

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

INGRID MACHADO TEIXEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E
ÓPTICAS DE MICROESFERAS DO TIPO IB COMERCIAIS E FABRICADAS A
PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Alegrete

2025

INGRID MACHADO TEIXEIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E
ÓPTICAS DE MICROESFERAS DO TIPO IB COMERCIAIS E FABRICADAS A
PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia de Materiais e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes

Alegrete

2025

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

T54a Teixeira, Ingrid Machado

Análise comparativa das propriedades físicas, químicas e ópticas de microesferas do tipo IB comerciais e fabricadas a partir da cinza da casca de arroz / Ingrid Machado Teixeira. 68 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.

"Orientação: Jacson Weber de Menezes".

1. Microesferas de vidro. 2. Microesferas de vidro; Cinza da casca de arroz. 3. Sinalização viária. 4. Sinalização viária; Retrorrefletividade. I. Título.

INGRID MACHADO TEIXEIRA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E ÓPTICAS DE MICROESFERAS DSO TIPO IB COMERCIAIS E FABRICADAS A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração: Tecnologia de Materiais.

Dissertação defendida e aprovada em: 18 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. JACSON WEBER DE MENEZES - UNIPAMPA – Orientador

Profa. Dra. CHIARA VALSECCHI – UNIPAMPA

Prof. Dr. RENAN GUSTAVO SCHERER – FURG



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2025, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2025, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Renan Gustavo Scherer; Usuário Externo**, em 18/07/2025, às 16:23, 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 **1781472** e o código CRC **06F155A3**.

Dedico este trabalho a minha filha
Hananda Victória, que é o meu maior
incentivo da vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha mãe Sônia Marlí e meu pai Cleomar, por terem cuidado da minha filha para que fosse possível eu realizar a obtenção do título de Mestre em Engenharia

A minha Filha Hananda Victória, que mesmo pequena, sempre entendeu os motivos de eu ter que ficar longe e não poder ser presente na criação.

Aos meus irmãos de graduação da famosa “Gangue do Chimarrão” Juliano e Rubens, as minhas amigas e companheiras de mestrado Paola e Patrícia e aos amigos Matheus e Félix, que estiveram comigo desde o início da produção do vidro até a produção das microesferas.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes pela oportunidade de orientação, por sempre estar disposto a ajudar nas atividades de pesquisa e no desenvolvimento deste trabalho, e a Prof. Dr. Chiara Valsecchi que foi quem ajudou na produção do vidro.

Ao Juliano e ao Félix meu agradecimento especial, por ter me ajudado inúmeras vezes no laboratório.

Por fim, agradeço às demais pessoas, aqui não citadas, que de alguma forma contribuíram para minha formação.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

A crescente geração de resíduos agroindustriais impõe desafios ambientais que exigem soluções sustentáveis. A casca de arroz, subproduto da cadeia orizícola, representa cerca de 20% do peso do grão e, ao ser queimada, origina uma cinza rica em sílica (SiO_2), que pode ser reaproveitada na produção de vidros. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a fabricação de microesferas vítreas do Tipo IB, a partir de vidros produzidos com cinza da casca de arroz (CCA), levando em conta os critérios estabelecidos pela norma NBR 16184:2021. O objetivo é comparar suas propriedades físicas, químicas e ópticas com microesferas comerciais de mesmas características. A metodologia inclui a produção dos vidros em forno de alta temperatura (1500 °C), moagem e separação granulométrica dos fragmentos, e posterior esferolização pelo método da chama horizontal. Os vidros produzidos foram avaliados quanto à transparência óptica no espectro visível, o índice de refração, e as microesferas obtidas foram caracterizadas quanto a morfologia, granulometria, densidade, composição química, resistência ao ataque ácido, resistência ao CaCl_2 e a retrorrefletividade para a geometria de 15 metros. A pesquisa buscou validar o uso da CCA como fonte alternativa de sílica para aplicação em sinalização horizontal viária, contribuindo para o reaproveitamento de resíduos agrícolas e a redução da extração mineral de areia. Os resultados evidenciaram o desempenho equivalente das microesferas de CCA em relação às comerciais, comprovando sua viabilidade para produção em escala industrial, com implicações positivas em sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica na área de materiais para infraestrutura viária.

Palavras-chave: Microesferas de vidro; Cinza da casca de arroz; Sinalização viária; Retrorrefletividade.

