).

Referente a elasticidade se destaca o Módulo de Elasticidade, que é a relação entre a tensão aplicada no material e a deformação sofrida por ele. Quanto maior for o módulo elasticidade, mais rígido será o material ou menor a deformação elástica, quando aplicada uma tensão (HALDIMANN et al., 2008). A resistência mecânica é uma das propriedades que devem ser consideradas primordiais em qualquer projeto, visto que a resistência de um material vai depender da sua capacidade de suportar carga sem sofrer deformação ou ruptura (HIBBELER, 2004). O vidro é um material que não apresenta deformação permanente, entretanto é um material frágil, ou seja, quando submetido a determinadas tensões, ele rompe abruptamente, sem apresentar sinais prévios (MARTINS; PINTO, 2004). Segundo a norma NBR 7199/1989, para vidro na construção civil, o módulo de elasticidade de um vidro plano se encontra entre 75000 ± 5000 MPa, e a tensão de ruptura à flexão, para vidro de segurança temperado, deve ser de 180 ± 20 MPa. Baseado nesses valores, o vidro não apresenta segurança suficiente para uso estrutural (NBR 7199/1989).

A própria NBR 7199/1989 define um outro parâmetro mecânico de superfície importante, a dureza. A dureza é uma medida de resistência do material, podendo ser avaliada a resistência à uma pequena indentação ou riscos, que podem causar uma deformação plástica localizada. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018; MARTINS; PINTO, 2004). A avaliação da dureza ou microdureza superficial pode ser encontrada através do método Vickers: este método baseia-se na medição do nível de indentação de uma ponta de diamante sob forças de carregamentos conhecidas, permitindo uma

comparação quantitativa. Para vidros sódico-cálcico comuns, a dureza Vickers é normalmente encontrada entre 5.5 e 5.7 GPa (MIURA et al. 2003; MICHEL et al., 2004).

2.3.3 Propriedades químicas

O Vidro é um material distinto dos outros, cujas propriedades estão intrinsecamente ligadas à sua composição química e ao seu processo de fabricação (VALARINHO, 2010).

Uma das propriedades que mais se destaca no vidro é a capacidade de resistir a substâncias agressivas e corrosivas para outros materiais, o que explica sua popularidade na indústria química e estabelece como um dos materiais mais duráveis na construção civil (HALDIMANN et al., 2008). O conhecimento da composição química do vidro é fundamental para identificar as propriedades necessárias para cada uma de suas aplicações.

Os dois vidros mais comuns são os de recipientes, seja de alimentos ou produtos farmacêuticos, e janelas, os quais devem apresentar duas qualidades químicas essenciais: resistência à absorção de água e resistência ao ataque ácido. Essa necessidade decorre da presença do elemento sódio nos vidros sódico-cálcicos, que pode ser lixiviado da superfície, comprometendo a integridade do material quando exposto por períodos prolongados a soluções aquosas, especialmente ácidas (JANG, 2000). A concentração de sódio é um fator determinante, quanto maior a concentração, maior a probabilidade que ocorra a lixiviação do elemento da superfície. A norma ABNT NBR 14910: embalagens de vidro para produtos alimentícios: requisitos e métodos de ensaio" assim como a norma ABNT- NBR 11819:2004 "frascos de vidro para produtos farmacêuticos: requisitos e métodos de ensaio" descrevem os testes específicos para avaliação da absorção de água e resistência ao ataque de ácido clorídrico em vidros, fornecendo parâmetros essenciais para a compreensão e controle dessas propriedades químicas (NBR 14910; NBR 11819).

De acordo com a Norma NBR 11819 (2004), a classificação do tipo de vidro é dada em função da resistência hidrolítica ou alcalinidade apresentada pelo material e propriedades mecânicas da embalagem, conforme apresentado a seguir (extraído da norma, pg. 1-2):

- Tipo I: vidro neutro do tipo borosilicato, não alcalino, de alta resistência térmica, mecânica e hidrolítica, com alcalinidade de até 1,0mL de H_2SO_4, (0,01mol/L) (teste em vidro moído).

- Tipo II: vidro alcalino do tipo sodo-cálcico, de resistência hidrolítica elevada, resultante do tratamento apropriado do vidro tipo III, de modo que sua alcalinidade seja no máximo 0,7mL de H_2SO_4, (0,01mol/L), para embalagem de até 100mL e 0,2mL de H_2SO_4, (0,01mol/L), para frascos acima de 100mL (teste na embalagem íntegra).
- Tipo III: vidro alcalino do tipo sodo-cálcico, de resistência hidrolítica média, porém com boa resistência mecânica, sem qualquer tratamento superficial, com alcalinidade máxima de 8,5 mL de H_2SO_4 (0,01 mol/L) (teste em vidro moído).
- NP (não parenteral): vidro alcalino do tipo sodo-cálcico, de resistência hidrolítica baixa e alta alcalinidade de, no máximo, 15 mL de H_2SO_4 (0,01 mol/L) (teste em vidro moído).

2.3.4 Propriedades físicas

As propriedades físicas de um material estão relacionadas à pesquisa e observação de características intrínsecas, que não causam alterações na composição química ou na morfologia do material. No vidro, as propriedades físicas que se destacam são principalmente a densidade, a densidade de microbolhas, e todas as propriedades óticas, como o índice de refração e transmitância (PINTO; MARTINS, 2004).

A densidade do vidro é relacionada com a sua composição, sendo definida como a massa do material em gramas dividida pelo volume em centímetros cubicos. Normalmente o valor encontrado para vidros planos sódico-cálcicos é de 2,5 g\cm³ (MARTINS; PINTO, 2004). Além da densidade propriamente dita, para determinadas aplicações é necessário avaliar a densidade de microbolhas, calculada como número de microbolhas por gramas de amostra. A norma NBR 16184 (2021) intitulada “Sinalização horizontal viária - Esferas e microesferas de vidro - Requisitos e métodos de ensaio” define os parâmetros para essas avaliações.

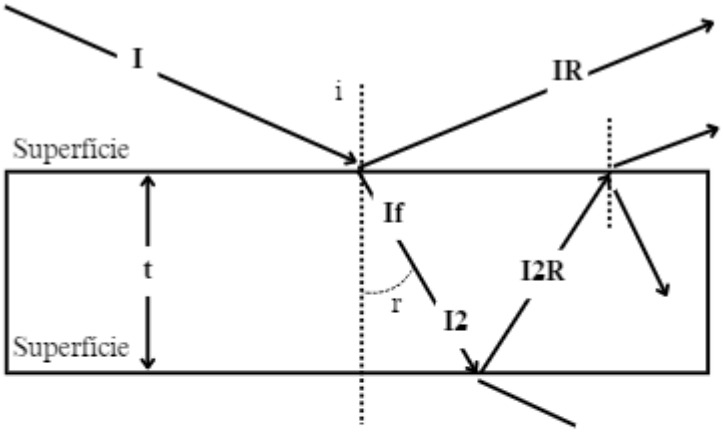
Dentro das propriedades físicas podemos encontrar as propriedades ópticas, definidas como as respostas de um material à exposição a uma radiação eletromagnética, em particular, à luz visível. Podemos citar como comportamentos ópticos dos vidros características de absorção, reflexão, transmissão, refração, transparência e cor (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

O vidro é um material isotrópico, ou seja, suas propriedades físicas, como o índice de refração, são iguais em todas as direções, devido à sua estrutura amorfa e não cristalina.

Quando um feixe de luz incide sobre a superfície de um vidro, parte da luz é refletida, enquanto o restante é transmitido para o interior do material, causando refração devido à diferença de índices de refração entre a ar e o vidro. Durante a passagem pelo vidro, pode ocorrer absorção de parte da energia luminosa pelo material, diminuindo a intensidade dos feixes transmitidos. Ao emergir pela face oposta, o feixe novamente sofre refração e reflexão. A transmitância do vidro é definida como a razão entre a intensidade do feixe emergente e a intensidade do feixe incidente (Figura 5) (AKERMAN, 2000).

A partir dessas propriedades podemos utilizar o Espectrofotômetro UV-Vis e analisar o grau de transmitância do material. Conforme a norma ABNT NBR 14910: 2002, o vidro deve apresentar específicas transmissões de luz: para vidros que possuem espessura de 3mm o comprimento de onda avaliado será de 550 nm, e a partir da transmissão de luz são avaliadas e classificadas as de diferentes colorações. Para o vidro ser classificado como âmbar deve possuir transmitância de 20% a 35%, enquanto os vidros verdes devem apresentar valores entre 70% e 80% e os vidros incolores devem apresentar transmitância superiores a 85%.

Figura 5 - Interação da radiação incidindo na superfície do vidro.



I = Intensidade do raio incidente
IR = Raio refletido
If = I - IR = Intensidade do raio entrando no vidro
I2 = If e -βt = Intensidade do raio após atravessar a espessura do vidro
t = Espessura
I2R = Raio refletido da superfície emergente
I3 = Intensidade do raio emergente = I2 - I2R
i = Ângulo de incidência
r = Ângulo de refração

Fonte: Adaptado de (Akerman, 2000).

2.4 Contexto regional e aplicabilidade comercial

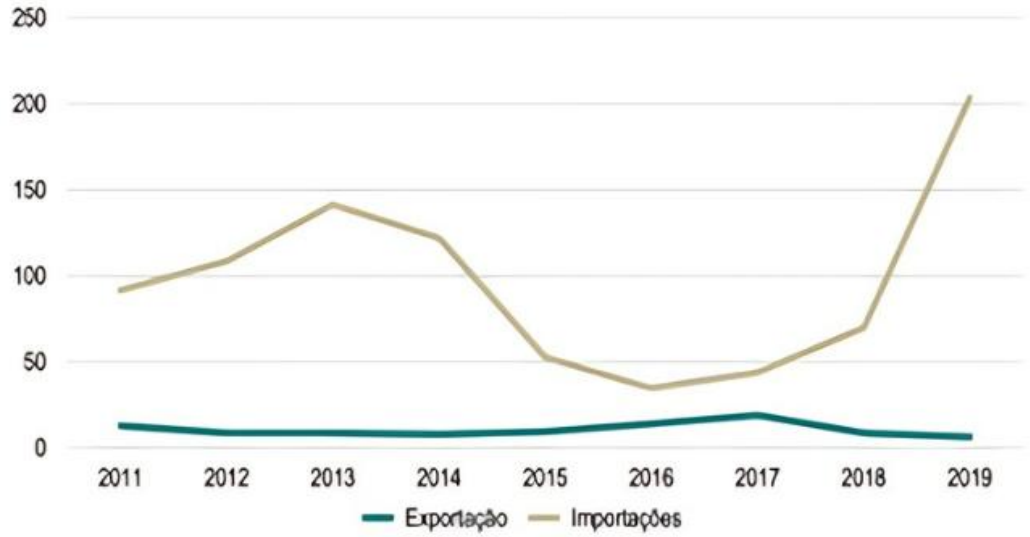
O plano de desenvolvimento institucional da Unipampa prevê o desenvolvimento econômico e social da região na qual está inserida, promovendo a melhora do índice IDH (PDI, 2019); assim, se torna de grande interesse resolver problemas ambientais regionais (com possibilidade expandido para todo o território nacional) e poder criar um modelo de economia circular focada na fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Com o desenvolvimento do cultivo das oliveiras nesta região, se torna interessante o desenvolvimento em paralelo de um mercado de recipientes aptos a armazenar o azeite produzido.

2.4.1 O mercado de recipientes de vidro

Segundo a Abravidro (2018), devido a sobre oferta de produção de vidro no Brasil, as usinas passaram a exportar vidros excedentes em 2016 e início de 2017. Em setembro de 2017, apareceram previsões de que haveria escassez de vidro no mercado, devido a dificuldade de acesso a matéria-prima. As previsões fizeram com que as empresas tomassem providência, melhorando a logística, aumentando a produtividade e reduzindo

as exportações. Segundo os dados da Abividro (2022), o volume de importações de embalagens de vidro em 2019 cresceu no Brasil 200% em relação ao ano anterior (Figura 6), demonstrando a grande demanda pelo material.

Figura 6 - Evolução do comércio exterior de embalagens de vidro, em mil toneladas, Brasil.



Fonte: Abividro, 2022.

Durante a pandemia de COVID-19 o consumo de vinho no mercado brasileiro também aumentou de forma incomum, proporcionando escassez de garrafas de vidros. A indústria vidreira não foi capaz de acompanhar o rápido crescimento do mercado, gerando um desequilíbrio entre oferta e demanda: os preços de energia subiram, a matéria-prima se tornou mais escassa e houve interrupção na cadeia de logística. Segunda da Silva (2022), também os conflitos internacionais mais recentes como a guerra entre Rússia e Ucrânia, agravaram a situação, gerando mais atrasos na produção de garrafas. As vinícolas brasileiras não tiveram outra opção além de importarem garrafas de outros países. Diante dessa situação de encarecimento dos envases, o aumento da produtividade de garrafas de vidro no Brasil se tornou uma opção para reduzir custos com importação (DA SILVA LORENA et al., 2022).

Após essa fase de grande procura, a produção de vidro no mercado brasileiro passou por um momento desafiador em 2022: com o término da pandemia, houve a queda na

demanda pelo vidro, tendo seu consumo reduzido em 10%. A produtividade do vidro também diminuiu, sendo o pior desempenho da última década (ABRAVIDRO, 2023).

Assim, a produção de vidro enfrenta amplas flutuações periodicamente, consideradas potenciais riscos de escassez, devido a diversos fatores: a crescente demanda, limitações de oferta de matérias primas, interrupções no processo de fabricação e problemas nos canais de distribuição. Uma solução de estabilidade, conforme relatado por Freire (2016), é a exploração de fontes alternativas de matéria-prima (FREIRE, 2016).

2.4.2 Reciclagem de vidro no Brasil

A crescente demanda da sociedade por responsabilidade ambiental leva as organizações a adotarem práticas conscientes aliadas ao conceito de sustentabilidade. A proposta da reciclagem é uma forma de reaproveitar matérias-primas como papel, latas de alumínio, aço e vidro. (MEDEIROS et al., 2015; ROSA et al., 2005). O vidro é um material que, diferente de outros, possui a capacidade de ser 100% reciclável, gerando a mesma quantidade inicial de produto, além de não possuir limitações no número de reciclagens, mantendo a mesma qualidade (FEITOSA et al., 2017). Segundo a Abividro (2019), “a cada 6 t de vidro reciclado, estima-se que se deixa de emitir, em média, 1 t de CO2”, sendo assim a reciclagem uma enorme alternativa sustentável neste setor.

Segundo a Abividro, durante o período de pandemia (2021-2022) o vidro representou o 2,7% do volume de todos resíduos sólidos secos reciclados no Brasil. A fins de comparação, na Alemanha está sendo alcançada uma eficiência de 67%, o que aponta um atraso do Brasil de duas décadas em termos de desenvolvimento neste setor. Segundo a Abividro, em 2019 este número evoluiu para 40% (ABIVIDRO, 2019). Este número é muito baixo, considerando a potencialidade do material. Já que o sistema de reciclagem de vidro no Brasil é predominantemente baseado em cooperativas e trabalhadores individuais que visam ao sustento familiar (ABIVIDRO, 2018), uma das maiores barreiras que impede o crescimento da reciclagem de vidro é o preço pago aos catadores (Figura 7); desta forma, acabam optando por recolher outros materiais (ABIVIDRO, 2018; CEMPRE, 2018). Além disso, a indústria vidreira baseada em reciclagem enfrenta desafios, entre todos o alto custo do transporte em longas distâncias até *hub* de coletas, e qualidade abaixo dos padrões de reaproveitamento (ABIVIDRO, 2018). Para melhorar a qualidade, o vidro poderia ser separado por cor antes de ser moído e reaproveitado, agregando valor principalmente na produção do material transparente (VETTORATO et al., 2021).

Figura 7 - Preço médio em reais dos materiais por kg em 2017 e 2018.

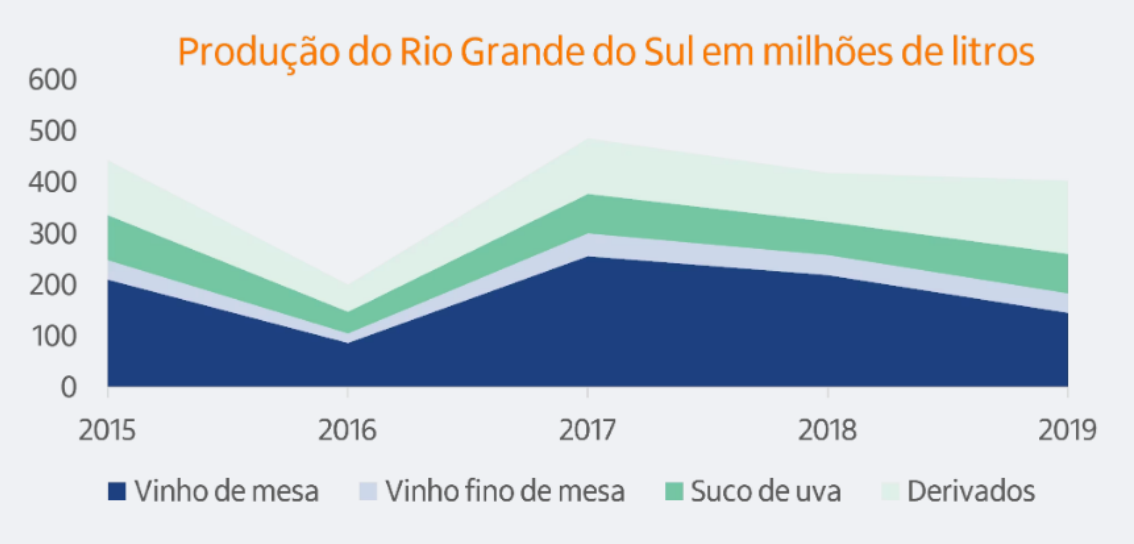
Fonte: Cempre.

No caso da logística de coleta, é preciso ter um sistema que flua de forma organizada, conscientizando a população e possivelmente, tendo políticas de incentivos dos governos. Desta forma, o processo de reciclagem não será somente sustentável, mas também economicamente viável (ABIVIDRO, 2019).

2.4.3 Potenciais consumidores de recipientes de vidro na Fronteira Oeste (RS)

O cultivo de uva no Brasil está concentrado principalmente nas regiões Sul e Nordeste do país, onde o Rio Grande do Sul se destaca contribuindo com aproximadamente 49,3% da produção nacional (Figura 8). Neste estado, apenas uma pequena parcela é direcionada ao consumo de mesa, já que a maior parte é destinada à elaboração de sucos e vinhos, tanto de maneira artesanal quanto industrial. Nas últimas décadas, o estado gaúcho cresceu significativamente na produção de vinhos, conquistando mercados nacionais e internacionais. Atualmente, o Rio Grande do Sul responde por cerca de 90% da produção nacional de vinhos e suco de uva. Historicamente, a produção vinícola se concentrou no nordeste do estado, principalmente na região da Serra; porém atualmente, outras regiões como a Fronteira Oeste, Campanha e Médio-Alto Uruguai tem se revelado importantes polos na produção de uva para vitivinicultura (RS, 2021).

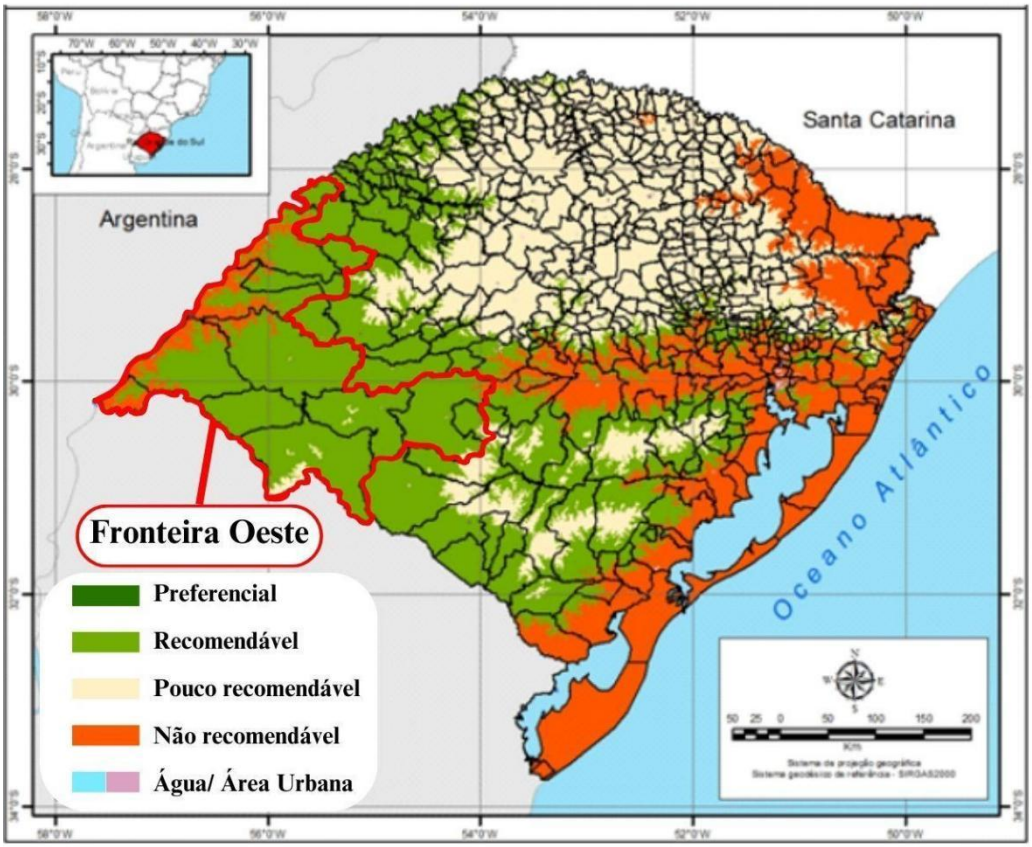
Figura 8 - Produção de derivados de uva no Rio Grande do Sul de 2015 a 2019.



Fonte: Panorama do mercado de vinhos.

O Rio Grande do Sul, especificamente a região da Fronteira Oeste, vem também se destacando pelo cultivo das oliveiras e produção de azeite, ganhando cada vez mais espaço. Esta cultura é muito favorecida na região, devido ao seu clima recomendável (Figura 9), segundo o zoneamento agroclimático apresentado pela Embrapa (2013). A oliveira (*Olea europaea* L.) é uma árvore que pertence à família Oleaceae, possui tamanho médio com formato arredondado, seus frutos podem ser consumidos *in natura* ou pode se extrair seu óleo (RAPOPORT, 2004). Segundo Tejero e Rosa (2020), a cultura da oliveira na região da fronteira oeste se mostra promissora, rentável e possui mercado a ser explorado tanto com plantações como com as indústrias de produção de azeite de mesa refinado.

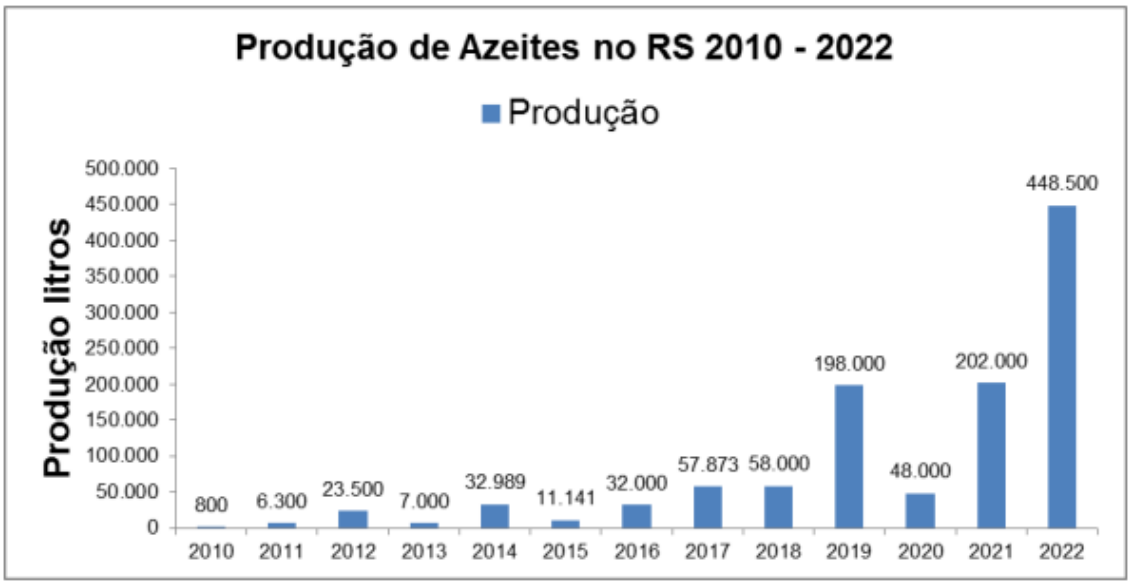
Figura 9 - Zoneamento agroclimático da cultura da oliveira no Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptado de (Embrapa, 2013)

Ao mesmo tempo que existe alto crescimento da produção de azeite no estado do Rio Grande do Sul (Figura 10), também cresce a demanda por embalagens: a indústria necessita de frascos que mantenha a qualidade do produto, focando em frascos de vidro que possuam maior espectro de proteção à luz, de cor esverdeada ou ambar (BOTTI, 2014). Através da utilização da cinza da casca de arroz como matéria prima para produção de recipientes para o envase dos produtos da região, é possível alcançar um diferencial a nível internacional, respeitando os preceitos de sustentabilidade e economia circular, podendo-se estender para todo o território nacional.

Figura 10 - Produção de azeites no Rio Grande do Sul de 2010 a 2022.



Fonte: Secretaria da agricultura, pecuária, produção sustentável e irrigação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de vidro a partir da cinza da casca de arroz como fonte de sílica em substituição a areia foram produzidas e submetidas a ensaios normativos 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. Os processos de fabricação e análises dos vidros são descritos a seguir.

3.1 Processo de produção das amostras

Para a produção das amostras de vidro foram utilizadas as cinzas da casca do arroz fornecida pela empresa URBANO AGROINDUSTRIAL LTDA, de São Gabriel, RS. Além da fonte de sílica (SiO_2 – oriundo da CCA) em uma quantidade de 70% em massa, para a produção de vidro do tipo borossilicatos foram acrescentados: 13% de óxido de sódio (Na2O), 7% de óxido de cálcio (CaO) e 10% de óxido de boro (B_2O_3). Os componentes foram pesados em uma balança analítica (marca Marte, modelo AY220) (Figura 11a) e homogeneizados com o auxílio de um pistilo e almofariz (Figura 11b).

Figura 11 - a) Pesagem dos reagentes. b) processo de homogeneização.

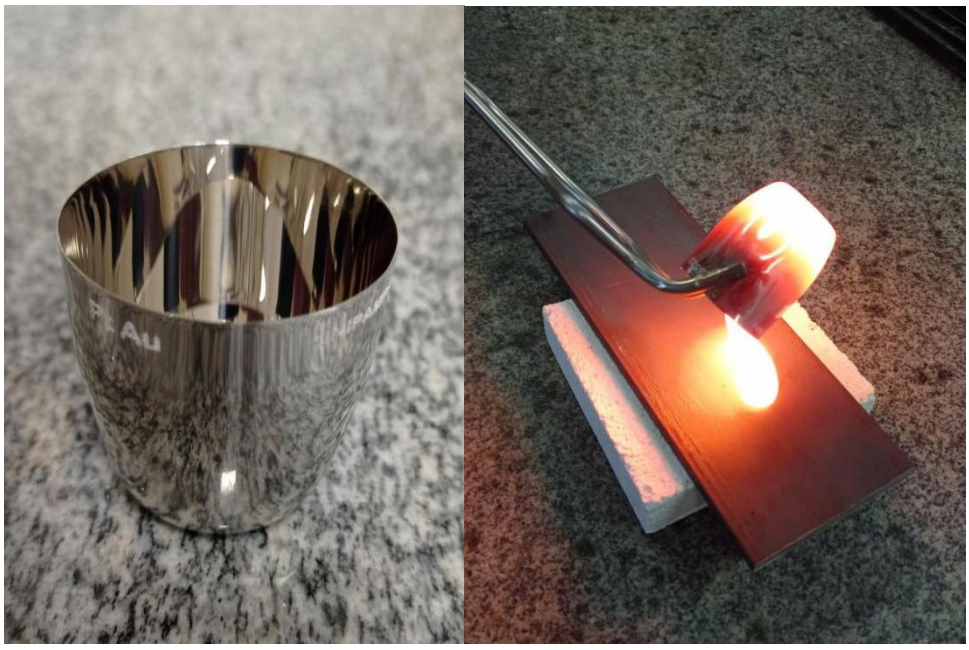
Fonte: Do autor.

A mistura homogênea foi colocada em um cadinho de ouro/platina (Impalla, SP) (Figura 12a) capaz de suportar as altas temperaturas de fusão e resistir ao choque térmico entre a alta temperatura do forno e a temperatura ambiente da sala, além de não contaminar a amostra como os cadinhos cerâmicos que possuem alumínio em sua composição. A formulação foi levada ao forno mufla (Forno Mufla Fe 1600/20 Inti) e foram utilizadas as seguintes condições de fusão: uma taxa de aquecimentos de 10°C/min até chegar em 900°C, temperatura que foi mantida por uma hora; após, uma taxa de aquecimento em 7°C/min até a temperatura de 1200°C, temperatura também mantida por

uma hora; por fim, uma taxa de aquecimento de 5°C/min até 1500°C, onde esta temperatura foi mantida por 3 horas. O vidro em estado líquido foi vertido em uma chapa de aço pré-aquecida em 480°C (Figura 12b) e levado a um segundo forno ajustado na mesma temperatura por uma hora, para que aconteça o processo de *annealing* (acondicionamento), para aliviar as tensões desenvolvidas a partir do choque térmico. De fato, durante o processo de vertimento, a matriz vítrea que se encontra no exterior da gota produzida resfria mais rápido em respeito ao interior, podendo causar fortes tensões internas. Por fim, as amostras foram resfriadas lentamente até a temperatura ambiente dentro do forno.

Para poder assegurar a homogeneidade das amostras produzidas, dado que as mesmas apresentaram altas viscosidades, o processo de produção foi repetido três vezes: após o vertimento e resfriamento, o vidro produzido foi moído e refundido. Somente após a terceira fundição as amostras passaram pela etapa de condicionamento.

Figura 12 - a) Cadinho de ouro/platina. b) vidro em 1500°C sendo vertido.

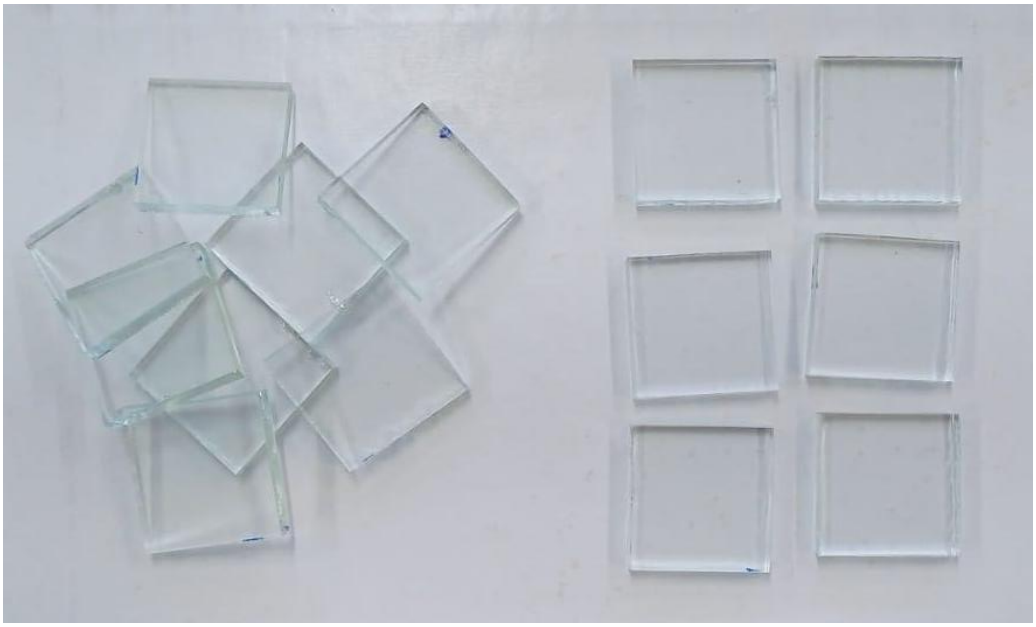


Fonte: Do autor.

3.1.1 Vidro Comercial

As amostras do vidro comercial utilizadas neste trabalho foram do vidro *float* não-temperado fornecidas comercialmente por uma vidraçaria de Alegrete, Rio Grande do Sul. A empresa disponibilizou amostras com dimensões de 2 cm de base, 2 cm de altura e 0,4 cm de espessura. A Figura 13 apresenta a amostra do vidro fornecido pela vidraçaria.

Figura 13- Vidro comercial plano.



Fonte: Do autor

3.2 Testes e ensaios de caracterização das amostras.

Para poder caracterizar e determinar se o vidro feito com a cinza da casca do arroz possui características e propriedades que podem ser comparadas ao vidro produzido comercialmente, foram realizados diferentes testes baseados em normativas brasileiras relacionadas com o vidro e suas aplicações. Foram utilizadas as normas ABNT NBR 14910:2002, intitulada “Embalagens de vidro para produtos fornecidos - Requisitos e métodos de ensaio”, ABNT NBR 11819: “frascos de vidro para produtos farmacêuticos: requisitos e métodos de ensaio, ABNT NBR 7199:2016 Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações e a norma ABNT NBR 16184:2021, intitulada “Sinalização horizontal viária - Esferas e microesfera de vidro - Requisitos e métodos de ensaio”. Com objetivos de comparação, foram utilizados outros dois vidros: um vidro produzido em laboratório, utilizando o mesmo processo, porém tendo areia mineral (AM)

de indústria vidreira (Verallia, Campo Bom, RS) como fonte de sílica, e vidro comercial. Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

Foram realizados as seguintes caracterizações e ensaios:

- Fluorescência de Raio-X
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
- Difração de Raios-X
- Densidade (ABNT NBR 16184: 2021);
- Densidade de microbolhas (NBR 14910: 2002);
- UV-VIS (ABNT NBR 14910: 2002);
- Microdureza;
- Resistência ao Choque térmico (ABNT NBR 14910: 2002);
- Resistência a Absorção de água (ABNT NBR 16184: 2021);
- Resistência ao Ataque ácido (ABNT NBR 16184: 2021);
- Determinação de acidez no azeite
- Estudo *lab-made* para condutividade térmica (ABNT NBR 7199: 2016).

3.2.1 Caracterização das amostras produzidas

Primeiramente, a cinza utilizada neste estudo foi analisada por Fluorescência de Raios X (Panalytical, Epsilon 1, semi-quantitativa, Z > 12) para confirmar sua composição química, principalmente, a quantidade de sílica presente. Para isso, 10g de cinza de casca de arroz e areia mineral foram finamente moídos e peneirados com peneira de 0,075mm. A mesma técnica foi utilizada para avaliar as amostras de vidro produzidas, para confirmar as porcentagens dos óxidos envolvidos. Assim, também 10 g dos vidros produzidos com CCA, AM e o vidro comercial plano foram moídos, peneirados e analisados.

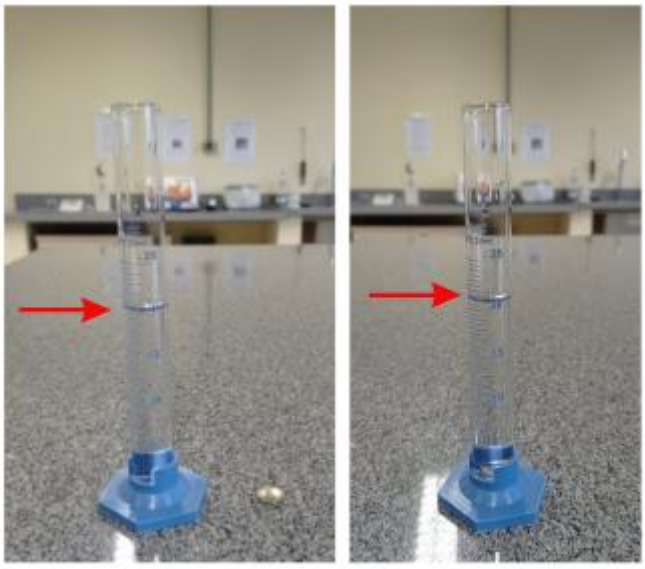
Com o objetivo de compreender melhor e comparar a estrutura dos materiais utilizados na produção das amostras, a CCA, AM e todos os vidros produzidos foram analisadas por difração de raios X. Especificamente, em cada caso 100 mg de material triturado foram homogeneizados, peneirados em peneira de 0,075mm e testados em um Shimadzu XRD6000 (tubo de CuKα), com tensão de 40 kV e corrente de 20 mA. Os difratogramas foram obtidos com passo de 0,1°, com tempo de 10 s/passo.

Além disso, os vidros produzidos foram avaliados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.2 Densidade e densidade de microbolhas

Para encontrar a densidade, foi aplicado o método de deslocamento de volume, baseado na NBR 16184 (2021), com adaptações. O procedimento envolveu a pesagem da amostra em balança analítica e, em seguida, o preenchimento de uma proveta com água, até uma marca registrada (Figura 14a). Após a imersão da amostra, foi retirado através de uma pipeta graduada (± 0,01 mL) o volume deslocado pela amostra (Figura 14b), voltando assim à marca original na proveta. O processo foi repetido 3 vezes para cada amostra. Para determinação da densidade de massa foi utilizado a expressão de massa (g) dividido pelo volume (mL) como especificado pela NBR 16184 (2021).

Figura 14 - a) Proveta ao lado da amostra. b) Amostra inserida na proveta.



Fonte: Do autor.

Em respeito ao cálculo da densidade de microbolhas, o procedimento de teste foi fundamentado na NBR 14910 (2002) e adaptado conforme necessário. Inicialmente, a amostra foi pesada em balança analítica. Em seguida, com o auxílio de uma fonte de luz (Figura 15a) e uma lupa (Lupa Kontrol XTL), foram contadas as microbolhas contidas em cada amostra (Fig 15b). A densidade de microbolhas é expressa pela relação número de microbolhas por peso em gramas.

Figura 15- a) Setup para a avaliação das microbolhas. b) Exemplo de microbolha em amostra de vidro.

Fonte: Do autor.

3.2.3 UV-VIS

A análise por espectroscopia na região visível (VIS) e ultravioleta (UV) foi realizada de acordo com as normas determinadas na ABNT NBR 14910 (ABNT, 2002).

Em primeiro lugar, as amostras de vidro foram submetidas a um processo de preparação: primeiro, várias etapas de lixação com a seguinte sequência de granulometria 80, 120, 600, 1200 e 2000; após esse processo, as amostras foram polidas, gerando assim duas faces planas sem grandes centros de espalhamentos de luz. Para o ensaio, o UV-VIS (marca Bel Photonics, modelo UV-M51) apresentado na Figura 16a foi utilizado, fazendo a leitura da transmitância a cada 1 nm, entre 250 nm e 1000 nm. A amostra foi colocada no equipamento com a ajuda de fita adesiva, de forma que o caminho de transmissão da luz não fosse afetado, como pode ser observado em Figura 16b. Após a leitura , os espectros obtidos foram normalizados para 1 mm de espessura e construído um gráfico para comparação.