ABSTRACT

The increasing generation of agro-industrial waste poses environmental challenges that demand sustainable solutions. Rice husk, a byproduct of the rice production chain, accounts for about 20% of the grain's weight and, when burned, produces an ash rich in silica (SiO_2), which can be reused in glass production. In this context, the present study proposes the manufacturing of Type IB glass microspheres from glass produced with rice husk ash (RHA), in accordance with the criteria established by the Brazilian standard. The objective is to compare their physical, chemical, and optical properties with those of commercial microspheres with similar characteristics. The methodology includes the production of glass in a high-temperature furnace ($1500\text{ }^\circ\text{C}$), grinding and particle size separation of the fragments, followed by spheroidization using the horizontal flame method. The produced glass was evaluated for optical transparency in the visible spectrum and refractive index, and the obtained microspheres were characterized for morphology, particle size, density, chemical composition, resistance to acid attack, resistance to CaCl_2 , and retroreflectivity at a 15-meter geometry. The research aimed to validate the use of RHA as an alternative source of silica for application in road surface marking, contributing to the reuse of agricultural waste and the reduction of sand mineral extraction. The results highlighted the performance of RHA microspheres compared to commercial ones, proving their feasibility for industrial-scale production, with positive implications for environmental sustainability and technological innovation in materials for road infrastructure.

Keywords: Glass microspheres; Rice husk ash; Road marking; Retroreflectivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Quantidade média de arroz em casca produzida no Rio Grande do Sul.....	20
Figura 2- Fenômeno de retroreflexão.....	31
Figura 3- Geometria de 15 metros.....	32
Figura 4- Geometria de 30 metros.....	32
Figura 5- Ancoragem das microesferas.....	33
Figura 6- Fluxograma de atividades.....	35
Figura 7- Balança utilizada para pesagem.....	36
Figura 8- Materiais utilizados para homogeneização (a) e conjunto homogeneizado (b).....	36
Figura 9- Forno mufla.....	37
Figura 10- Espectrofotômetro de UV-Vis.....	38
Figura 11- Refratômetro construído para medir o índice de refração dos vidros.....	39
Figura 12- Materiais utilizados para moagem do vidro (a) e vidro moído (b).....	40
Figura 13- Conjunto de peneiras para separação dos fragmentos de vidro.....	40
Figura 14- Método de Chama Horizontal: Esquema do processo (a) e montagem experimental do laboratório (b).....	41
Figura 15- Funil utilizado para deposição dos fragmentos de vidro na chama.....	42
Figura 16- Estufa (a) e dessecador (b).....	44
Figura 17- Aparelho de Fluorescência de Raios X.....	45
Figura 18- Ensaio de Resistência ao Ácido Clorídrico.....	46
Figura 19- Filtragem (a) e secagem (b) das amostras.....	46
Figura 20- Retrorefletômetro horizontal clássico (a) e superfícies de medições sem uso de tinta e com uso de tinta (b).....	48
Figura 21- Espectro UV-Vis para o vidro de CCA.....	49
Figura 22- Tipos de morfologias das microesferas comerciais (a) e de CCA (b).....	51
Figura 23- Granulometria das microesferas.....	52
Figura 24- Microesferas comerciais: (a) antes e (b) após o ataque ácido, com aumento de 100 vezes e, (c) antes e (d) após o ataque, com aumento de 200 vezes.....	55
Figura 25- Microesferas de CCA: (a) antes e (b) após o ataque ácido, com aumento de 100 vezes e, (c) antes e (d) após o ataque, com aumento de 200 vezes.....	56
Figura 26- Microesferas comerciais: (a) antes e (b) após a exposição ao CaCl_2 , com aumento de 50 vezes e, (c) antes e (d) após a exposição, com aumento de 100 vezes.....	57

Figura 27- Microesferas de CCA: (a) antes e (b) após a exposição ao CaCl_2 , com aumento de 50 vezes e, (c) antes e (d) após a exposição, com aumento de 100 vezes	58
Figura 28- Retrorrefletividade para microesferas de CCA e microesferas comerciais	59
Figura 29- Retrorrefletividade das microesferas antes e após os ataques químicos.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação das microesferas	28
Tabela 2- Granulometria das Microesferas do Tipo IB.....	30
Tabela 3- Índice de refração dos vidros.....	50
Tabela 4- Morfologia das microesferas	52
Tabela 5- Densidade das microesferas comerciais	53
Tabela 6- Densidade das microesferas CCA	53
Tabela 7- Composição química das microesferas	54