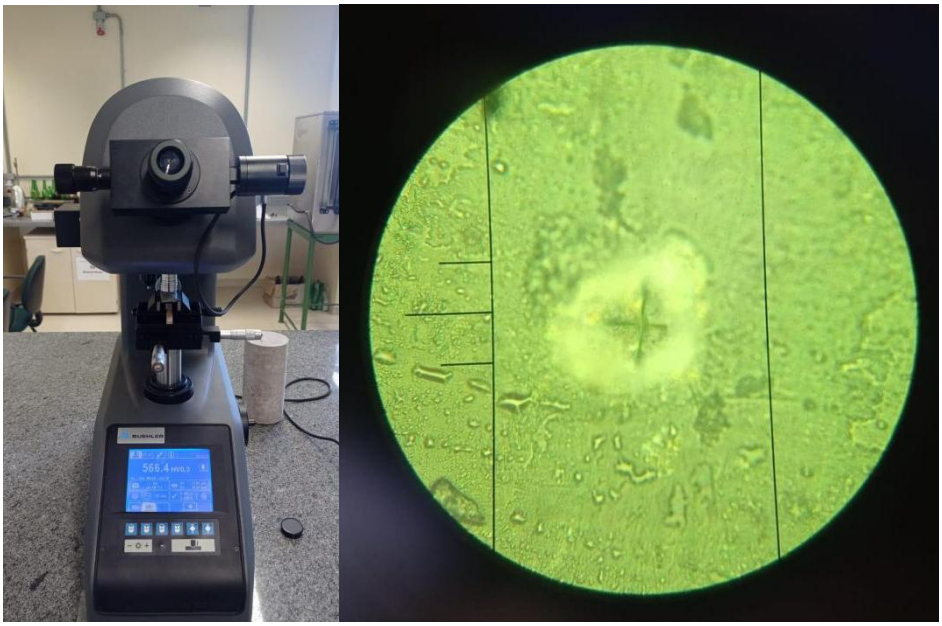
Figura 16- a) Espectrofotômetro de UV-VIS. b) Amostra acoplada ao equipamento.

Fonte: Do autor.

3.2.4 Microdureza

Para poder desenvolver o ensaio de microdureza, as amostras precisam apresentar duas superfícies lisas e planas. Já que o ensaio de UV-VIS não é destrutivo, para esta análise foram utilizadas as mesmas amostras. As amostras foram acopladas no microdurômetro (marca Buehler, modelo Micromet 6010 (Figura 17a)) e foram submetidas a uma aplicação de carga pontual de de 0,5 quilos durante 10 segundos (Figura 17b), gerando uma indentação. O equipamento efetua a medição da indentação após cada aplicação de força, fornecendo os valores de microdureza calculados. O ensaio foi repetido em quatro pontos distantes em cada amostra, podendo assim calcular um valor médio.

Figura 17- a) Microdurômetro. b) Exemplo de indentação na amostra de vidro.



Fonte: Do autor.

3.2.5 Choque térmico

A avaliação do comportamento das amostras diante do choque térmico foi conduzida em conformidade com as diretrizes previstas pela ABNT NBR 14910:2002, intitulada 'Embalagens de vidro para produtos fornecidos - Requisitos e métodos de ensaio'. O método de medição da resistência ao choque térmico descrito na NBR 14910 foi modificado e implementado conforme detalhado no parágrafo subsequente.

Um microscópio óptico (marca Kontrol ® e modelo IM-713) na magnificação 100X, foi utilizado para capturar as imagens superficiais das amostras antes e depois do teste. Os vidros produzidos e o vidro comercial foram depositados cada um em um Becker identificado, com água à temperatura próxima de 95 °C, e mantidos por 30 minutos nesta condição utilizando-se uma base quente (Figura 18a). Ao completar o tempo definido, as amostras foram mergulhadas em outro recipiente com água em temperatura ambiente (23 °C) promovendo o choque térmico (Figura 18b). Depois de secar as amostras com papel toalha, novas imagens da superfície das amostras foram obtidas com o microscópio óptico. A norma prevê que para ser apto, o vidro não quebre durante o ensaio e não apresente nenhum tipo de rachadura visível ao olho nu, como o apresentado em Figura 18b. As imagens de microscópio foram obtidas e comparadas para poder ter uma melhor análise de comparação de resistência superficial entre as amostras.

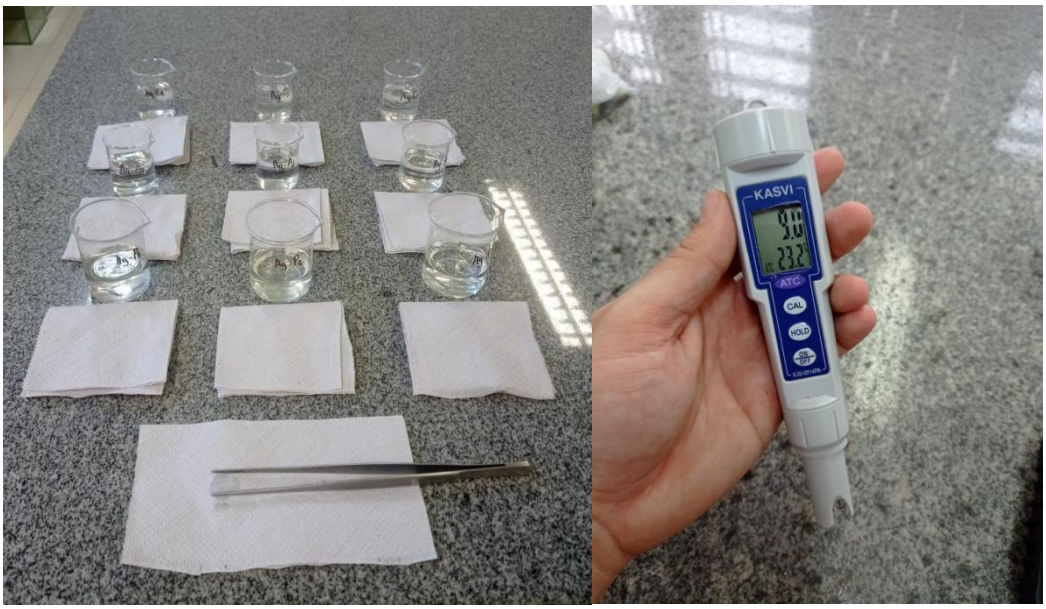
Figura 18 - a) Processo de elevação da temperatura das amostras. b) Amostra submetida (abaixo) e amostra controle (em cima) não submetida ao teste.

Fonte: Do autor.

3.2.6 Absorção de água

A análise de absorção de água foi baseada na NBR 16184 (2021), seguindo o seguinte processo: a amostra foi pesada e imersa em um béquer com água destilada (Figura 19a) com o auxílio de uma pinça; imediatamente, o pH foi medido (tempo zero) através de um Phmetro digital (Phmetro portátil K39-0014PA, Kasvi (Figura 19b)), calibrado antes de começar as medições. Após um período de 3 horas, o pH foi medido novamente. O processo de medição do pH e pesagem da amostra também foram repetidos e realizados nos intervalos de 9, 25, 45, 75 e 90 horas. A análise foi repetida em triplicata.

Figura 19 – a) Teste de absorção em água destilada. b) Phmetro portátil digital.



Fonte: Do autor.

3.2.7 Ataque ácido

Para o teste de ataque ácido foram utilizadas as indicações de processo da NBR 16184 (2021), com adaptações. Para esse teste foram realizadas as capturas de imagens das amostras através de um microscópio óptico, antes e depois serem submetidas ao ataque ácido (Figura 20). A amostra também foi pesada antes de ser imersa em um becker com uma solução de ácido clorídrico a pH 5.5 (HCl 37% v\v, Proquímios), conforme a norma. Logo após a imersão da amostra no ácido, registrou-se o pH (tempo zero). Os vidros permaneceram submersos por 90 horas até serem retirados, secados e pesados. Neste momento, o pH foi medido novamente, e a amostra levada ao microscópio óptico para caracterização. As análises foram repetidas em triplicata.

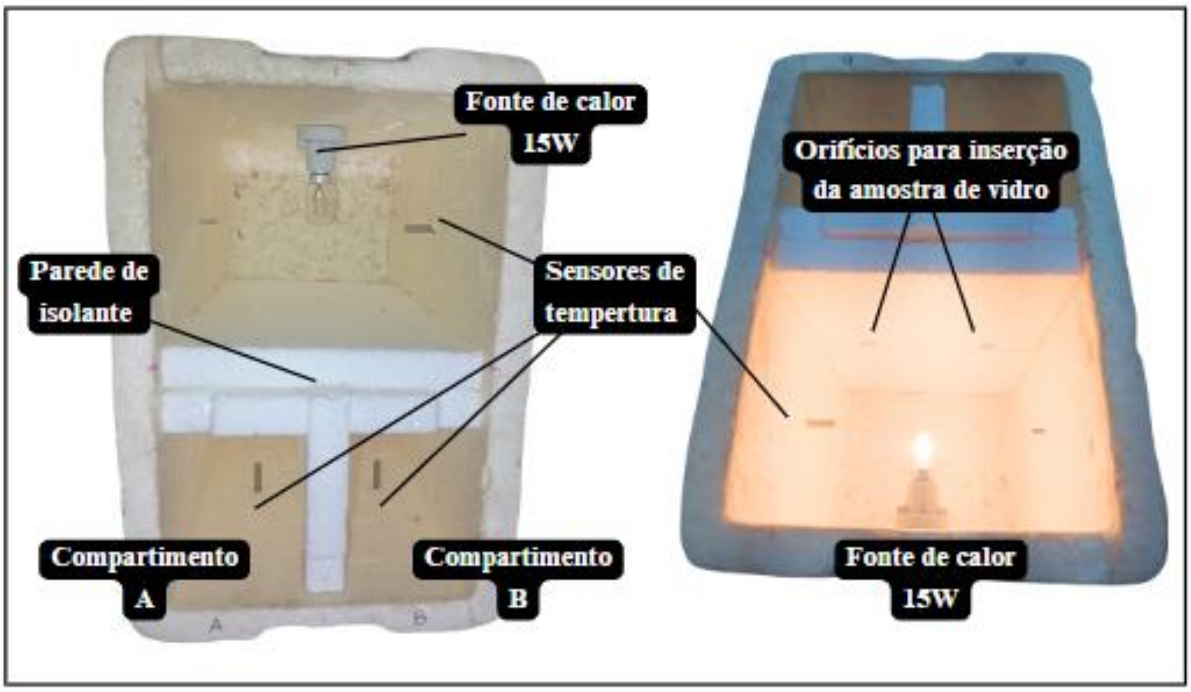
Figura 20 - Amostras submetidas ao ensaio de ataque ácido.

Fonte: Do autor.

3.2.8 Condutividade Térmica

Para avaliar a condutividade térmica do vidro produzido as amostras foram lixadas e polidas, sendo padronizadas para uma espessura de 4mm, foi preparado um ensaio *ad-hoc* em laboratório. Foi planejado efetuar a medição da temperatura em ambos os lados de uma amostra de vidro, com o propósito de quantificar a transferência de calor através do material, a partir de uma lâmpada incandescente de 15W por 1 hora e de 40W até atingir 80°c (Limite de temperatura do equipamento). Para garantir a máxima precisão e controle das variáveis, um ambiente controlado de temperatura foi construído a partir de uma caixa de isopor modificada e dividida em três compartimentos, sendo um deles designado para fornecer a fonte de calor e os outros dois (Compartimento A e compartimento B), para quantificar a diferença de temperatura assegurada pelas amostras de vidro. A separação entre a fonte de calor e cada um dos lados foi garantida por duas folhas espessas de isopor, formando uma "parede dupla" isolante. Essa estrutura de isolamento continha um orifício de 1cm x 1cm que interligava a fonte de calor com o compartimento A e outro para o compartimento B, permitindo a inserção das amostras de vidro, estabelecendo assim o único meio pelo qual o calor poderia ser transferido entre os ambientes. O setup montado pode ser visualizado em detalhes na Figura 21.

Figura 21- Caixa de isopor adaptada para realização do teste.



Fonte: Do autor

Ao longo do experimento, a temperatura foi registrada e coletada por meio de um sensor de temperatura (Modelo: DS18B20 tipo sonda), conectada com uma placa Arduino conectada a um computador utilizando o programa Arduino IDE, foram registradas a temperaturas em intervalos regulares de 30 segundos, para a fonte de calor de 15W por um total de 1 hora.

A análise se baseou na equação de Fourier (Equação 1), que relaciona o fluxo de calor com a variação de temperatura, para poder calcular o coeficiente de condutividade térmica (k):

Equação 1:

$$\Phi = \frac{k*A*\Delta t}{l}$$

Onde:

Φ - Fluxo de calor (W);

k - Condutividade térmica (W/m*K);

A - Área da transferência de calor (m^2);

Δt - Diferença de temperatura entre os dois ambientes (K);

l - Espessura da amostra (m).

O vidro comercial foi adotado como referência, sendo que o valor de condutividade térmica (k) é conhecido e considerado, em média, 1,00 W/(m * K), conforme especificado pela norma NBR 7199:2016. 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, nas condições de equilíbrio, foi empregado para determinar o valor da condutividade térmica para os outros vidros produzidos, com CCA e AM como fonte de sílica.

3.2.9 Determinação de acidez do azeite de oliva

Para estabelecer a influência do vidro no azeite de oliva, foi realizado o teste de determinação de acidez, capaz de fornecer dados sobre a conservação do azeite. Para esse teste foi necessário distribuir as amostras de vidro em béqueres com 40 ml de azeite de oliva (Figura 22a) extra virgem (marca comercial: Gallo), as medidas foram realizadas em 3 e 7 dias após o início do teste, além da medida de confirmação de acidez atribuído ao rótulo (≤0,5%). Para o teste foi retirado em torno de 2g de azeite de cada amostra e adicionado em um Erlenmeyer, seguido por 25 ml de solução de éter-álcool 2:1 e 2 gotas de solução de fenolftaleína a seguir com o auxílio de uma bureta foi adicionado a solução de hidróxido de sódio (NaOH) em 0,01M até ser possível visualizar uma coloração rósea por pelo menos 30 segundos (Figura 22c). As medições foram realizadas em triplicata, gerando um valor médio para cada amostra, após inserir as amostras os béqueres foram cobertos por papel alumínio até a finalização de todas as medições (Figura 22b). Para calcular a acidez foi utilizado a equação de acidez em ácido oleico (Equação 2).

Equação 2:

$$\frac{v * f * M * 28{,}2}{P}$$

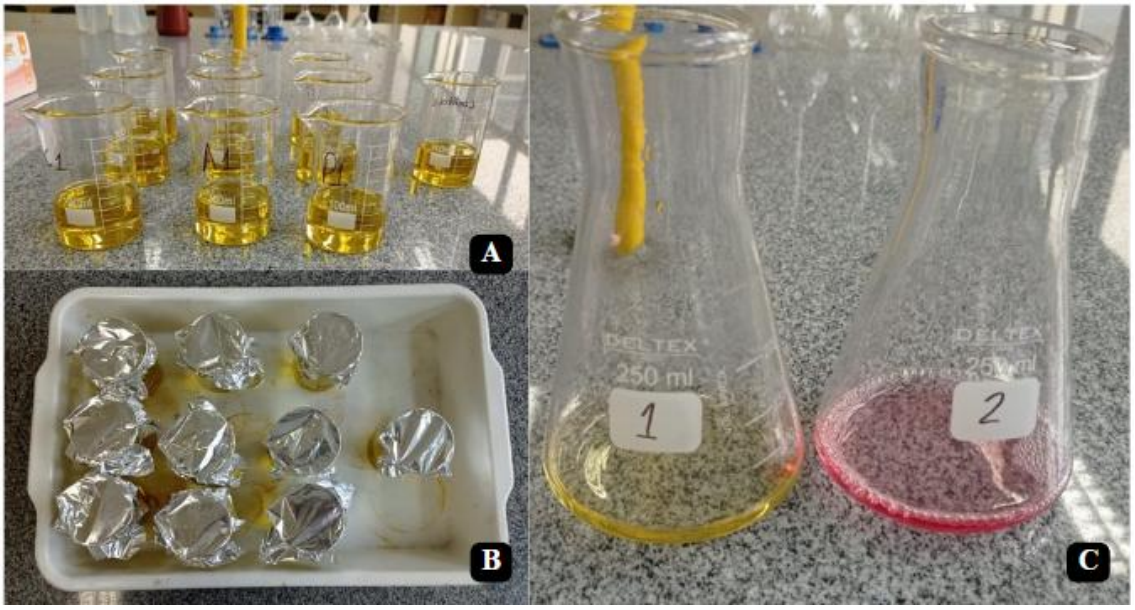
Onde:

v – Número de ml de solução de hidróxido de sódio 0,1 M gasto na titulação;

f – Fator da solução molar de hidróxido de sódio;

P – Número de gramas da amostra.

Figura 22- a) Amostras depositadas nos béqueres. b) modo de armazenamento até a próxima medida. c) Coloração da solução antes do teste (esquerda) e após o teste (direita) apresentando coloração rósea.



Fonte: Do autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos Materiais e Amostras Produzidas

4.1.1 Caracterização das Fontes de Sílica

Primeiramente, as fontes de sílica utilizadas neste estudo foram analisadas por FRX para obtenção de suas composições. Como é possível notar na Tabela 2, a CCA apresentou uma quantidade de sílica ligeiramente abaixo de 90%, o que ainda é um bom grau de pureza, mas com mais materiais carbonosos residuais presentes. A soma da composição não considera elementos com número atômico abaixo de Z = 12, portanto, foi obrido um teor de oxigênio-carbono de 5,06% para a CCA através do teste CHN realizado anteriormente no material. A areia mineral (comercial) foi considerada sílica pura, como deveria ser; as indústrias de vidro são particularmente cuidadosas com o teor de ferro do quartzo usado, pois ele deve ser menor que 0,2% (melhor menos que 0,04%) para evitar qualquer cor indesejada (FEVE, 2020). A CCA também apresentou níveis aceitáveis de teor de ferro, embora presentes em concentrações mais altas.

A menor quantidade de sílica no CCA foi compensada na receita de vidro pela adição de mais matéria-prima para ter exatamente a mesma quantidade de SiO_2 para todo o vidro produzido. Portanto, a investigação deste trabalho se concentra apenas no efeito da natureza da fonte de sílica (amorfa ou cristalina) e nas consequências derivadas da presença de impurezas da CCA.

Tabela 2- Composição das fontes de sílica por fluorescência de raios-X.

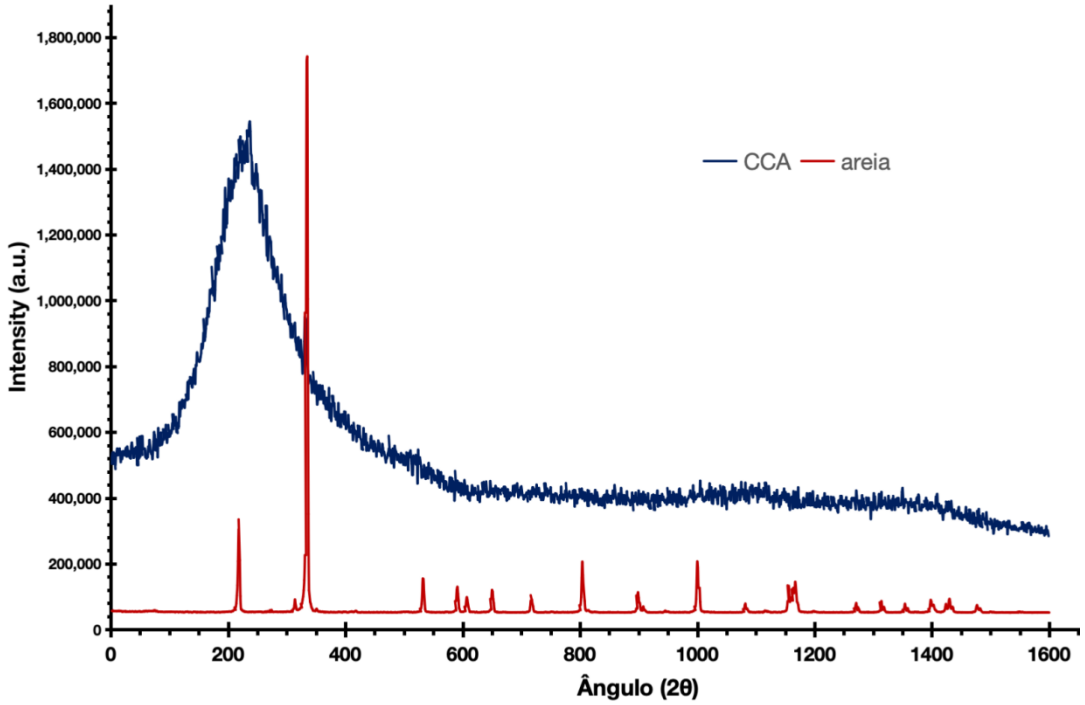
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	MnO	CaO	Na_2O	K_2O	P_20_5
CCA	**89.45**	1.413	0.016	3.141	0.048	0.270	-	0.026	0.501
MS	**99.99**	-	0.001	0.002	-	-	-	-	-

Fonte: Do autor

Para também investigar o efeito morfológico da fonte de sílica na estrutura do vidro produzido, as amostras foram submetidas à Difração de Raios-X, conforme apresentado na Figura 23. A Figura 23 descreve o difratograma da fonte de sílica utilizada: a areia mineral (linha vermelha), como suposto, apresentou uma estrutura cristalina, composta pelas fases cristobalita e tridimita. Por outro lado, a sílica de CCA

(azul) apresentou uma fase amorfa predominante típica, com traços de fase tridimita (pico em 23,7°).

Figura 23: Difratograma da CCA e areia mineral utilizadas como fontes de sílica.



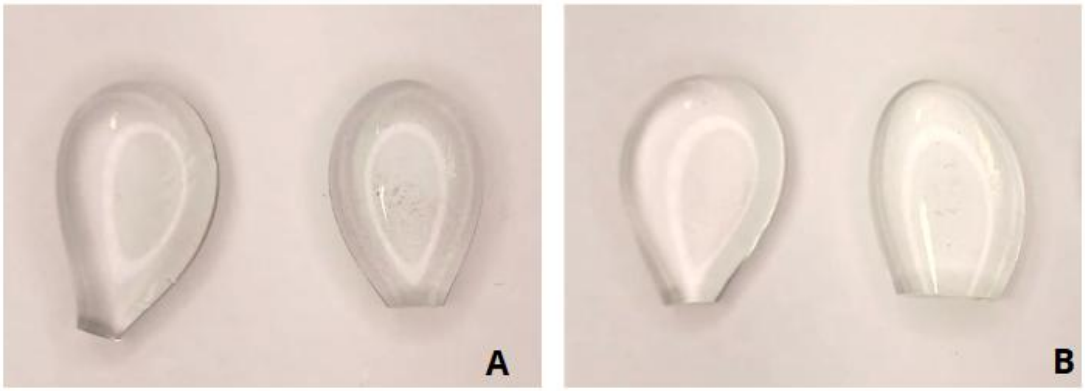
Fonte: Do autor

Em geral, as duas fontes de sílica podem ser classificadas como completamente amorfa (CCA) e completamente cristalina (Quartzo).

4.2 Caracterização dos Vidros Produzidos

Os vidros da cinza da casca de arroz e de areia mineral estão apresentados na Figura 24. Como é possível verificar, ambos são transparentes e incolores, sendo que o vidro da CCA possui um tom levemente mais acinzentado. Já este primeiro resultado difere, para melhor, de quanto relatado na literatura: Maia et al. (2017), por exemplo, descreveram que os vidros produzidos com a CCA apresentaram comportamento similar ao vidro comercial âmbar (MAIA, 2017). O leve escurecimento apresentado pelo vidro de CCA é oriundo da presença residual de ferro e manganês (Tabela 3) na sua composição, por causa da presença destes contaminantes na fonte de sílica (Tabela 2)

Figura 24. Imagens dos vidros produzidos: A) com CCA e B) com quartzo como fonte de sílica



Fonte: Do autor

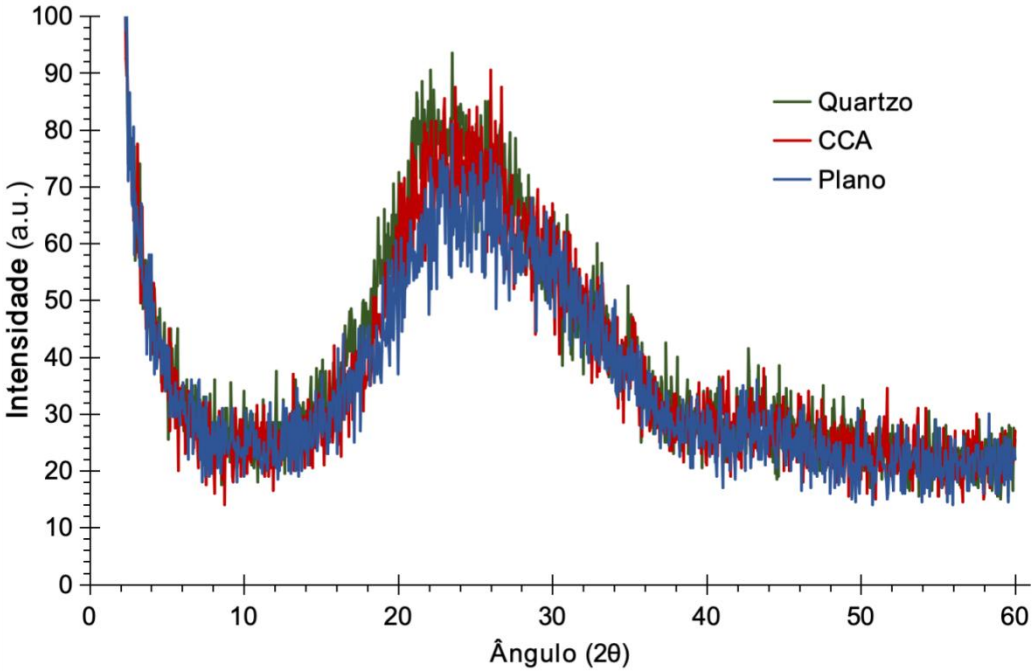
Tabela 3: Composição dos vidros produzidos e o vidro plano comercial.

	SiO2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	S03	SnO2	K_2O	B_2O_3 + Na_2O *
CCA	70,29	8,18	0,383	0,092	0,20	-	-	0,51	20
Quartzo	73,18	5.96	0,76	0.054	0,002	-	-	-	20
Plano	67,69	9,86	1,66	0,105	0,005	0.221	0,045	0,434	20

*calculado por diferença.

Fonte: Do autor

Figura 25- Difratograma dos vidros produzidos e do vidro plano comercial.

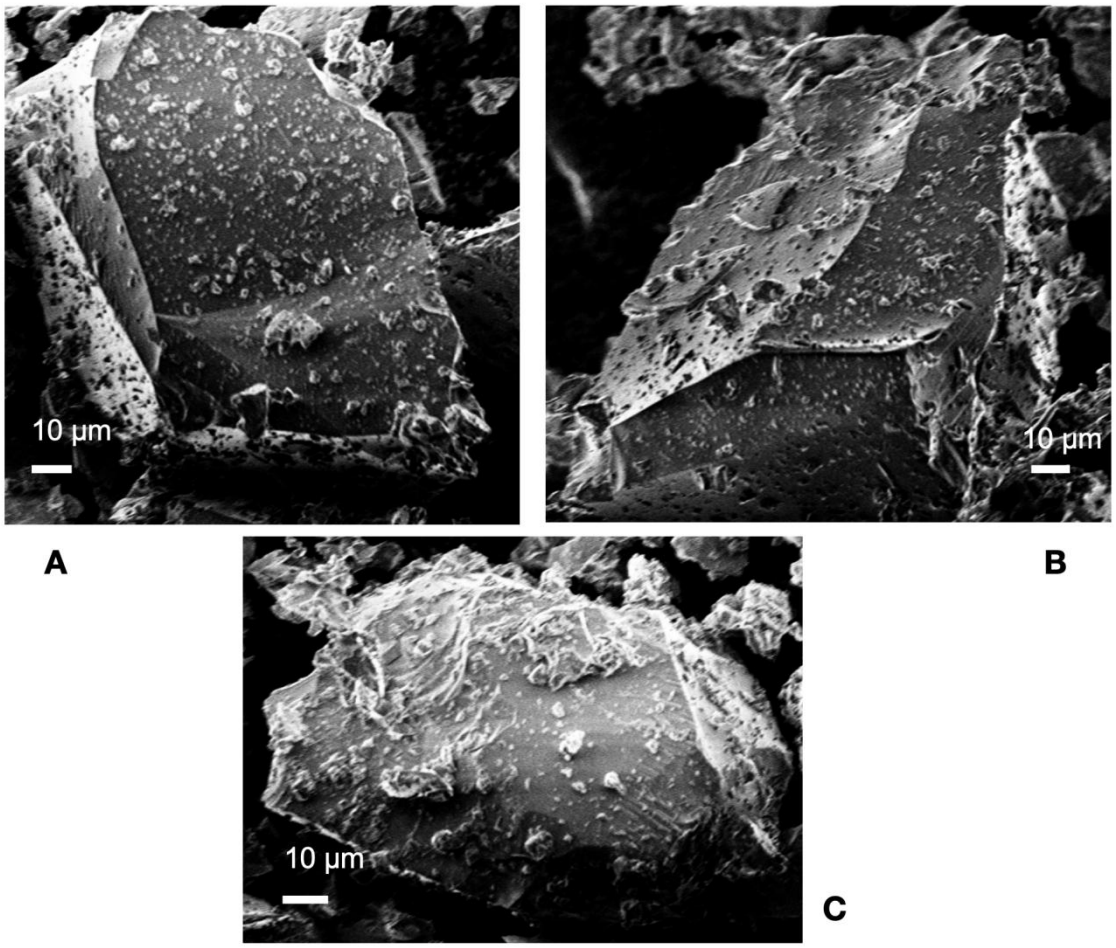


Fonte: Do autor

A Figura 25 representa os difratogramas das amostras de vidro produzidas. A linha vermelha representa o vidro feito com a cinza da casca de arroz, a linha verde o vidro de areia mineral, e a linha azul o vidro plano comercial. As amostras apresentam difratogramas similares com vidros da mesma natureza e comprovada estrutura amorfa, independentemente de qual fonte de sílica foi usada. Vidros de cal-soda puros, bem como a sílica amorfa hidratada obtida de CCA, normalmente mostram um pico amorfo de sílica em 20-22° (ALAMEZI, 2021), também presente neste trabalho. Neste estudo, pela presença de óxido de boro, o vidro se classifica como borossilicato: de fato, os vidros de borosilicato podem apresentar um grande pico amorfo em torno de 25-28° e uma leve protuberância em graus mais altos, tipicamente 45° (ZUO, 2015), como também pode ser visto no gráfico.

Por fim, os vidros foram analisados por espectroscopia eletrônica de varredura para avaliar possíveis diferenças morfológicas, além da presença de micro e nanobolhas. Os vidros foram moídos finamente de forma manual para poder acessar superfícies internas dos materiais. As imagens estão apresentadas na Figura 26: o vidro da CCA está representado em A, o vidro plano em B e o vidro de Quartzo em C.

Figura 26- Micrografia dos vidros produzidos: A) CCA B) Vidro plano e C) Quartzo. Escala: 10 μm.



Fonte: Do autor

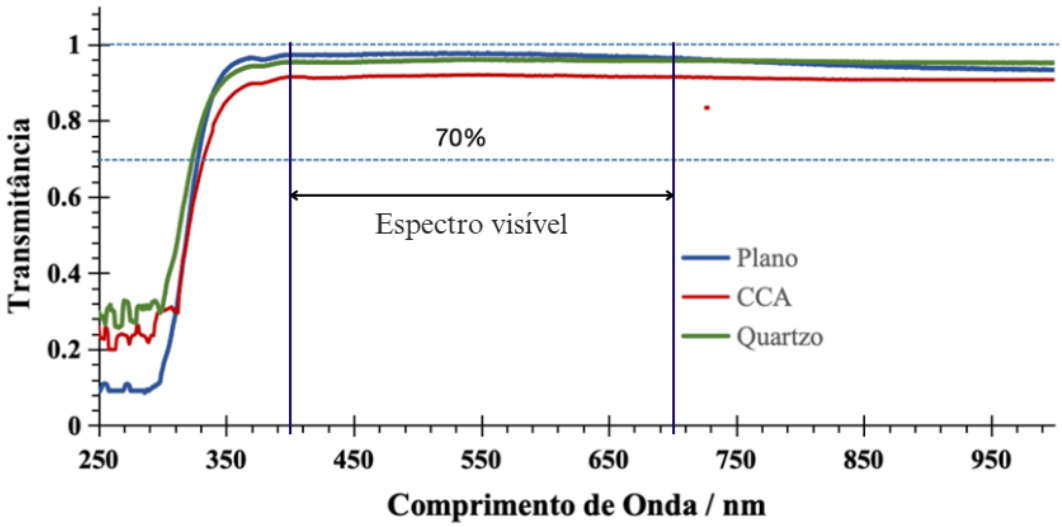
Como é possível perceber, não é possível determinar nenhuma diferença microestrutural, assim como presença de bolhas ou vazios nas amostras.

4.3 Análises das propriedades dos vidros produzidos

4.3.1 Transmissão Óptica

O grau de transmitância na luz visível e ultravioleta em relação ao comprimento de onda nos vidros produzidos foi analisado através de um espectrofotômetro UV-VIS, no intervalo de 250 nm a 1000 nm, conforme representado na Figura 27, que apresenta o comportamento de cada tipo de vidro. As amostras foram lixadas e polidas em ambos os lados previamente à medição, e para compensar as diferentes espessuras, os valores foram ajustados normalizando as espessuras para 1 milímetro. Na Figura 27 são representadas as transmitâncias médias de três amostras diferentes para cada tipo de vidro.

Figura 27 – Transmitância das amostras de vidros da cinza da casca de arroz, de quartzo como fonte de sílica e vidro plano comercial.



Fonte: Do autor

Todos os vidros analisados apresentaram uma aparência visualmente incolor, confirmada pela transmitância constante ao longo de todo o espectro do visível. Conforme já relatado, os vidros de CCA apresentam um leve tom acinzentado, confirmado pela diminuição da intensidade de transmissão de luz (Figura 27, linha vermelha). A transmitância dos vidros de quartzo e comercial podem ser consideradas equivalentes. Com base na literatura (MAIA, 2017) e de acordo com a norma ABNT NBR 7199, para que um vidro seja classificado como transparente, é necessário que mais de 70% da luz incidente (linha tracejada) seja transmitida através da amostra. Assim, pode-se concluir que os vidros, independentemente da fonte de sílica utilizada, são considerados opticamente transparentes no espectro do visível entre 400 e 700nm como é possível identificar na Figura 27.

4.3.2 Densidade

A densidade dos vidros produzidos foi determinada em triplicata baseado no deslocamento de volume para cada tipo de vidro. A densidade média dos vidros produzidos foi obtida dividindo-se a massa pela média dos deslocamentos de volume, conforme apresentado na Tabela 4 e 5.

Tabela 4 – Tabela das médias de deslocamento e massa das amostras.

	CCA	Quartzo	Plano	CCA	Quartzo	Plano

Tipo de Vidro:	Volume Deslocado Médio (ml)			Massa (g)		
Amostra 1	1,43	1,9	2,77	3,3946	4,4459	6,0897
Amostra 2	1,73	2,03	2,73	3,6488	5,0444	6,0113
Amostra 3	1,33	2	2,73	3,5953	5,0206	5,8036

Fonte: Do autor

A densidade obtida para os vidros CCA foi de 2,38996 ± 0,2 g/cm^3, enquanto para os vidros de Quartzo foi 2,4437 g/cm^3. Podemos notar que a densidade para a amostra comercial plana de areia revelou-se menor, registrando 2,17454 g/cm^3.

Tabela 5 – Tabela das densidades das amostras.

Tipo de Vidro	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Densidade Média (g/ml)
	Densidade (g/ml)			
CCA	2,37	2,11	2,7	2,390 ± 0,2
Quartzo	2,34	2,48	2,51	2,444 ± 0,07
Plano	2,20	2,2	2,12	2,175 ± 0,03

Fonte: Do autor

Considerando os critérios de densidade estabelecidos pela norma NBR NM 297:2004, que trata de vidros planos, e as orientações da norma NBR 7199:2016, é previsto que vidro sódico-cálcico apresentem densidade de 2,5 g/cm³. Conforme os valores apresentados na Tabela C, podemos afirmar que os vidros produzidos neste estudo respeitam os limites estabelecidos; por outro lado, o vidro plano comercial avaliado aparenta possuir uma densidade levemente inferior. Comparou-se assim a densidade média de três amostras distintas através do teste estatístico t de Student com nível de confiança de 0,05%. A análise entre as amostras de CCA (2,390 ± 0,242 g/ cm³) e Plano (2,175 ± 0,036 g/ cm³) não revelou diferença estatisticamente significativa, com um valor de t = 1,53 e p = 0,743, indicando que as densidades médias dessas amostras são comparáveis dentro do nível de confiança adotado (α = 0,05). Por outro lado, a comparação entre Plano (2,175 ± 0,036 g/ cm³) e Quartzo (2,444 ± 0,074 g/ cm³) apresentou uma diferença significativa, com t = -5,66 e p < 0,05, sugerindo que a densidade do vidro Quartzo é significativamente maior que a do vidro Plano. Por fim, o teste revelou que não há diferença significativa entre os vidros CCA e Quartzo (t = 0,37

e p = 0,7304), reforçando assim que a diferente fonte de sílica não afeta esta propriedade do material.

4.3.3 Densidade de microbolhas

A densidade de microbolhas é outro aspecto importante na avaliação do comportamento mecânico de um vidro produzido, pois essas bolhas ou sementes podem ser uma fonte de fragilidade estrutural. A análise dos resultados da tabela 6 indica que todas as amostras submetidas ao teste, independentemente de sua fonte de sílica, apresentaram o mesmo resultado: nenhuma microbolha foi encontrada.

Tabela 6 - Densidade de microbolhas dos vidros produzidos.

Tipo de Vidro	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**	**Densidade Microbolhas (n°/g)**
	Massa (g)			
CCA	3,3946	3,6488	3,5953	0
Quartzo	4,4459	5,0444	5,0206	0
Plano	6,0897	6,0113	5,8036	0

Fonte: Do autor

A origem das microbolhas são os gases gerados na decomposição térmica dos reagentes (principalmente CO_2) que não conseguem escapar da mistura de vidro derretida, por causa da sua alta viscosidade ou pelo tempo de permanência em altas temperaturas durante o processo não adequado. Neste caso, o resultado indica que o tempo de forno foi suficiente para a eliminação de todo o CO_2 gerado, comprovando a otimização do processo. Dessa forma, todas as amostras estão dentro das conformidades da norma NBR 14910, com valor menor do que duas microbolhas por grama de vidro.

4.3.4 Microdureza

A dureza e a microdureza são propriedades que descreve a capacidade do vidro de resistir à abrasão, penetração ou ser riscado. O valor da microdureza foi obtido através do microdurômetro, esse equipamento determina a dureza em Vickers, através da aplicação de uma carga de 0,5 kgf, por 10 segundos, e das dimensões da indentação feita no material, avaliando a resistência do vidro à penetração. O ensaio foi repetido em triplicata

para cada vidro, a partir de quatro indentações em cada amostra, tendo um total de 12 medidas por tipo de vidro.

Conforme apresentado na Tabela 7, as médias das três amostras indicam uma maior resistência do vidro de Quartzo, 579 ± 25 HV, seguido pelo vidro CCA com 554 ± 7 e por último o vidro comercial plano com 515 ± 37.

Tabela 7 – Variação de microdureza para cada vidro em vickers (HV).

Tipo de Vidro	**Amostra 1**	**Amostra 2**	**Amostra 3**	**Média das Amostras**
CCA	562	552	549	554 ± 25
Quartzo	550	597	590	579 ± 7
Plano	485	557	504	515 ± 37

Fonte: Do autor

O valor de dureza determinado por microindentação Vickers para um vidro de sílica de alta pureza é geralmente encontrado ser em torno de 6,0 GPa, ou 612 VH (MAIA, 2017), enquanto os valores típicos para a maioria dos vidros silicatos apresentam valores aproximadamente 30% inferiores, entre 4,2 e 6,0 GPa (428 - 612 VH). No caso de vidros deste trabalho submetidos ao teste de microdureza Vickers com carga de 100 g, o valor médio observado é cerca de 5,43 GPa, destacando principalmente a similaridade entre as amostras de Quartzo e CCA, o que nos indica propriedades de microdureza semelhantes. Em detalhes, os testes t-Student realizados para comparar as médias de dureza dos diferentes tipos de vidro não identificaram diferenças estatisticamente significativas em um nível de confiança de 95%. Na comparação entre o vidro CCA e o vidro Plano ($t = -1,63$, $p = 0,229$), entre o vidro CCA e o Quartzo ($t = 1,51$, $p = 0,215$), e entre o vidro Plano Comercial e o Quartzo ($t = 2,92$, $p = 0,093$) não houve indicação de diferença significativa. Esses resultados sugerem que as médias de dureza dos vidros testados são similares dentro das condições do experimento.