LISTA DE ABREVIATURAS

°C – graus celsius

ml. – miligrama

m. – metros

mm. – milímetro

µm. – micrômetro

nm. – nanômetro

kg. – quilograma

g. – grama

atm. – atmosfera

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CCA – Cinza da Casca de Arroz

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

CTB – Código de Trânsito Brasileiro

DAER – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DETRAN-RS – Departamento Estadual de Trânsito do Rio Grande do Sul

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes

DNIT – Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GOMNDI – Grupo De Óptica Micro e Nano Fabricação de Dispositivos

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos.....	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
1.1.3	Justificativa	19
1.1.4	Estrutura do trabalho	19
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	Cinza da Casca de Arroz.....	20
2.2	Vidro	21
2.3	Sinalização Viária	23
2.3.1	Sinalização Horizontal Viária	24
2.4	Microesferas de vidro e sua fabricação	26
2.4.1	Microesferas do Tipo IB	29
2.5	Retrorefletividade	31
3	METODOLOGIA.....	35
3.1	Produção do vidro de cinza da casca de arroz (CCA)	35
3.2	Caracterização do vidro de cinza da casca de arroz	37
3.2.1	Espectrofotometria UV-Vis	37
3.2.2	Índice de refração	38
3.3	Produção de microesferas	39
3.3.1	Moagem do vidro	39
3.3.2	Processo de fabricação das microesferas.....	41
3.4	Caracterização das microesferas de CCA e comerciais	42
3.4.1	Análise morfológica e granulométrica.....	42
3.4.2	Densidade de massa	43

3.4.3	Teor de sílica e presença de elementos tóxicos por Fluorescência de raios X.....	44
3.4.4	Resistência ao Ácido Clorídrico	45
3.4.5	Resistência ao Cloreto de Cálcio	47
3.4.6	Retrorrefletividade	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Caracterização do vidro.....	49
4.1.1	Espectrofotometria UV-Vis	49
4.1.2	Índice de refração	50
4.2	Caracterização física das microesferas.....	50
4.2.1	Análise morfológica e granulométrica	50
4.2.2	Densidade de massa	53
4.3	Caracterização química das microesferas.....	54
4.3.1	Natureza do vidro, teor de sílica e presença de elementos tóxicos.....	54
4.3.2	Resistência ao Ácido Clorídrico	55
4.3.3	Resistência ao Cloreto de Cálcio	57
4.4	Retrorrefletividade	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia existem vários segmentos industriais que produzem uma quantidade significativa de resíduos. Estes resíduos, se descartados incorretamente, podem causar um desequilíbrio ambiental. Por outro lado, boa parte da sociedade atual, assim como políticas governamentais, tem interesse em corrigir esta situação, tendo como foco a utilização destes resíduos no desenvolvimento de novos materiais, gerando valor agregado. Como exemplo de resíduo que pode ser usado para o desenvolvimento de novos materiais pode-se citar a cinza da casca de arroz, que é gerada a partir da queima da casca de arroz e que tem um alto teor de sílica em sua composição. Este alto teor de sílica permite, por exemplo, a produção de vidros silicatos. O Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de dispositivos (GOMNDI) da Universidade Federal do Pampa vem produzindo vidros a partir da cinza da casca de arroz desde 2018 (Gonçalves, 2019; Lima, 2020; Marçal, 2023; Chim, 2025). Várias aplicações vêm sendo feitas com os vidros produzidos. Destaca-se, porém, a aplicação dos vidros em sinalização horizontal viária, com a produção de microesferas sólidas, as quais, quando colocadas na tinta de demarcação viária, exibem o fenômeno da retroreflexão. Porém, até então, todos os trabalhos haviam sido feitos com microesferas produzidas a partir de vidros fabricados em baixas temperaturas (1200 °C) (Silva, 2020; Pase Neto, 2023) ou sem ter como objetivo satisfazer alguma norma vigente (Gonçalves, 2019). No caso específico da temperatura a 1200° C, para que seja possível a fundição dos óxidos e a consequente geração do vidro, havia a necessidade de um alto percentual de óxido de boro na composição. A justificativa para o uso deste material era principalmente devido a infraestrutura de fornos disponíveis pelo grupo, os quais chegavam à temperatura máxima de 1200 °C. Porém, a utilização do bórax (resultando em óxido de boro) faz com que o percentual em massa de sílica presente no vidro seja menor do que 50%, tornando o vidro com características de um material borossilicato e mais pobre em sílica do que os vidros comerciais. Pensando do ponto de vista de microesferas aplicadas a sinalização viária, a Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 16184:2021, a qual especifica as características das microesferas para esta aplicação, dentre outras especificações, prevê que as microesferas tenham um percentual mínimo de 65%, em massa, de sílica. Vidros com esse percentual de sílica, só são possíveis de serem fabricados elevando em temperaturas próximas de 1500 °C, temperatura esta que também se utiliza nas fábricas de vidros. Esse problema foi sanado quando foi adquirido um forno que alcança esta temperatura e, Chim (2024) fabricou vidro de Cinza de Casca do Arroz com as

percentagens de sílica e outros óxidos típicos dos vidros comerciais de recipientes, abrindo a possibilidade de produção das microesferas conforme a composição exigida em norma.

Neste sentido, este trabalho visa a fabricação de microesferas sólidas a partir de vidros produzidos a partir da cinza da casca de arroz, tendo como base a norma NBR 16184:2021. Para validar as microesferas produzidas, além de satisfazer a norma supracitada, elas foram comparadas com microesferas comerciais de mesmo tipo.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão organizados em objetivo geral e objetivos específicos, conforme apresentados a seguir.

1.1.1 Objetivo geral

Fabricar microesferas, a partir de vidros produzidos com a cinza da casca de arroz, classificadas como sendo do Tipo IB, com especificações descritas em norma e comparar as características físicas, químicas e a retrorefletividade com microesferas comerciais de mesmo tipo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Produzir vidros com composições previstas na norma NBR 16184:2021;
- Avaliar os vidros do ponto de vista de características ópticas, utilizando o espectrofotômetro UV-Vis e refratômetro;
- Produzir microesferas do Tipo IB pelo método de chama horizontal;
- Avaliar as características físicas (granulometria, morfologia e densidade) das microesferas produzidas e comparar com as microesferas comerciais;
- Avaliar as características químicas das microesferas produzidas e das microesferas comerciais;
- Avaliar os níveis de retroreflexão na geometria de 15 metros das amostras produzidas comparando-as com as comerciais de mesmo tipo.

1.1.3 Justificativa

A presente pesquisa contribui para o fechamento do ciclo produtivo do arroz, propondo uma destinação sustentável a este material por meio da fabricação de vidros e a consequente produção de microesferas sólidas, com aplicação na sinalização viária horizontal. Além disso, embora o Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI), já tenha produzido anteriormente microesferas vítreas, o presente trabalho representa a primeira iniciativa do grupo voltada à produção e caracterização de microesferas de cinza da casca de arroz, produzidas em temperatura industrial e com composição descrita em norma.

1.1.4 Estrutura do trabalho

O estudo desenvolvido está estruturado em quatro capítulos, organizados na seguinte ordem:

- Capítulo 1 – Introdução e Objetivo: Este capítulo apresenta a motivação para a escolha do tema de estudo, estabelecendo sua relevância e relação com os princípios do desenvolvimento sustentável. Além disso, são expostos os objetivos da pesquisa e a justificativa que fundamenta sua realização.
- Capítulo 2 – Conceitos gerais e Revisão da Literatura: Neste capítulo são descritos os conceitos gerais e também é feita a revisão da literatura.
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Este capítulo descreve os procedimentos experimentais, os processos adotados, os materiais empregados e os equipamentos utilizados na execução do trabalho.
- Capítulo 4 – Resultados e discussões: Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos procedimentos metodológicos descritos no Capítulo 3.
- Capítulo 5 – Considerações finais: Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas através dos resultados deste trabalho.