Na literatura foi encontrado somente um trabalho que apresenta a dureza em Vickers de vidro da cinza da casca de arroz: no estudo de Maia et al. os autores relatam uma dureza de 6,05 ± 0,5 GPa (611,8 ± 51 VH). Tal como outras propriedades, a dureza dos vidros está intimamente ligada à sua composição química, uma vez que a presença de maiores quantidades de óxidos alcalinos e alcalinos terrosos, por exemplo, tendem a

reduzir esse parâmetro (MAIA, 2017). Assim, comparando as duas composições de vidro de CCA, é possível perceber que há concentrações semelhantes desses óxidos (MgO, CaO e K_2O), porém, há pelo menos 3 vezes a mais óxido de alumínio no trabalho de Maia et al., justificando assim a diferença na microdureza encontrada (LIU, 2021).

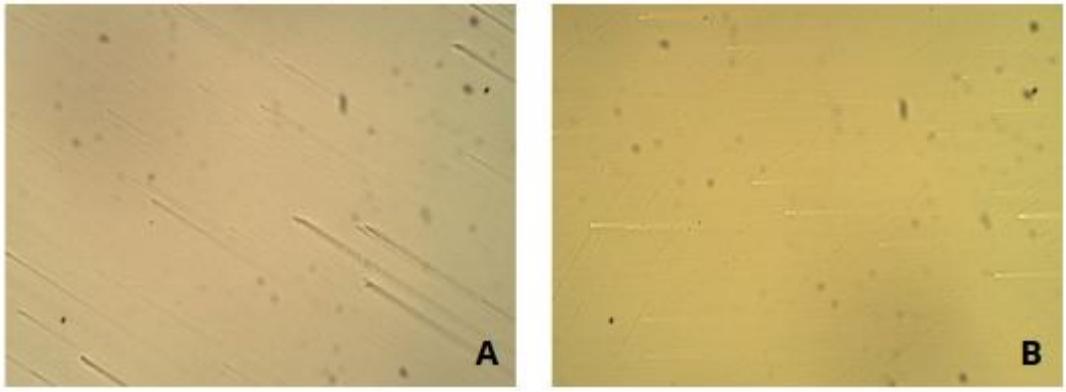
Em geral, novamente pode-se afirmar que as diferentes fontes de sílica não afetam esta propriedade mecânica dos vidros produzidos, encontrando-se em acordo também com o vidro plano comercial.

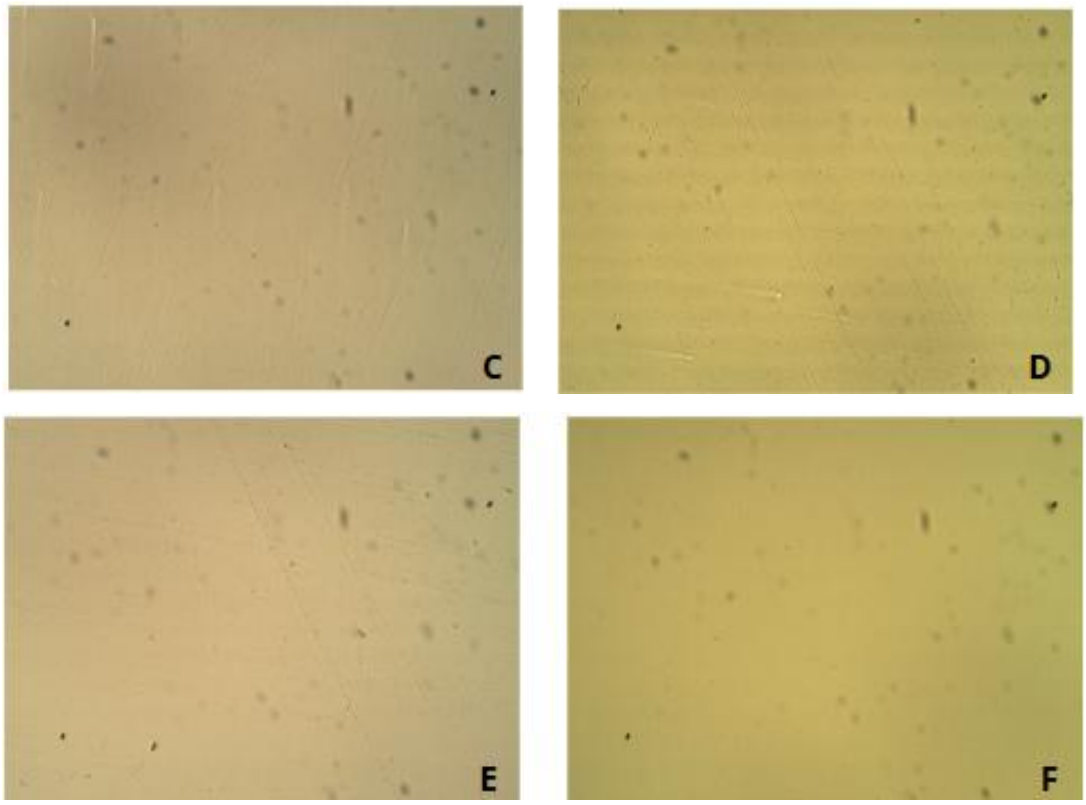
4.3.5 Resistência ao Choque térmico

Os resultados da avaliação de resistência ao choque térmico são apresentados nas Figuras 28, obtidas por meio de microscopia óptica com ampliação total de 100x. A avaliação consiste em analisar o comportamento da superfície do vidro submetido ao ensaio por imagens, verificando a presença de microfraturas ou rachaduras superficiais. Nenhuma das amostras se rompeu durante o ensaio. Todas as amostras foram submetidas a processos de lixamento e polimento antes do experimento.

O comportamento do vidro de Quartzo, produzido com areia mineral, é apresentado na Figura 28 A) antes e B) após o teste de choque térmico. Da mesma forma, as amostras de vidro CCA e de vidro comercial plano são exibidas nas Figuras C, D e E, F, respectivamente.

Figura 28- Vidro de Quartzo (A e B), vidro de Cinza da casca do arroz (C e D) e Vidro comercial plano (E e D) antes e após o teste de choque térmico.

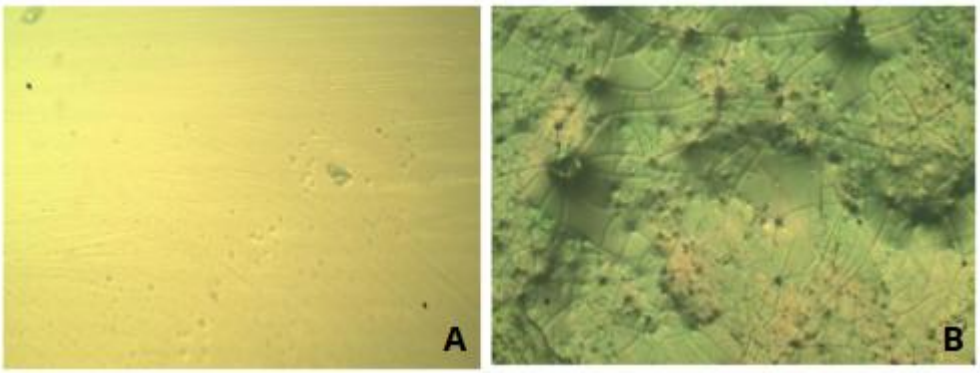




Fonte: Do autor

Nenhuma das amostras sofreu danos visíveis após o teste, evidenciando uma resistência satisfatória ao choque térmico nas condições avaliadas. A variação da temperatura pode gerar tensões internas nos materiais, resultando em rachaduras superficiais, como observadas em estudos de choque térmico. Isso ocorre porque, em um material aquecido de maneira desigual, a camada externa fria tende a encolher mais lentamente que o interior aquecido, gerando tração que, ao exceder o limite de resistência do material, causa danos estruturais. No estudo de Marçal (2023), constatou-se a presença de pequenas rachaduras após o teste de choque térmico, em vidros feitos a 1200°C com cinza da casca de arroz como fonte de sílica (Figura 29).

Figura 29- Vidro feito em 1200°C com cinza da casca do arroz como fonte de sílica submetida ao teste de choque térmico a) antes do teste b) após o teste.



Fonte: Marçal ,2023.

O choque térmico está diretamente relacionado com o coeficiente de expansão térmica, por sua vez intrínseco à composição do vidro. No estudo de Marçal (2023), a composição do vidro apresentava quantidade relativamente baixas de sílica (cerca de 50% em peso), embora compensada por uma grande quantidade de boro (cerca de 40% em peso): a baixa concentração de sílica pura fragiliza o material. Neste trabalho, foi produzido um vidro borossilicato com alta concentração em sílica (Tabela 3), além de uma concentração de óxido de boro de 10%: a presença do Boro é conhecida por atribuir um menor coeficiente de expansão térmico e de consequência uma melhor resistência a variações abruptas de temperatura, até mais de 100 °C (YUE, 2021). Os vidros comerciais borossilicatos Pyrex, por exemplo, utilizados para a formulação de vidros domésticos próprios para o uso em fornos elétricos e microondas, com alta resistência ao choque térmico, possuem em média 13% em peso deste elemento (YUE, 2021). Além disso, conforme Sehgal et al estudaram, pequenas alterações na receita de vidro de cal-soda podem inferir mudanças significativas na propriedade de fragilidade do material. Particularmente, a adição de potássio, magnésio e alumina como substitutos de sódio e cálcio em um sistema ternário de cal-soda mostrou uma diminuição substancial na fragilidade (SEHGAL, 1998). Neste trabalho, as adições minerais mencionadas são partes constituintes da CCA, conforme demonstrado pelos resultados de FRX na Tabela 2 e, portanto, podem ser a causa de uma resistência térmica ligeiramente aprimorada.

4.3.6 Resistência a Adsorção de água

Para a utilização de vidros sódico-cálcico e borossilicatos em recipientes de alimentos, é importante estudar se o vidro é quimicamente resistente, principalmente a água e soluções aquosas neutras. Neste caso, é importante monitorar variações de pH e a

diminuição da massa da amostra, fatores avaliativos que podem comprovar um processo de lixiviação de íons do vidro para a solução. A norma NBR 16184 (2021) estabelece as direções do ensaio: com isso, após 90 h de contato de cada vidro produzido neste trabalho e o vidro plano comercial com água destilada, os valores de pH registrados e as massas das amostras são apresentados na Tabela 8. As medidas são as médias de amostras em triplicatas.

Tabela 8 – Variação de massa e pH de cada vidro

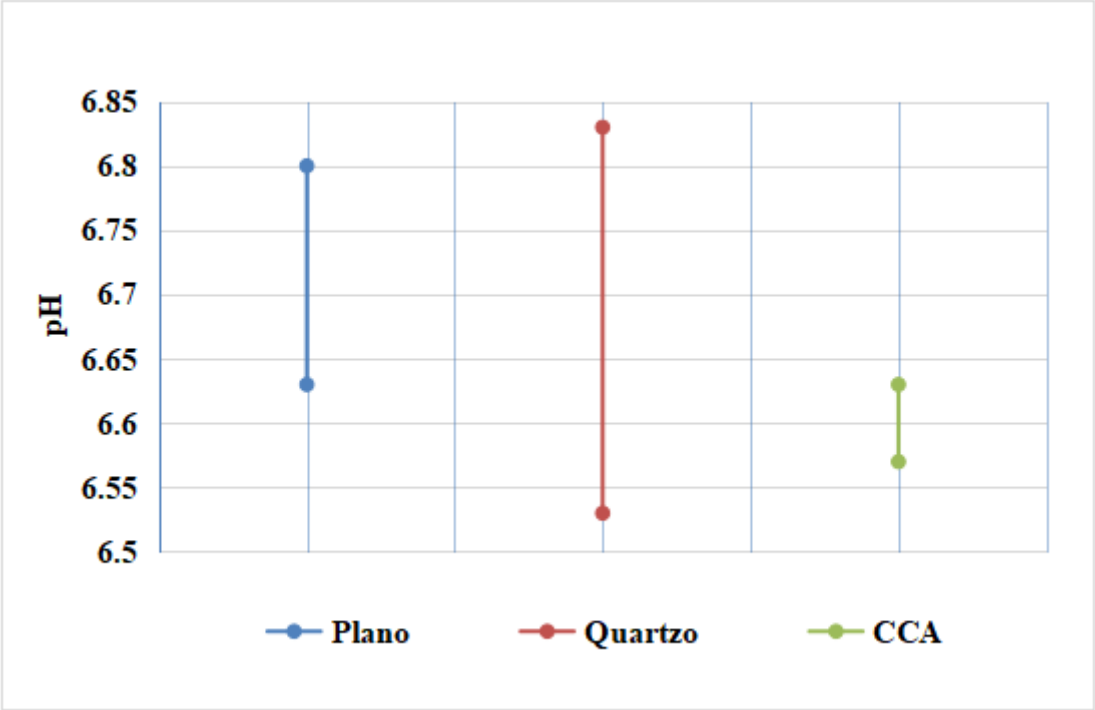
	CCA	Quartzo	Plano
Massa inicial (g)	2,7544 ± 0,3	3,3986 ± 0,3	5,94 ± 0,1
pH 0h	6,57 ± 0,07	6,53 ± 0,03	6,63 ± 0,03
pH 3h	6,47 ± 0,03	6,53 ± 0,03	6,73 ± 0,03
pH 9h	6,43 ± 0,03	6,6 ± 0,03	6,6 ± 0,1
pH 25h	6,63 ± 0,07	6,8 ± 0	7,13 ± 0,07
pH 45h	6,87 ± 0,1	6,8 ± 0,06	7,1 ± 0,06
pH 75h	6,57 ± 0,03	6,47 ± 0,03	6,47 ± 0,1
pH 90h	6,63 ± 0, 03	6,83 ± 0,03	6,8 ± 0,1
Massa final (g)	2,7509 ± 0,4	3,3985 ± 0,3	5,939 ± 0,1

Fonte: Do autor

Os valores médios de massa inicial e final, expressos com seus respectivos desvios padrão, foram: CCA (2,7544g ± 0,4g antes e 2,7509g ± 0,4 g depois), Quartzo (3,3986g ± 0,3g antes e 3,3985g ± 0,3g depois) e Plano (5,94g ± 0,1g antes e 5,9390g ± 0,1g depois). Após o período de 90 horas de ensaio, as amostras apresentaram resultados próximos em termos de variação: o vidro CCA perdeu 0,125% de sua massa, a de Quartzo registrou uma perda de 0,003%, e a de vidro comercial plano, 0,016%. Utilizou-se o teste t de Student para comparar as massas antes e depois do experimento, verificando que não houve diferença estatisticamente significativa em nenhum dos materiais testados ($p > 0,05$), o que indica que as perdas de massa foram mínimas e dentro do erro experimental.

Referente à variação de pH, conforme representado na Figura 30, observa-se que nenhum dos três tipos de vidro apresentaram mudança significativa neste parâmetro. Em todos os casos houve um leve aumento, para pH mais básicos, mas dentro de uma variação mínima de 0,905% (vidro CCA) e máxima de 4,4% (vidro Quartzo).

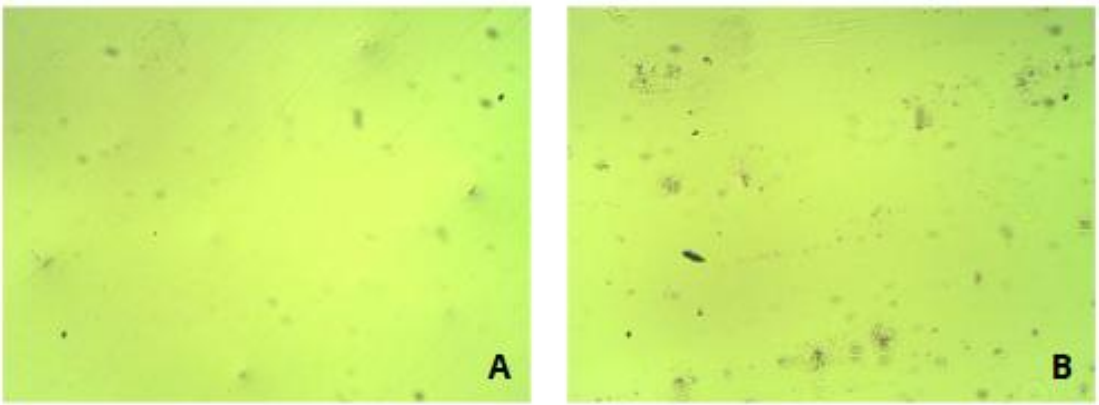
Figura 30 – Variação pH de cada vidro.

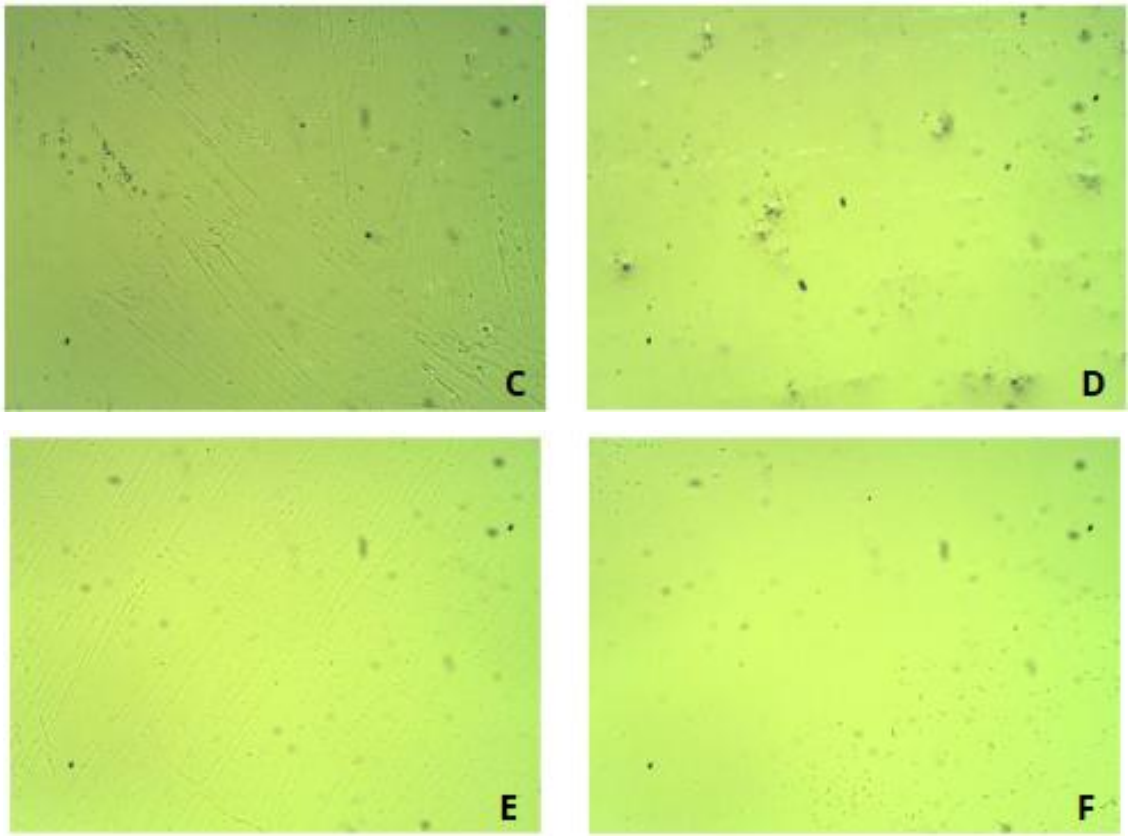


Fonte: Do autor

Além das variações de massa e pH, a norma NBR 16184:2021 estabelece a análise visual das amostras antes e depois do ensaio: as amostras não podem aparecer embaçadas ou apresentar halo de luz quando analisadas no microscópio óptico, o que não é encontrado nas amostras apresentadas na Figura 31 que não diferem após o teste.