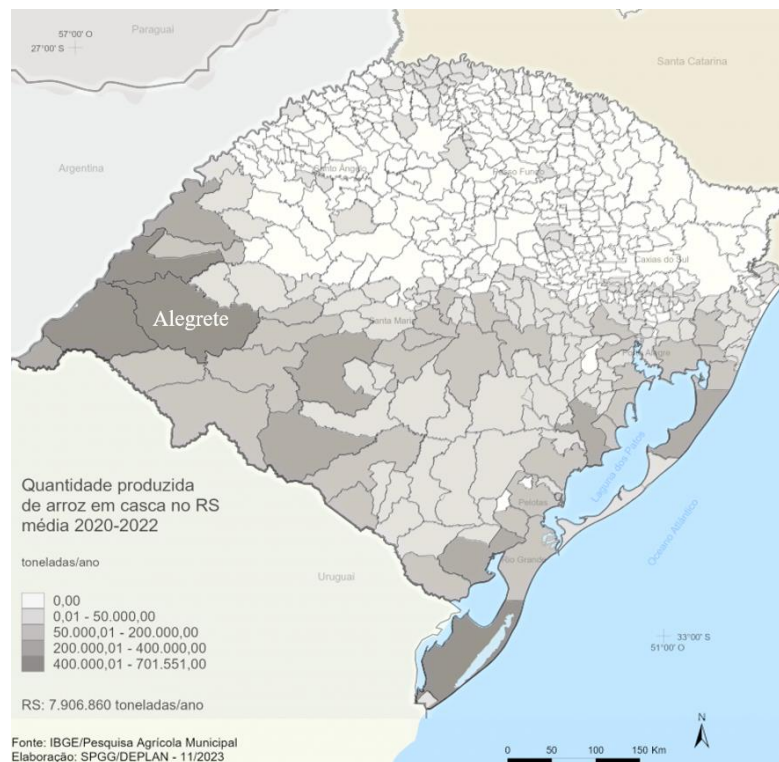
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cinza da Casca de Arroz

O arroz, um dos grãos mais cultivados no mundo, tem uma produção global de 800 milhões de toneladas de grãos em casca. Entre os países das Américas, o Brasil é o maior produtor, situando-se na nona posição mundial, contribuindo com aproximadamente 1,3% da produção anual global, com cerca de 10,3 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2025).

Dentre as regiões do Brasil, o Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz em casca do país, sendo a região oeste responsável pela produção de 46% da safra total do Estado. Os municípios com maior produção de arroz do Brasil estão localizados nas regiões sul e sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, como mostrado na Figura 1 (Atlas Econômico Do Rio Grande Do Sul, 2024). A cidade de Alegrete, onde foi realizado este trabalho, na safra 2021/2022, gerou cerca de 416.091 toneladas (IRGA, 2022).

Figura 1- Quantidade média de arroz em casca produzida no Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptado de ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL

O subproduto do processamento industrial do arroz é a casca de arroz. Esta casca representa cerca de 20% do peso do grão (Lima et al., 2019). Considerando a produção anual, este percentual corresponde a mais de duas milhões de toneladas deste resíduo geradas por ano no país. A casca de arroz é um subproduto agroindustrial com baixo valor comercial, cuja disposição final é regulamentada por normas ambientais, exigindo estocagem adequada por parte das indústrias beneficiadoras. No entanto, em contextos de agricultura familiar, é comum a queima não controlada desse resíduo, prática que contribui significativamente para a emissão de compostos orgânicos voláteis (VOCs), gases poluentes e de efeito estufa, como dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), além de material particulado inalável (PM10). Esses poluentes atmosféricos estão associados a impactos negativos à saúde humana, incluindo a potencial correlação com doenças crônicas, como o diabetes mellitus tipo II (Matin, 2023; Njoku, 2021).

Segundo Foletto (2005) a principal aplicação da Cinza da Casca de Arroz (CCA) é na indústria para a geração de energia, pois é a sobra vegetal que mais gera cinzas quando queimadas. Hossain (2018) destaca que a queima da casca do arroz para produção de energia gera cerca de 25% do volume total, de cinza de casca de arroz, onde esse volume dispõe entre 85% e 95% de sílica amorfa. Desta forma cinzas podem ser utilizadas como matéria-prima em inúmeros setores industriais e na produção de materiais como os utilizados na construção civil, cerâmica e vidro, pois estes são materiais que necessitam principalmente de sílica (Hossain, 2018).

2.2 Vidro

Rosa et al. (2007) descreve o vidro como um produto amorfo derivado da fusão de materiais inorgânicos. As matérias-primas mais utilizadas são a sílica, barrilha, calcário e alumina. Akerman (2000) menciona que há uma diversidade de formulações de vidros a base de sílica, podendo separá-los em grupos de acordo com suas características e aplicações, como: vidros sódico-cálcicos, vidros borosilicatos, vidros alumino-borosilicatos, silicatos alcalinos e sílicas vítreas. De Araújo (1997) comenta que os vidros sódico-cálcicos são os vidros mais antigos e mais utilizados. Há milênios, os vidros eram constituídos de Na₂O-CaO-SiO₂, sendo esta composição utilizada até hoje na produção de vidros industriais.

Santos (2009) relata que o vidro sódico-cálcico possui em sua composição 71% a 73% de sílica (SiO₂). A composição química básica deste vidro é formada assim por 71% a 73% sílica (SiO₂), 12% a 14% de óxido de sódio (Na₂O) e 10% a 12% de óxido de cálcio (CaO).

Além desses componentes, outros óxidos existentes na composição atuam como modificadores de rede da sílica, causando quebra da estrutura do vidro e gerando oxigênio livre, alterando as propriedades químicas do vidro.

Pokorny (2006) explica que os vidros são fabricados a partir do aquecimento de areia de quartzo – rica em sílica – até uma temperatura acima da sua fusão, o que resulta em uma mistura de alta viscosidade. Pelo fato da areia quartzítica ser a principal matéria prima utilizada para a produção de vidros, faz com que seja necessária sua extração em grandes quantidades, a qual é retirada do meio ambiente através das reservas minerais naturais (Armellini; Fernandes, 2004).

Gonçalves (2019) produziu vidros do tipo sódico-cálcicos utilizando cinza da casca de arroz como fonte de sílica. Por conta do percentual elevado de sílica e a presença de compostos com elevado ponto de fusão, a fabricação desse vidro necessita a disponibilidade de fornos com capacidade de temperatura elevada.

No mesmo contexto, Lima (2020) fabricou vidros boro-sódico-cálcicos, com a utilização de boro na sua composição. Isso porque a incorporação desse elemento na composição faz com que a temperatura de fusão do vidro decresça. Por outro lado, além da alta resistência ao choque térmico, os vidros contendo boro também são extremamente resistentes ao ataque químico e são utilizados em muitos aparatos de laboratório devido à ausência de agentes oxidantes em sua composição (Akerman, 2000).

Marçal (2023) também produziu vidros borossilicatos, tendo como fonte principal de sílica a cinza da casca de arroz à temperatura de 1200 °C. Esse tipo de vidro pode ser utilizado em materiais que requerem elevada expansão térmica e baixa resistência ao ataque químico, os quais não são recomendados para aplicações que demandam estabilidade dimensional e durabilidade em ambientes agressivos. Geralmente, este tipo de vidro é utilizado na fabricação de utensílios de cozinha, equipamentos laboratoriais e sistemas ópticos automotivos, como faróis de automóveis (Varshneya, 1994).

Por sua vez, Chim (2025) produziu vidros borossilicatos em temperatura industrial (1500 °C). Os vidros foram caracterizados considerando análises descritas em diferentes normas brasileiras, incluindo a norma de sinalização viária NBR 16184:2021.

2.3 Sinalização Viária

A sinalização viária é um elemento essencial para garantir a organização, segurança e fluidez no trânsito. Ela é composta por um conjunto de dispositivos que orientam e informam os usuários das vias, permitindo uma circulação eficiente e segura.

Do ponto de vista normativo, o Código de Trânsito Brasileiro - CTB (1997), no Anexo I, determina a sinalização como o “conjunto de sinais de trânsito e dispositivos de segurança colocados na via pública com o objetivo de garantir sua utilização adequada, possibilitando melhor fluidez no trânsito e maior segurança dos veículos e pedestres que nela circulam”. Tal concepção reforça a importância de uma sinalização eficaz, que atenda às exigências de legibilidade, visibilidade e padronização. O artigo 87 do CTB classifica os sinais de trânsito em seis categorias:

- I. Verticais;
- II. Horizontais;
- III. Dispositivos de sinalização auxiliar;
- IV. Luminosos;
- V. Sonoros;
- VI. Gestos do agente de trânsito e do condutor.

Esta classificação reforça a amplitude e complexidade do sistema de sinalização, exigindo que os profissionais da área de infraestrutura rodoviária considerem múltiplas variáveis na concepção e manutenção das vias.