Figura 31- Vidro de Quartzo (A e B), Vidro comercial plano (C e D) e vidro de Cinza da casca do arroz (E e D) antes e após o teste de choque térmico.





Fonte: Do autor

A análise dos resultados visuais referentes à resistência à adsorção em água mostrou que todas as amostras estão de acordo com os parâmetros exigidos, conforme com a norma NBR 16184:2021. Assim, é possível afirmar que não ocorreu lixiviação em nenhuma amostra sua superfície manteve-se sem embaçar ou perder o brilho.

4.3.7 Resistência ao Ataque ácido

Uma segunda análise importante da resistência químicas dos vidros é a capacidade de resistir à lixiviação por ataque de soluções ácidas. Novamente, a norma NBR 16184 (2021) define os parâmetros a serem analisados, sendo, novamente, a perda em massa e a variação de pH. Na Tabela 9 é possível verificar que após o período de 90 horas imerso em solução de ácido clorídrico com pH inicial de 5,5, todas as amostras elevaram seu pH: o vidro de CCA apresentou um pH final de 6,03; o vidro de Quartzo de 6,00 e o vidro Plano comercial para 6,17 ± 0,1.

Tabela 9 – Variação de massa e pH para cada tipo de vidro.

	CCA	Quartzo	Plano
Massa inicial	2,7759 ± 0,2	3,2431 ± 0,1	6,1061± 0,02
Massa final	2,7755 ± 0,2	3,2431 ± 0,1	6,1053 ± 0,02
pH após ataque	6,03	6,00 ± 0,06	6,17 ± 0,09

Fonte: Do autor

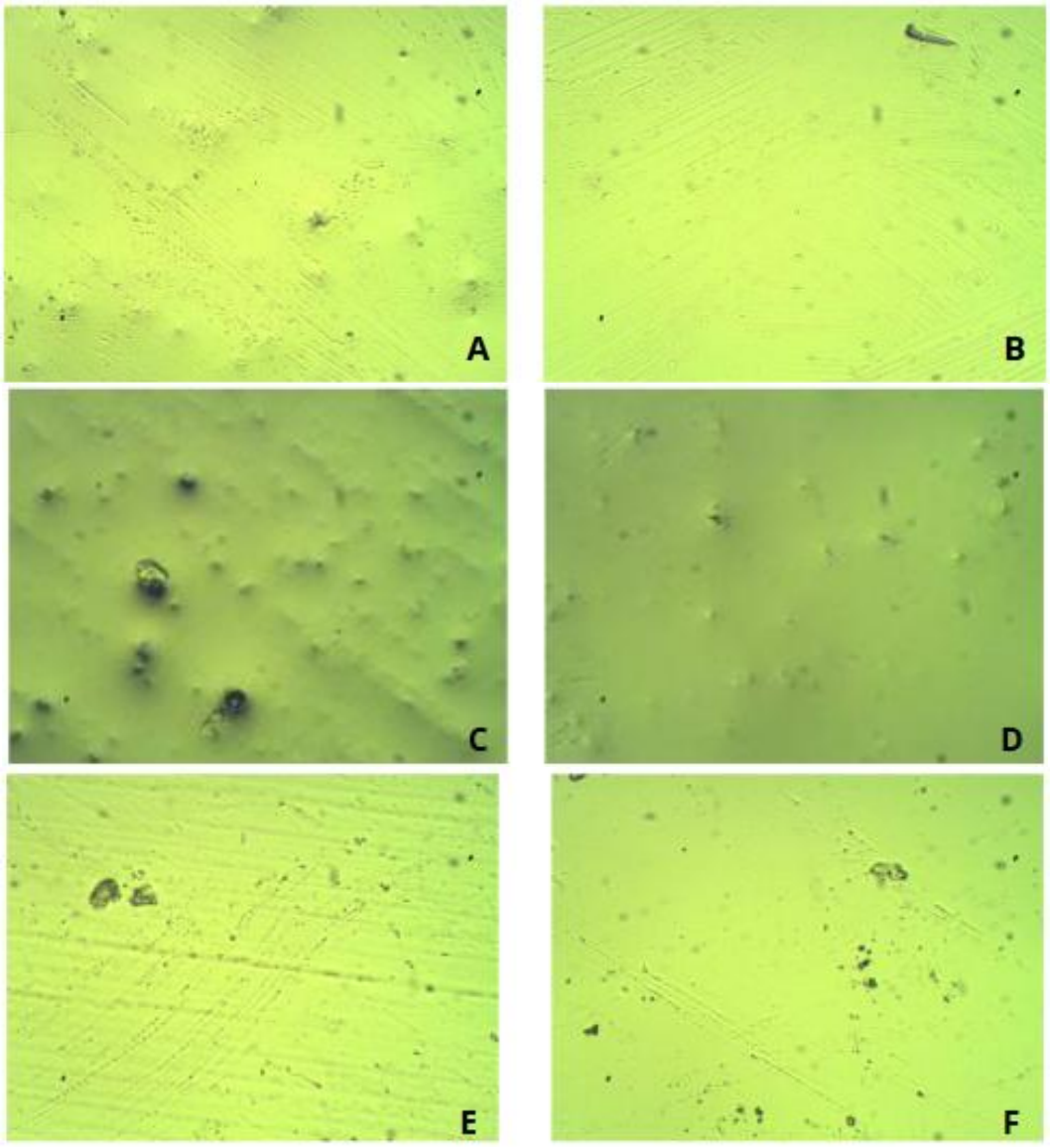
A análise estatística referente ao aumento de pH entre os três tipos de vidro CCA, Quartzo e Plano foi realizada com o teste t de Student para amostras em pares. Os resultados mostraram que não houve diferença estatística entre os vidros CCA e Quartzo. Por outro lado, ambos vidros CCA e Quartzo apresentaram diferença significativa em respeito à variação de pH do vidro Plano. De qualquer forma, o pH foi mantido na região da neutralidade, indicando que o ácido não afetou este parâmetro de forma incisiva.

Referente à perda de massa, para o vidro CCA, a diferença observada entre as massas antes (2,7759 ± 0,2 g) e depois (2,7755 ± 0,2 g) foi extremamente pequena. O vidro Quartzo não apresentou qualquer alteração nas medições, com as massas antes e depois do teste sendo idênticas (3,2431 ± 0,1 g), indicando ausência de perda de massa dentro do erro experimental. Para o vidro Plano, a diferença entre as massas antes (6,1061 g) e depois (6,1053 g) foi também mínima. As perdas de massas percentuais foram de 0,0156%, 0,001% e 0,0131%, respectivamente. Os resultados obtidos não indicaram diferenças estatisticamente significativas entre as medições realizadas antes e depois do experimento. Dessa forma, pode-se concluir que, sob as condições experimentais utilizadas, todos os tipos de vidro apresentaram comportamentos semelhantes em termos de perda de massa, sem evidência de uma diferença estatisticamente relevante entre eles.

A eventual perda de massa de um vidro em contato com soluções ácidas está principalmente associada à lixiviação de sódio: como Jang et al. relataram, a lixiviação ácida pode reduzir até 2% do sódio presente na superfície (JANG, 2000). Além disso, Smith et al. também relataram uma depleção de sódio de 60 nm após 4 dias de contato ácido em vidros de cal-soda (SMITH, 2008). O aspecto morfológico e a perda de massa podem ser atribuídos ao mesmo processo: como Smith et al. inferiram, o ácido converte os sais de silicato com sódio e cálcio em grupos Si-OH ativos, quebrando as ligações H e abrindo a rede de sílica, modificando visivelmente a superfície do vidro (Smith, 2008). A mesma pode vir a apresentar uma névoa ou superfície esbranquiçada, ou ainda iridescente. Por isso, a norma NBR 16184 (2021) também determina análise visuais e de

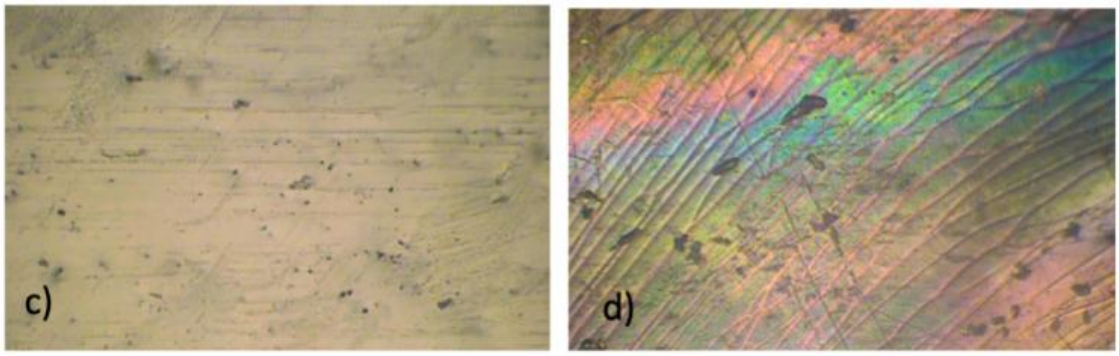
microscopia óptica, para comparar as amostras antes e depois do ensaio. A Figura 32 mostra as amostras antes e depois do ataque ácido. Nas imagens das amostras antes do ataque, observa-se uma superfície lisa, sem microfraturas e com coloração uniforme. Após o ataque ácido, não foram detectadas microfraturas, desgastes na superfície ou alterações na coloração, diferentemente do que foi relatado por Marçal (2023). Neste trabalho, a partir de vidro da CCA com concentração bem inferior de sílica (40% em massa), os autores identificaram mudanças indicativas na superfície das amostras, confirmando o processo de lixiviação ácida (Figura 33).

Figura 32- Vidro de Quartzo A) antes do teste B) após o ataque ácido. Vidro de Cinza da casca do arroz C) antes do teste D) após o ataque ácido. Vidro comercial plano E) antes do teste F) após o ataque ácido.



Fonte: Do autor

Figura 33- Vidro produzido a 1200°C com CCA como fonte de sílica c) antes e d) depois o ataque ácido.



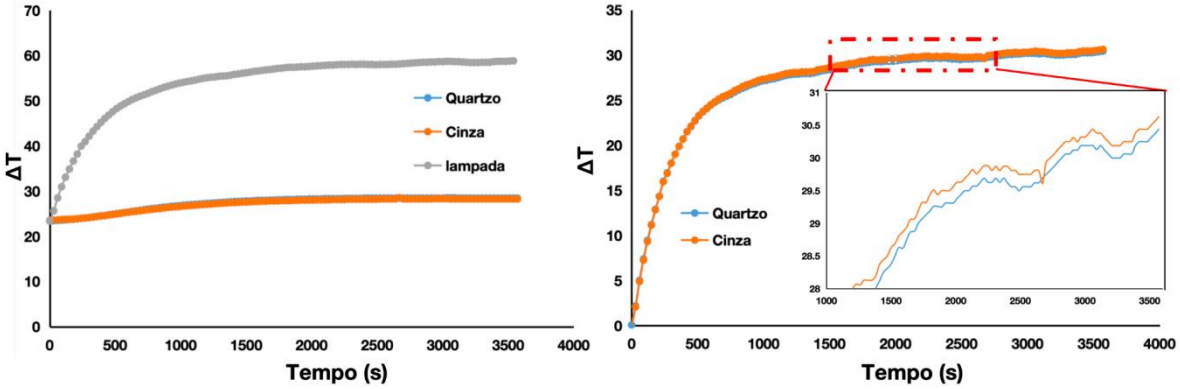
Fonte: Marçal, 2023.

Baseados nos resultados apresentados, novamente é possível afirmar que os vidros produzidos com diferentes fontes de sílica, principalmente a CCA, e o vidro comercial são resistentes ao ataque de soluções ácidas, e se encontram dentro da norma NBR 16184:2021. Comercialmente, a resistência química da superfície ao ataque ácido e à umidade é provavelmente a característica mais importante para frascos e garrafas farmacêuticas, bem como para recipientes da indústria alimentícia. Marçal (2023) também explorou o uso da cinza da casca de arroz na produção de vidros com baixa temperatura, submetendo ao teste de ataque ácido no qual o vidro atendeu os requisitos da norma (ABNT, 2004).

4.3.8 Estudo lab-made para condutividade térmica

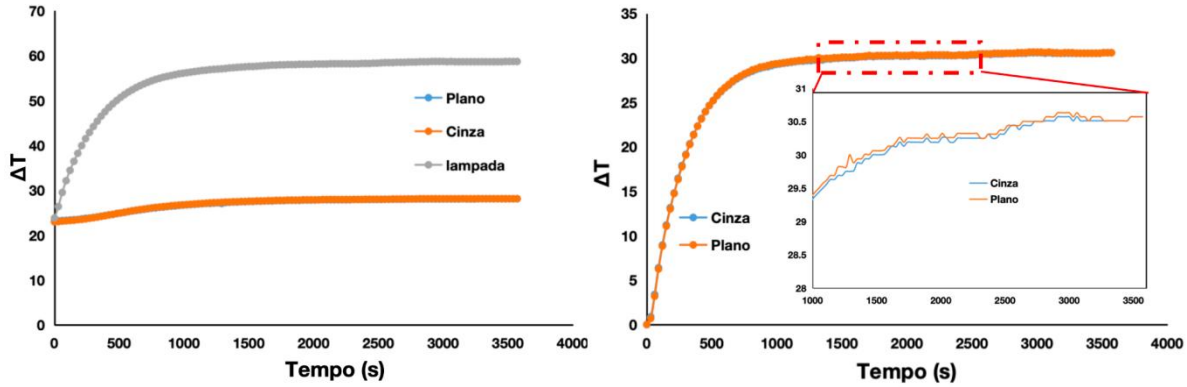
O estudo de condutividade térmica foi efetuado em uma instrumentação montada *ad-hoc*. Em pares, os vidros de CCA, Quartzo e Plano foram utilizados em um ambiente isolante como única abertura, frente a uma fonte de calor de 15W. O monitoramento por 1 h da temperatura na câmara da lâmpada, e nas câmeras tendo como abertura as amostras de vidro, estão no Anexos 1, 2 e 3 e melhor relatados nas Figuras 34, 35 e 36, respectivamente, para o par Cinza-Quartzo, CCA- Plano e Quartzo-Plano que apresentam gráficos semelhantes.

Figura 34 – Cinza vs Quartzo.



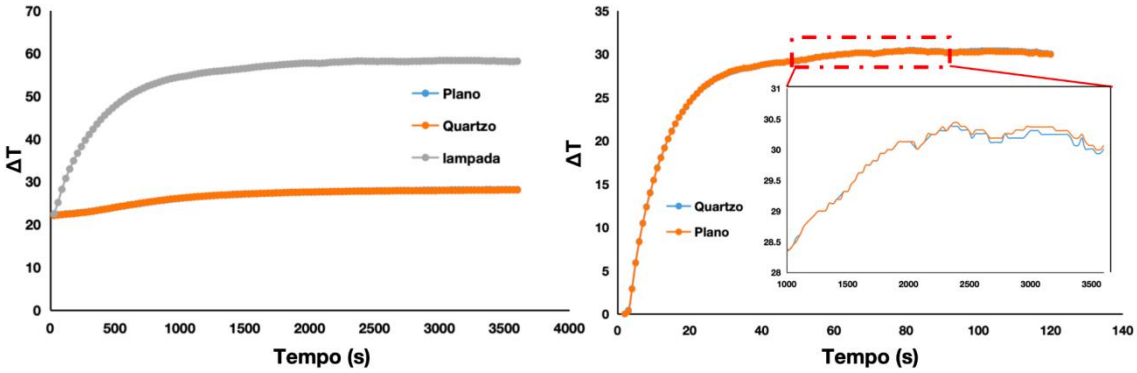
Fonte: Do autor

Figura 35 – CCA vs Plano.



Fonte: Do autor

Figura 36 – Quartzo vs Plano.



Fonte: Do autor

Como é possível observar nos gráficos, a temperatura aumentou de forma muito maior no ambiente da lâmpada, mostrando um certo poder de isolamento térmico dos vidros produzidos (Figura 34, 35 e 36 A). Calculando a diferença entre a temperatura interna de cada câmera com a temperatura do ambiente da lâmpada (Figura 34, 35 e 36 B) é possível perceber que a diferença entre os três vidros é imperceptível, chegando a

décimos de graus, conforme confirmado pelos *insets*. Com estes resultados, é possível especular que as propriedades de dissipação térmicas e condutividade térmica dos vidros produzidos e do vidro comercial são similares.

Além disso, a partir dos resultados obtidos no teste foi possível efetuar o cálculo de coeficiente de condutividade térmica dos vidros produzidos utilizando a Lei de Fourier, apresentada pela Equação 1.

Para determinar a condutividade térmica foi utilizado como padrão o valor de k de 1,00 W/(m·K) do vidro plano comercial, estabelecido pela norma NBR 7199:2016. A partir desse parâmetro foi possível efetuar o cálculo do fluxo de calor, realizado após o equilíbrio térmico. O mesmo fluxo de calor, sob as mesmas condições experimentais, foi aplicado para determinar a condutividade térmica (k) das amostras de Cinza de casca de arroz e de Quartzo, utilizando a Equação 1 e listado na Tabela 10.

Tabela 10 - Fluxo de calor (ϕ) e condutividade térmica (k) dos vidros.

Vidro	**k (W/m * K)**	**A (m²)**	**ΔT (K)**	**l (m)**	**ϕ (W)**
Plano	1,00	0,0001	30,57	0,004	0,75
Quartzo	0,998	0,0001	30,07	0,004	0,75
CCA	0,979	0,0001	30,63	0,004	0,75

Fonte: Do autor

Os vidros foram lixados e polidos para que alcançassem a espessura do vidro plano, de 4 mm. Os valores encontrados de k refletem o comportamento registrado durante o experimento, ou seja, a condutividade térmica dos três vidros é equivalente. No trabalho de Maia et al. (2017), também foi encontrado um valor de k de 1,19 ± 0,01 W/mK, levemente superior ao deste trabalho. Os autores relatam que a presença mais expressiva de MgO (3,52 % massa) acaba aumentando o valor de condutividade e dissipação de calor.

4.3.9 Determinação de acidez de Azeite de oliva

Após todas as análises anteriores terem demonstrado que os vidros de CCA, quartzo e plano são equivalentes em termos de propriedades físicas, químicas, térmicas e mecânicas, foi decidido aplicar um teste de uso prático dos vidros de CCA como recipientes comerciais. Pedaços de cada vidro, em triplicata, foram submergidos em azeite de oliva produzido de forma artesanal na cidade de Alegrete, RS. O objetivo do teste foi verificar a alteração do pH do azeite por titulação, o qual pode indicar uma possível oxidação do mesmo, ou seja, diminuição da qualidade do produto. Os valores de pH encontrados até 7 dias de armazenamento estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 11 – Variação de pH de cada tipo de vidro em 3 e 7 dias após o início do teste.

Tipo de vidro	Média do pH em 3 dias	Média do pH em 7 dias
Cinza da casca de arroz	0,6525 ± 0,05	0,8063 ± 0,04
Quartzo	0,7018 ± 0	0,8416 ± 0,04
Plano comercial	0,6851± 0,07	0,9790 ± 0,06
Controle	0,6014 ± 0,04	1,1229 ± 0,1

Fonte: Do autor

Os resultados do teste de determinação de acidez do azeite após imersão indicaram, inicialmente, após 3 dias, uma menor influência do vidro CCA no aumento da acidez, com diferença significativa em relação ao vidro de Quartzo. O vidro comercial plano apresentou comportamento semelhante ao vidro CCA, sem diferença estatística entre eles, mas com diferença significativa em relação ao vidro de Quartzo. Contudo, após 7 dias, foi observado que o azeite imerso no vidro comercial plano apresentou um nível de acidez significativamente maior em comparação aos vidros CCA e Quartzo, enquanto não houve diferença significativa entre os vidros CCA e Quartzo. Para fins de comparação, foi realizado ao mesmo tempo o teste controle, ou seja, a mesma quantidade de azeite, sem nenhuma amostra de vidro, foi monitorada. O resultado demonstrou que, estatisticamente,

não houve alteração do grau de oxidação do azeite, detectado através da medida de pH relatada. Além disso, o vidro da CCA e o vidro quartzo se encontram estatisticamente diferentes em respeito ao teste controle, inferindo que o contato com o vidro, de alguma forma, protegeu a qualidade do alimento.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliada a possibilidade de produzir vidros borossilicatos utilizando cinza da casca de arroz como fonte de sílica. Para comprovar o processo de produção, vidros com a mesma formulação e procedimento foram produzidos no laboratório utilizando areia mineral comercial (quartzo) de indústria vidreira, e um vidro comercial plano de vidraçaria foi utilizado como amostra controle. Para confirmar a aplicação prática dos vidros de cinza de arroz obtidos, os vidros foram amplamente caracterizados morfologicamente e quimicamente, além de serem avaliados frente às propriedades mecânicas, físicas, térmicas e químicas, seguindo normativas específicas brasileiras do material vidro comercial. Além disso, para testar a aplicação comercial como recipiente, os vidros produzidos foram colocados em contato com azeite de oliva, demonstrando que não há nenhuma alteração do produto. Os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que vidros produzidos utilizando a cinza proveniente da casca de arroz como substituição de fonte de sílica são equivalentes aos produzidos com quartzo, bem como, os vidros planos sódico-cálcicos amplamente comercializados. Desta forma, concluímos que a utilização da CCA no processo de produção de vidros é viável comercialmente, impactando positivamente no meio ambiente ao substituir a matéria-prima finita e de extração prejudicial à natureza, além de destinar um resíduo amplamente gerado no Brasil e no mundo. Esta solução agrega valor à CCA e contribui significativamente para a sustentabilidade na indústria de vidros.

5.1 Perspectivas futuras.

Este trabalho apresenta uma evolução em relação aos estudos anteriores, que produzem vidro a partir da cinza da casca do arroz em temperaturas de 1200ºC. No entanto, é essencial que futuras pesquisas se concentrem no desenvolvimento de métodos para fabricar recipientes utilizando o vidro produzido a 1500ºC, como proposto neste estudo, permitindo ampliar testes e aprofundar o conhecimento sobre suas propriedades. Sugerem-se

- Análise de Espectroscopia de Dispersão de Energia EDS, capaz de fornecer informações detalhadas sobre a composição da superfície do vidro antes e após os testes de ataque ácido e absprção de água.

- Análise de Dilatometria e Calorimetria, para poder estudar as propriedades térmicas vidros produzidos, como temperatura de transição vítrea e cristalização.

- No que diz respeito à sustentabilidade do vidro de cinza da casca de arroz como fonte de sílica, é possível explorar a incorporação de vidro reciclado na receita em diferentes porcentagens potencializando a contribuição para economia e meio ambiente.

Referências Bibliográficas:

ABDUL SALIM, Z. A. S.; ISMAIL, H.; HASSAN, A.; CHE ISMAIL, N. H.; HASHIM, F. **Characterisation of high purity rice husk silica synthesised using solvent-thermal treatment with different concentration of acid leaching**. Teknologi, 2023.

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 (Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos). Entenda a importância da reciclagem de vidro. 2023. Disponível em: https://abravidro.org.br/entenda-importancia-da-reciclagem-de-vidro/ acesso: 04 de Dezembro de 2023.

ABRAVIDRO (Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos). *O vidro plano*. ed 548, 2018.

AKERMAN, M. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. Apostila: Saint – Gobain Vidros Brasil, Centro técnico de elaboração do vidro, 2000.

ALAZEMI, M. F. F. S.; ABDULLAH, M. N.; MUSTAPHA, F.; ARIFFIN, M. K. A.; SUPENI, E. E. **Effect of rice husk ash addition on the physical properties of soda-lime-silica glass for building glass and window panel.** Journal of Mechanical Engineering and Sciences, v. 15, p. 7771-7780, 2021.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO – ABIVIDRO. 2018. Disponível em: <https://abividro.org.br>. Acesso em: 18 de nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO – ABIVIDRO. VIDRO: O RESÍDUO INFINITAMENTE RECICLÁVEL. 2019. Disponível em:

<https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>. Acesso em: 05 de dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO – ABIVIDRO. O Ciclo do Vidro. Disponível em: https://abividro.org.br/o-ciclo-do-vidro/. Acesso em 30/11/2023.

BERKIN, G. **Heat absorbing glass from rice husk ash for a sustainable environment.** WIT Transactions on Ecology and the Environment, v. 109, p. 521-527, 2008.

BGS. British Geological Survey. **Mineral Planning Factsheet. Silica Sand,** p. 9. 2004. Disponível em: <www.mineralsUK.com> acesso: 04 dez. 2023.

BONDIOLI, F.; BARDIERI, L.; FERRARI, A. M.; MANFREDINI, T.; **Characterization of Rice Husk Ash and Its Recycling as Quartz Substitute for the Production of Ceramic Glazes**. Journal of the American Ceramic Society, v. 93, n. 1, p. 121–126, 2010.

BORGES JÚNIOR, D. M.; **Sustentabilidade nas organizações: uma revisão da literatura sobre seus conceitos fundamentais.** Tekhne e Logos, Botucatu, SP, v. 1, abril de 2023. ISSN 2176-4808.

BOTTI, L. C. M. **Propriedades de barreira em sistemas de embalagem para azeite de oliva**. Tese Mestrado em Tecnologia de Alimentos - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, 2014.

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.

CEMPRE, CONSÓRCIO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Vidro**. Ficha técnica, artigos e publicações. 2018. Disponível em: . Acesso em: 17 Nov. 2023.

CHUNG, C.; KIM, J.. **High Performance Concretes with Highly Reactive Rice Husk Ash and Silica Fume**. Materials, 2023.

COLTRO, L.; MARTON, L. F. M.; PILECCO, F. P.; PILECCO, A. C.; MATTEI, L. F.; **Environmental profile of rice production in Southern Brazil: A comparison between irrigated and subsurface drip irrigated cropping systems**. Journal of Cleaner Production. v. 153, p. 491–505, 2017.

COSTA, J. A. S.; PARANHOS, C. M. **Systematic evaluation of amorphous silica production from rice husk ashes.** Journal of Cleaner Production, v. 192, p. 688–697, 2018.

DA SILVA LORENA, C. G., LESTE, F. Z., Vasco, H. H. B., & FELIX, E. **A ESCASSEZ DA EMBALAGEM DE VIDRO E SEU IMPACTO NAS EXPORTAÇÕES DE VINHOS BRASILEIROS**. ENGETEC, São Paulo, 2022

DAVIS, L. L.; TEPORDEI, V. V.; **Sand and gravel. In: Mineral Facts and Problems**, 1995 Edition, Bureau of Mines, Preprint from Bulletin, v. 675, p. 15, 1985.

DUAN, H.; **Detection of illicit sand mining and the associated environmental effects in China's fourth largest freshwater lake using daytime and nighttime satellite images.** Science of the Total Environment, v. 647, p. 606-618, 2019.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Clima Temperado. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Zoneamento Edafoclimático da Olivicultura para o Rio Grande do Sul.** Brasília, 2013.

FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)**.** **FAO.FAOSTAT** - Classificações: Países por Mercadoria. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity . Acesso em 18 de nov. 2023.

FEITOSA, B. de B.; SAITO, D. K.; J. P. de S.; SOARES, V. F. Relatório 01 - **Água na Indústria (Vidro)**. 2017. Disponível em: Acesso em: 15 nov. 2023

FERNANDEZ, J.M.N.; **El vidrio**, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio, Madrid, ed. 3, 2003.

FERNANDES, M. R. S.; FURTADO, C. R. G.; SOUSA, A. M. F.; **Avaliação de Cinza de Casca de Arroz em Formulações de Bandas de Rodagem**.: 12° Congresso Brasileiro de Polímeros (12° CBPol), Florianópolis, 2013.

FOLETTO, E. L. 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.

FREIRE, L. L. R.; **Indústria de vidros planos,** Caderno setorial ETENE**,** ed. 1, n.3. 2016.

GASQUES, A.C.; **Impactos ambientais dos materiais da construção civil: breve revisão teórica**. Revista Tecnológica. v. 23. n. 1. p. 13-24, 2014.

GONÇALVES, J.; SILVA, G.; LIMA, L.; MORGADO, D.; NALIN, M.; ARMAS, L. E. G.; VALSECCHI, C.; MENEZES, J. W. et al. **Production of Transparent Soda-Lime Glass from Rice Husk Containing Iron and Manganese Impurities**. Ceramics. Vol. 3. n. 4. p. 494-506. 2020.

GRAZIANO, J.H.; BLUM, C.; **Lead Exposure from lead crystal.** Elsevier, v. 337, n. 8734, p. 141-142, 1991.

HACKNEY, C.R.; DARBY, S.E.; PARSONS, D.R.; LEYLAND, J.; BEST, J.L.; ALTO, R.; NICHOLAS, A.P.; HOUSEAGO, R.C.; **Instabilidade da margem do rio devido à mineração de areia insustentável no baixo rio Mekong.** Nat. Sustentar v. 3, n. 3, p. 217– 225, 2020.

HALDIMANN, M; LUIBLE, A; OVEREND, M. **Structural use of Glass**. AIPC-IVBH, Zurique, Suiça, 2008.

HARBEN, P. W. e KUZVART, M.; **Silica**. In: Industrial Minerals – A global Geology. Industrial Minerals Information Ltd, Metal Bulletim, PLC, London, p. 352-364, 1996.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

HOSSAIN, SKS; MATHUR, S.; ROY, PK **Casca de arroz/cinzas de casca de arroz como fonte alternativa de sílica em cerâmica**: Uma revisão. Journal of Asian Ceramic Societies , v. 6, 2018.

HU, L.; HE, Z.; ZHANG, S. **Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement**. Journal of Cleaner Production, São Paulo, v. 264, p. 121744, 2020.
IRGA INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Boletim de Resultados da Lavoura de Arroz - Safra 2020/2021. Porto Alegre**. 2021.

IRGA INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ **- Sílica da casca de arroz garante resistência e durabilidade na construção civil**. Disponível em: http://irga.rs.gov.br. Acesso em: 10 novembro 2023.

ISLABÃO, G. O.; VAHL, L. C.; TIMM, L. C.; PAULO, D. L.; KATH, A. H. **Cinza de casca de arroz como corretivo de acidez do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p. 934-941, 2014.
JANG, H. K., CHUNG, Y. D., WHANGBO, S. W., LYO, I. W., WHANG, C. N., Lee, S. J., LEE, S. **Effects of chemical etching with hydrochloric acid on a glass surface**. Journal of Vacuum Science & Technology A v. p.2563-256,. 2000.

KOEHNKEN, L. **Impacts of Sand Mining on Ecosystem Structure, Process & Biodiversity in Rivers**. Review 2018. World Wildlife Fund (wff).

KOEHNKEN, L.; RINTOUL, M.S.; GOICHOT, M.; TICKNER, D.; LOFTUS, A.C.; ACREMAN, M.C.; **Impacts of riverine sand mining on freshwater ecosystems: A review of the scientific evidence and guidance for future research**; River Research and Applications, v. 36, n. 3, p. 362-370, 2020.

LEE, T.; YEOH, F.-Y. **Development of photoluminescent glass derived from rice husk**. Biomass and Bioenergy , v. 59, p. 380-392, 2013.

LIMA, A. M., TELÖKEN, F. T., HERMES, R. H., MORAES, J. A. R., & SILVA, A. L. E.; **A casca de arroz como fonte de energia em empresas beneficiadoras do grão**. Exacta, v. 17, n. 4, 2019.

LINS, F. F.; ANGELO, S.M.M.A.; OLIVEIRA, J.M.F.; **Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos, MME** (www.mme.gov.br, em publicações/anuários), Cap.4, p. 55-62, 2007.

LIU, Chenxing et al. **Study of high-alumina-silicon glass structure and performance modified by Li_2O replacing Na_2O**. v. 572, p. 121115, 2021.

MAIA, B. G. O., SOUZA, M. T., ARCARO, S., DE OLIVEIRA, T. M. N., WERMUTHC, T. B., NOVAES DE OLIVEIRA A. P., RODRIGUES NETO, J. B. **Caracterização de Vidros Sódico-cálcicos Produzidos a Partir de Resíduos Sólidos.** Cerâmica Industrial, v. 22, p. 32 - 39, 2017.

MARAN, M. A. **Materiais Elétricos: compêndio de trabalhos**. 2010 135 f. Dissertação (Mestrado em Centro de Engenharia e Ciências Exatas) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2010. Disponível em <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendiov1.pdf#page=3>. Acesso em: 20 set. 2013.

MARÇAL, J. M. M. **Contribuições do vidro de cinza de casca de arroz para a sustentabilidade na construção: uma comparação detalhada com o vidro comercial em aberturas.** 2023. 73 f. Engenharia civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete.

MARTINS, J; PINTO, E. **Materiais de Construção I: O Vidro**. Materiais. Lisboa. Ed. 1. 2004.

MATIN, H. H. A., SYAFRUDIN, S., SUHERMAN, S. **Rice Husk Waste: Impact on Environmental Health and Potential as Biogas**. Jurnal Kesehatan Masyarakat, v. 18, p. 3, 2023.

MEDEIROS, M. do S. B.; BARBOSA, R. F.; DE SOUSA, J. E.; ALEXANDRE, S. N.; OLIVEIRA, C. G. dos S. **Gestão Ambiental e Sustentabilidade: Um Estudo de Caso na Agência do Banco do Brasil de Alagoa Nova/PB**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 19, n. 3, p. 256-273, 2015.

MICHEL, M.D.; MIKOWSKI, A.; LEPIENSKI, C.M.; FOERSTER, C.E.; SERBENA, F.C.; **High temperature microhardness of soda-lime glass.** Journal of Non-Crystalline Solids, v. 348, p. 131-138, 2004.

MIURA, E., BENINO, Y., SATO, R., KOMATSU, T. **Universal hardness and elastic recovery in Vickers nanoindentation of copper phosphate and silicate glasses.** Journal of the European Ceramic Society, v. 23, n. 3, p. 409-416, 2003.

NJOKU, I. J., NWAOKAFOR, P., OKEKE, N. K. **Assessment of the contamination of rice husk ash of Izzi CP, Ikwo CP and Izzi R8 rice species of South-Eastern Nigeria.** Environmental Challenges, v. 5, p. 100232, 2021.

PALOMAR, T.; GRAZIA, C.; CARDOSO, I.P.; VILARIGUES, M.; MILIANI, C.; ROMANI, A.; **Analysis of chromophores in stained-glass windows using visible hyperspectral imaging in-situ,** Spectrochim. Acta A, v. 223, p. 117378, 2019.

Panorama do mercado de vinhos. Consultoria Agro Itaúblog: Disponível em: <https://blog.itau.com.br/ibba/agronegocio/radar-agro/radar-agro---panorama-do-mercado-de-vinhos>. Acesso em: <29 de novembro de 2023 >.

PASE NETO, J. **MICROESFERAS PRODUZIDAS A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ PARA APLICAÇÃO NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA HORIZONTAL.** 26 jan. 2023. 68 pg. Engenharia civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 26 jan. 2023.

RAPOPORT, **Botânica y Morfologia**. In: BARRANCO et al. El cultivo del olivo. Madrid. Mundi-prensa. 2004. Capítulo 2, p. 47.

RAVANGYONG, S.; KHUNNARONG, S.; TEMMAWAT, S.; CHAICHALERM, S.; NISSAPA, W.; PINNAK, K.; SRIUMNUAY, B.; SRINWONGSA, S.; GLUMGLOMCHIT, P.; BOONSANG, P.; RUANGTAWEEP, Y.; KAEWKHAO, J.;

Glass production from rice husk ash as an imitation gemstone products. Materialstoday: Proceedings, v. 65, ed. 4, p. 2376-2379, 2022.

RIO GRANDE DO SUL (RS). Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Departamento de Planejamento Governamental, 6ª Ed., Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental, 2021.

ROSA, B. N.; MORAES, G. G.; MAROÇO, M.; DE CASTRO, R. **A importância da reciclagem do papel na melhoria da qualidade do meio ambiente**. 2005. In: XXV Encontro Nac. de Eng. de Produção – Porto Alegre, RS, Brasil, 29 out a 01 de nov de 2005.

SANTOS, W. 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: 04 dez. 2023.

SCHANDL, H. , FISCHER-KOWALSKI, M. , WEST, J. , GILJUM, S. et. al. (2016). **Global Material Flows and Resource Productivity: Forty Years of Evidence: Global Material Flows and Resource Productivity**. Journal of Industrial Ecology, v. 22, n. 1, 2017.

SCHUMM, S.; **Limiares geomórficos: O conceito e suas aplicações.** Transações do Instituto de Geógrafos Britânicos, v. 44, p. 485 – 515, 1979.

Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação. 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: < 23 de novembro de 2023 >.

Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação. Safra Nota Técnica: Evolução da Produção de Azeite de Oliva no RS 2012 - 2022: . Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202208/08161216-nt-evolucao-da-producao-de-azeite-de-oliva-no-rs-2010-2022.pdf>. Acesso em: < 29 de novembro de 2023 >.

SEHGAL, J.; ITO, S. **A new low-brittleness glass in the soda-lime-silica glass family**. Journal of the American Ceramic Society, v. 81, n. 10, p. 2485-2488, 1998.

SHINOHARA, Y.; KOHYAMA, N**. Quantitative analysis of tridymite and cristobalite crystallized in rice husk ash by heating**. Industrial Health, v. 42, n. 3, p. 277-285, 2004.

SHREVE, R. N.; BRINK JR., J. A.; **Indústrias de Vidro.** In: Indústria de Processos Químicos. Tradução de Horácio Macedo, Instituto de Química da UFRJ, Quarta Edição, Editora Guanabara, p. 160-175, 1977.

SILVA, J. O.; BARROS, S. V. A.; DANTAS, G. C. B.; PIMENTEL, P. M. **Caracterização da cinza da casca de arroz visando aplicação na confecção de materiais alternativos para construção civil**. Revista de Ciências Ambientais - RCA, Canoas, v. 14, n. 1, 2020.

TAUFIK, H; SETYAWAN, N; HOERUDIN. **Semi Pilot Scale Study on Production of Silica from Rice Husk Ash**. In: IOP Conference Series, 2023.

TEJERO, I. P. T.; ROSA, A. L. T.; **POTENCIAL DA OLIVICULTURA NO SUL DO BRASIL.** Revista Científica Agropampa, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 114–123, 2020.

THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA. "DRIVERS AND CONSEQUENCES OF INDUSTRIAL-SCALE SAND MINING IN DUBAI". 2018. Disponível em: https://cases.open.ubc.ca/w17t2con200-10/#:~:text=The%20United%20Arab%20Emirates%20imports,is%20done%20on%20Stradbroke%20Island. Acesso em: 02 de dezembro, 2023.

THE EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION. Sustainable sourcing of sand and glass recycling at the heart of the European glass container circular economy. 2020. Disponível em: https://feve.org/wp-content/uploads/2020/02/FEVE-Paper-on-Sand-Final-17022020.pdf.Acesso em: 17 fevereiro, 2020.

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: 27 set. 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: 27 set. 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. Acesso em: 27 set. 2023.

VALARINHO, L. G. **Comportamento estrutural de vigas mistas vidro GFRP**. 2010. 232f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 2010.

VETORRATO, J.G.; GIEHL, J.L.R.; CHITOLINA, S.; BETTKER, D.R.; FREITAS, N.C.W.; **O vidro e a importância de seu processo de reciclagem e logística reversa.** Revista DI@LOGUS, v. 10, n. 1, p. 25-47, 2021.

VIEIRA, E.G.; REZENDE, E.N.; **Exploração Mineral de Areia e um Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado: É possível conciliar?**; Sustentabilidade em Debate – Brasília, v. 6, n. 2, p. 171-192, 2015.

VOGEL, W.; **Classical Theories of Glass Structure.** In: VOGEL, W.; Glass Chemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, ed. 2; p. 41-56, 1994.

WAHAB, S. A. A.; MATORI, K. A.; AZIZ, S.H.A.; ZAID, M. H. M.; AZMAN, A. Z. K.; KHAIDIR, R. E. M.; KHIRI, M. Z. A.; **Effect of ZnO on the phase transformation and optical properties of silicate glass frits using rice husk ash as a SiO2 source**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 5, 2020.

YUE, Y. **Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses.** Borosilicate Glasses. Oxford: Elsevier, 2021. p. 519-539.

ZDUNCZYK, M. J.; LINKOUS, M. A.; **Industrial Sand and Sandstone.** In: Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition, Society for Mining, Metallurgical and Exploration Inc, Donald D. Car Editor, p. 897-891, 1994.

ZUO, C.; ZHOU, Z.; ZHU, L.; XIAO, A.; CHEN, Y.; ZHANG, X.; et al. **Luminescence properties of Tb^{3+}-doped borosilicate scintillating glass under UV excitation.** Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. Elsevier, ed. 147, 2015.

Anexo 1 - Interação dos vidros Quartzo vs CCA

Tempo (s)	Temperatura (°C) Quartzo	Temperatura (°C) CCA	Lâmpada	ΔT Quartzo-lamp	ΔT CCA-lamp
30	23,37	23,5	23,44	0,07	-0,06
60	23,44	23,56	25,62	2,18	2,06
90	23,5	23,62	28,5	5	4,88
120	23,56	23,69	30,94	7,38	7,25
150	23,62	23,75	33,06	9,44	9,31
180	23,69	23,75	34,88	11,19	11,13
210	23,75	23,81	36,63	12,88	12,82
240	23,87	23,87	38,19	14,32	14,32
270	23,94	24	39,94	16	15,94
300	24	24,06	40,94	16,94	16,88
330	24,12	24,12	42,13	18,01	18,01
360	24,25	24,25	43,25	19	19
390	24,37	24,37	44,25	19,88	19,88
420	24,5	24,5	45,19	20,69	20,69
450	24,56	24,56	46,06	21,5	21,5
480	24,75	24,69	46,81	22,06	22,12

510	24,87	24,81	47,56	22,69	22,75
540	25	24,94	48,25	23,25	23,31
570	25,12	25,06	48,81	23,69	23,75
600	25,25	25,19	49,31	24,06	24,12
630	25,37	25,31	49,81	24,44	24,5
660	25,5	25,44	50,25	24,75	24,81
690	25,62	25,5	50,63	25,01	25,13
720	25,75	25,62	51	25,25	25,38
750	25,87	25,75	51,31	25,44	25,56
780	26	25,87	51,63	25,63	25,76
810	26,12	25,94	52	25,88	26,06
840	26,19	26,06	52,31	26,12	26,25
870	26,31	26,12	52,63	26,32	26,51
900	26,44	26,25	52,94	26,5	26,69
930	26,5	26,37	53,19	26,69	26,82
960	26,62	26,44	53,44	26,82	27
990	26,69	26,5	53,69	27	27,19
1020	26,75	26,56	53,88	27,13	27,32
1050	26,87	26,69	54,06	27,19	27,37

1080	26,94	26,75	54,25	27,31	27,5
1110	27	26,81	54,38	27,38	27,57
1140	27,06	26,87	54,56	27,5	27,69
1170	27,12	26,94	54,75	27,63	27,81
1200	27,19	27	54,94	27,75	27,94
1230	27,25	27,06	55,06	27,81	28
1260	27,31	27,12	55,19	27,88	28,07
1290	27,37	27,19	55,25	27,88	28,06
1320	27,44	27,25	55,38	27,94	28,13
1350	27,5	27,31	55,44	27,94	28,13
1380	27,56	27,37	55,5	27,94	28,13
1410	27,62	27,44	55,63	28,01	28,19
1440	27,69	27,44	55,81	28,12	28,37
1470	27,69	27,5	55,94	28,25	28,44
1500	27,75	27,56	56,06	28,31	28,5
1530	27,81	27,56	56,19	28,38	28,63
1560	27,81	27,62	56,31	28,5	28,69
1590	27,87	27,69	56,5	28,63	28,81
1620	27,94	27,69	56,56	28,62	28,87

1650	27,94	27,75	56,69	28,75	28,94
1680	27,94	27,75	56,81	28,87	29,06
1710	28	27,81	56,88	28,88	29,07
1740	28	27,81	57	29	29,19
1770	28,06	27,81	57,13	29,07	29,32
1800	28,06	27,87	57,19	29,13	29,32
1830	28,12	27,87	57,31	29,19	29,44
1860	28,12	27,87	57,38	29,26	29,51
1890	28,12	27,94	57,38	29,26	29,44
1920	28,19	27,94	57,44	29,25	29,5
1950	28,19	28	57,5	29,31	29,5
1980	28,19	28	57,5	29,31	29,5
2010	28,25	28	57,56	29,31	29,56
2040	28,25	28	57,63	29,38	29,63
2070	28,25	28,06	57,69	29,44	29,63
2100	28,25	28,06	57,75	29,5	29,69
2130	28,31	28,06	57,81	29,5	29,75
2160	28,31	28,06	57,88	29,57	29,82
2190	28,31	28,12	57,88	29,57	29,76

2220	28,31	28,12	57,94	29,63	29,82
2250	28,31	28,12	58	29,69	29,88
2280	28,37	28,12	58	29,63	29,88
2310	28,37	28,19	58	29,63	29,81
2340	28,37	28,19	58,06	29,69	29,87
2370	28,37	28,19	58	29,63	29,81
2400	28,37	28,19	58,06	29,69	29,87
2430	28,44	28,19	58,06	29,62	29,87
2460	28,44	28,19	58	29,56	29,81
2490	28,44	28,19	58	29,56	29,81
2520	28,44	28,19	57,94	29,5	29,75
2550	28,44	28,25	58	29,56	29,75
2580	28,44	28,25	58	29,56	29,75
2610	28,44	28,25	58	29,56	29,75
2640	28,44	28,25	58,06	29,62	29,81
2670	28,44	28,25	58,06	29,62	29,81
2700	28,44	28,52	58,13	29,69	29,61
2730	28,44	28,25	58,19	29,75	29,94
2760	28,44	28,25	58,25	29,81	30

2790	28,44	28,25	58,31	29,87	30,06
2820	28,44	28,25	58,38	29,94	30,13
2850	28,44	28,25	58,44	30	30,19
2880	28,44	28,25	58,5	30,06	30,25
2910	28,44	28,25	58,5	30,06	30,25
2940	28,44	28,25	58,56	30,12	30,31
2970	28,44	28,31	58,56	30,12	30,25
3000	28,44	28,31	58,63	30,19	30,32
3030	28,44	28,31	58,63	30,19	30,32
3060	28,5	28,31	58,69	30,19	30,38
3090	28,5	28,25	58,69	30,19	30,44
3120	28,5	28,25	58,63	30,13	30,38
3150	28,44	28,25	58,63	30,19	30,38
3180	28,44	28,25	58,56	30,12	30,31
3210	28,44	28,25	58,5	30,06	30,25
3240	28,44	28,25	58,44	30	30,19
3270	28,44	28,25	58,44	30	30,19
3300	28,44	28,25	58,44	30	30,19
3330	28,44	28,25	58,5	30,06	30,25

3360	28,44	28,25	58,5	30,06	30,25
3390	28,44	28,25	58,5	30,06	30,25
3420	28,44	28,25	58,63	30,19	30,38
3450	28,44	28,25	58,69	30,25	30,44
3480	28,44	28,25	58,69	30,25	30,44
3510	28,44	28,25	58,69	30,25	30,44
3540	28,44	28,25	58,75	30,31	30,5
3570	28,44	28,25	58,81	30,37	30,56
3600	28,44	28,25	58,88	30,44	30,63

Anexo 2 - Interação dos vidros CCA vs Comercial Plano

Tempo (s)	Temperatura (°C) CCA	Temperatura (°C) Plano	Lâmpada	ΔT CCA-lamp	ΔT Plano-lamp
30	22,94	23,12	23,81	0,87	0,69
60	23	23,19	26,37	3,37	3,18
90	23,12	23,25	29,5	6,38	6,25
120	23,19	23,31	32,13	8,94	8,82
150	23,25	23,37	34,44	11,19	11,07
180	23,31	23,44	36,44	13,13	13

210	23,44	23,5	38,23	14,79	14,73
240	23,5	23,62	39,94	16,44	16,32
270	23,62	23,75	41,5	17,88	17,75
300	23,75	23,81	42,88	19,13	19,07
330	23,87	23,94	44,19	20,32	20,25
360	24	24,06	45,38	21,38	21,32
390	24,19	24,19	46,5	22,31	22,31
420	24,31	24,37	47,5	23,19	23,13
450	24,5	24,5	48,44	23,94	23,94
480	24,62	24,62	49,25	24,63	24,63
510	24,81	24,81	50	25,19	25,19
540	24,94	24,94	50,69	25,75	25,75
570	25,12	25,06	51,31	26,19	26,25
600	25,25	25,25	51,88	26,63	26,63
630	25,44	25,37	52,38	26,94	27,01
660	25,56	25,5	52,88	27,32	27,38
690	25,69	25,62	53,31	27,62	27,69
720	25,81	25,75	53,69	27,88	27,94
750	25,94	25,87	54,06	28,12	28,19

780	26,06	26	54,38	28,32	28,38
810	26,19	26,06	54,69	28,5	28,63
840	26,25	26,19	54,94	28,69	28,75
870	26,37	26,25	55,19	28,82	28,94
900	26,44	26,37	55,38	28,94	29,01
930	26,56	26,44	55,56	29	29,12
960	26,62	26,5	55,75	29,13	29,25
990	26,69	26,62	55,94	29,25	29,32
1020	26,75	26,69	56,06	29,31	29,37
1050	26,81	26,75	56,19	29,38	29,44
1080	26,87	26,81	56,31	29,44	29,5
1110	26,94	26,87	56,44	29,5	29,57
1140	27	26,94	56,56	29,56	29,62
1170	27,06	27	56,69	29,63	29,69
1200	27,12	27,06	56,75	29,63	29,69
1230	27,19	27,06	56,88	29,69	29,82
1260	27,25	27,12	56,94	29,69	29,82
1290	27,25	27,19	57	29,75	29,81
1320	27,31	27,06	57,06	29,75	30

1350	27,37	27,25	57,13	29,76	29,88
1380	27,37	27,31	57,25	29,88	29,94
1410	27,44	27,37	57,31	29,87	29,94
1440	27,44	27,37	57,38	29,94	30,01
1470	27,5	27,44	57,44	29,94	30
1500	27,5	27,44	57,5	30	30,06
1530	27,56	27,5	57,56	30	30,06
1560	27,56	27,5	57,56	30	30,06
1590	27,62	27,56	57,63	30,01	30,07
1620	27,62	27,56	57,69	30,07	30,13
1650	27,62	27,62	57,75	30,13	30,13
1680	27,69	27,62	57,81	30,12	30,19
1710	27,69	27,62	57,88	30,19	30,26
1740	27,75	27,69	57,88	30,13	30,19
1770	27,75	27,69	57,94	30,19	30,25
1800	27,75	27,69	57,94	30,19	30,25
1830	27,81	27,75	58	30,19	30,25
1860	27,81	27,75	58	30,19	30,25
1890	27,81	27,75	58	30,19	30,25

1920	27,81	27,75	58,06	30,25	30,31
1950	27,87	27,81	58,06	30,19	30,25
1980	27,87	27,81	58,06	30,19	30,25
2010	27,87	27,81	58,06	30,19	30,25
2040	27,87	27,81	58,13	30,26	30,32
2070	27,87	27,87	58,13	30,26	30,26
2100	27,94	27,87	58,13	30,19	30,26
2130	27,94	27,87	58,13	30,19	30,26
2160	27,94	27,87	58,19	30,25	30,32
2190	27,94	27,87	58,19	30,25	30,32
2220	27,94	27,87	58,19	30,25	30,32
2250	27,94	27,87	58,19	30,25	30,32
2280	27,94	27,87	58,19	30,25	30,32
2310	27,94	27,87	58,19	30,25	30,32
2340	27,94	27,94	58,19	30,25	30,25
2370	27,94	27,94	58,19	30,25	30,25
2400	27,94	27,94	58,25	30,31	30,31
2430	28	27,94	58,25	30,25	30,31
2460	28	27,94	58,25	30,25	30,31

2490	28	27,94	58,31	30,31	30,37
2520	28	27,94	58,31	30,31	30,37
2550	28	27,94	58,38	30,38	30,44
2580	28	28	58,44	30,44	30,44
2610	28	28	58,44	30,44	30,44
2640	28,06	28	58,44	30,38	30,44
2670	28,06	28	58,5	30,44	30,5
2700	28,06	28	58,5	30,44	30,5
2730	28,06	28	58,5	30,44	30,5
2760	28,06	28,06	58,56	30,5	30,5
2790	28,06	28,06	58,56	30,5	30,5
2820	28,06	28,06	58,56	30,5	30,5
2850	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
2880	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
2910	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
2940	28,12	28,06	58,69	30,57	30,63
2970	28,12	28,06	58,69	30,57	30,63
3000	28,12	28,06	58,69	30,57	30,63
3030	28,12	28,06	58,69	30,57	30,63

3060	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
3090	28,12	28,06	58,69	30,57	30,63
3120	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
3150	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
3180	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3210	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
3240	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
3270	28,12	28,06	58,63	30,51	30,57
3300	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3330	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3360	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3390	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3420	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3450	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3480	28,12	28,12	58,63	30,51	30,51
3510	28,12	28,12	58,69	30,57	30,57
3540	28,12	28,12	58,69	30,57	30,57
3570	28,12	28,12	58,69	30,57	30,57
3600	28,12	28,12	58,69	30,57	30,57

Anexo 3 - Interação dos vidros Quartzo vs Comercial Plano

Tempo (s)	Temperatura (°C) Quartzo	Temperatura (°C) Plano	Lâmpada	ΔT Quartzo-lamp	ΔT Plano-lamp
30	22,06	22,19	22,5	0,44	0,31
60	22,19	22,25	25,12	2,93	2,87
90	22,25	22,31	28,19	5,94	5,88
120	22,37	22,44	30,75	8,38	8,31
150	22,44	22,5	32,94	10,5	10,44
180	22,5	22,56	34,88	12,38	12,32
210	22,62	22,69	36,63	14,01	13,94
240	22,75	22,75	38,19	15,44	15,44
270	22,81	22,87	39,69	16,88	16,82
300	22,94	23	41	18,06	18
330	23,06	23,12	42,25	19,19	19,13
360	23,25	23,25	43,44	20,19	20,19
390	23,37	23,44	44,5	21,13	21,06
420	23,56	23,56	45,5	21,94	21,94
450	23,69	23,69	46,38	22,69	22,69

480	23,87	23,87	47,19	23,32	23,32
510	24,06	24	47,94	23,88	23,94
540	24,19	24,19	48,69	24,5	24,5
570	24,31	24,31	49,31	25	25
600	24,5	24,5	49,94	25,44	25,44
630	24,62	24,62	50,5	25,88	25,88
660	24,75	24,75	51	26,25	26,25
690	24,94	24,87	51,44	26,5	26,57
720	25,06	25,06	51,88	26,82	26,82
750	25,19	25,19	52,31	27,12	27,12
780	25,31	25,31	52,63	27,32	27,32
810	25,44	25,44	52,94	27,5	27,5
840	25,56	25,56	53,25	27,69	27,69
870	25,69	25,62	53,56	27,87	27,94
900	25,81	25,75	53,81	28	28,06
930	25,94	25,87	54,06	28,12	28,19
960	26	26	54,25	28,25	28,25
990	26,12	26,06	54,44	28,32	28,38
1020	26,19	26,19	54,56	28,37	28,37

1050	26,25	26,25	54,69	28,44	28,44
1080	26,37	26,31	54,88	28,51	28,57
1110	26,44	26,44	55,06	28,62	28,62
1140	26,5	26,5	55,25	28,75	28,75
1170	26,56	26,56	55,38	28,82	28,82
1200	26,62	26,62	55,5	28,88	28,88
1230	26,69	26,69	55,63	28,94	28,94
1260	26,75	26,75	55,75	29	29
1290	26,81	26,81	55,81	29	29
1320	26,87	26,87	55,88	29,01	29,01
1350	26,87	26,87	56	29,13	29,13
1380	26,94	26,94	56,06	29,12	29,12
1410	27	27	56,19	29,19	29,19
1440	27,06	27	56,25	29,19	29,25
1470	27,06	27,06	56,38	29,32	29,32
1500	27,12	27,12	56,44	29,32	29,32
1530	27,12	27,12	56,56	29,44	29,44
1560	27,19	27,19	56,69	29,5	29,5
1590	27,19	27,19	56,81	29,62	29,62

1620	27,25	27,25	56,88	29,63	29,63
1650	27,25	27,25	57	29,75	29,75
1680	27,31	27,31	57,06	29,75	29,75
1710	27,31	27,31	57,13	29,82	29,82
1740	27,37	27,37	57,19	29,82	29,82
1770	27,37	27,37	57,31	29,94	29,94
1800	27,44	27,44	57,38	29,94	29,94
1830	27,44	27,44	57,44	30	30
1860	27,5	27,5	57,5	30	30
1890	27,5	27,5	57,56	30,06	30,06
1920	27,5	27,5	57,63	30,13	30,13
1950	27,56	27,56	57,69	30,13	30,13
1980	27,56	27,56	57,69	30,13	30,13
2010	27,56	27,56	57,69	30,13	30,13
2040	27,56	27,62	57,69	30,13	30,07
2070	27,62	27,62	57,63	30,01	30,01
2100	27,62	27,62	57,69	30,07	30,07
2130	27,62	27,62	57,75	30,13	30,13
2160	27,62	27,69	57,88	30,26	30,19

2190	27,69	27,69	57,94	30,25	30,25
2220	27,69	27,69	57,94	30,25	30,25
2250	27,69	27,69	58	30,31	30,31
2280	27,69	27,75	58,06	30,37	30,31
2310	27,75	27,75	58,06	30,31	30,31
2340	27,75	27,75	58,13	30,38	30,38
2370	27,75	27,81	58,19	30,44	30,38
2400	27,75	27,81	58,19	30,44	30,38
2430	27,75	27,81	58,13	30,38	30,32
2460	27,75	27,81	58,13	30,38	30,32
2490	27,81	27,81	58,13	30,32	30,32
2520	27,81	27,87	58,06	30,25	30,19
2550	27,81	27,87	58,13	30,32	30,26
2580	27,81	27,87	58,13	30,32	30,26
2610	27,81	27,87	58,13	30,32	30,26
2640	27,87	27,87	58,13	30,26	30,26
2670	27,87	27,94	58,06	30,19	30,12
2700	27,87	27,94	58,06	30,19	30,12
2730	27,87	27,94	58,06	30,19	30,12

2760	27,87	27,94	58,06	30,19	30,12
2790	27,87	27,87	58,13	30,26	30,26
2820	27,87	27,94	58,13	30,26	30,19
2850	27,87	27,94	58,13	30,26	30,19
2880	27,87	28	58,19	30,32	30,19
2910	27,87	28	58,19	30,32	30,19
2940	27,87	28	58,19	30,32	30,19
2970	27,87	28	58,25	30,38	30,25
3000	27,94	28	58,31	30,37	30,31
3030	27,94	28	58,31	30,37	30,31
3060	27,94	28	58,31	30,37	30,31
3090	27,94	28,06	58,31	30,37	30,25
3120	27,94	28,06	58,31	30,37	30,25
3150	27,94	28,06	58,31	30,37	30,25
3180	27,94	28,06	58,31	30,37	30,25
3210	28	28,06	58,31	30,31	30,25
3240	28	28,06	58,31	30,31	30,25
3270	28	28,06	58,31	30,31	30,25
3300	28	28,06	58,31	30,31	30,25

3330	28	28,06	58,25	30,25	30,19
3360	28	28,12	58,19	30,19	30,07
3390	28	28,12	58,19	30,19	30,07
3420	28	28,06	58,25	30,25	30,19
3450	28	28,12	58,13	30,13	30,01
3480	28,06	28,12	58,13	30,07	30,01
3510	28,06	28,12	58,13	30,07	30,01
3540	28,06	28,12	58,06	30	29,94
3570	28,06	28,12	58,06	30	29,94
3600	28,06	28,12	58,13	30,07	30,01