A sinalização viária deve ser capaz de captar a atenção e transmitir confiança ao usuário, além de proporcionar tempo suficiente para que este reaja de forma adequada às mensagens transmitidas. Essa diretriz evidencia que a atenção do condutor é influenciada por diversos fatores ambientais, tais como a velocidade regulamentada da via, ocupação do solo lateral à rodovia, o volume e a composição da frota em circulação, bem como a complexidade do traçado, determinada pelas características geométricas da via (DNER, 1999, p. 1).

O desempenho e a eficácia da sinalização viária dependem de diversos fatores, dentre eles a sua correta implantação, manutenção e adequação às normas técnicas. O Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes - DNIT (2010) destaca que a sinalização deve ser planejada e executada com base em cinco aspectos fundamentais, tais como:

- **Projeto:** Com definição clara de forma, cor, dimensão e localização dos dispositivos;
- **Implantação:** Adequação às características locais, levando em consideração possíveis mudanças no local;
- **Operação:** Avaliação constante do desempenho, onde deve ser avaliado constantemente e, caso necessário ser ajustado quando não atender aos parâmetros mínimos;
- **Manutenção:** Permanente e criteriosa, de forma a manter a confiança do usuário;
- **Qualidade dos materiais:** Precisam estar conforme normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT ou órgãos equivalentes, como placas, estruturas de sustentação, tintas, películas e dispositivos auxiliares (tachas e elementos refletivos).

Contudo, falhas na sinalização viária, como deficiência, inadequação ou deterioração, podem representar riscos significativos à segurança. Ferraz (2012) aponta três fatores críticos associados aos acidentes de trânsito: ausência de visibilidade das marcas longitudinais durante a noite e em condições meteorológicas adversas; insuficiência de dispositivos verticais refletivos em locais críticos e; carência de sinalização informativa antecipada em trechos com modificações na via.

Dessa forma, a sinalização viária se apresenta como uma ferramenta técnica e estratégica fundamental para a promoção da segurança e da mobilidade urbana e rodoviária, sendo indispensável o cumprimento rigoroso dos critérios normativos e técnicos para sua efetiva funcionalidade.

2.3.1 Sinalização Horizontal Viária

A sinalização horizontal consiste em marcas, símbolos e legendas aplicados sobre o pavimento com a finalidade de orientar condutores e pedestres. De acordo com o DNIT (2010), essa sinalização é utilizada para ordenar o fluxo de veículos, guiar os deslocamentos conforme as características da via (como geometria, topografia e obstáculos), bem como complementar a sinalização vertical.

Segundo o Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN (2007), a sinalização horizontal transmite aos usuários informações sobre a utilização correta da via, indicando proibições, restrições e orientações que visam à adoção de comportamentos seguros. Uma das vantagens desse tipo de sinalização é sua localização no campo visual direto do condutor,

dispensando movimentos laterais da cabeça para leitura. Além disso, durante o período noturno, a sinalização horizontal recebe mais luz dos faróis dos veículos, o que aumenta sua visibilidade em comparação à sinalização vertical (Lee; Donnell, 2007).

Contudo, a durabilidade da sinalização horizontal é frequentemente limitada, especialmente em vias de alto volume de tráfego. Robertson (2011) aponta que as demarcações no pavimento são essenciais para a segurança no transporte rodoviário, pois ajudam a definir os limites das faixas e das bordas da via, facilitando a percepção da direção correta de circulação. Características como cor e forma auxiliam os usuários na interpretação de proibições, sentidos de fluxo, áreas de ultrapassagem e zonas de pedestres.

No que se refere aos materiais utilizados, Hacker (1995) destaca três principais tipos: tintas, termoplásticos e elastoplásticos. Migletz e Graham (2002) complementam ao incluir tintas à base de solvente, tintas à base de água, epóxi, poliéster e termoplásticos. A escolha desses materiais depende de critérios como o estado da via, volume de tráfego, condições climáticas e vida útil esperada da demarcação. Schwab (1999) ressalta que, para garantir a visibilidade noturna, é comum a adição de microesferas de vidro às demarcações, proporcionando retrorrefletividade, fenômeno que permite à luz dos faróis retornar ao condutor, aumentando a legibilidade da sinalização.

A retrorrefletividade, segundo Salles et al. (2015), é fundamental para que a sinalização seja visível durante a noite. De fato, conforme Lee e Donnell (2007), em condições de baixa iluminação, como à noite ou em neblina, os faróis dos veículos e as marcas horizontais são, muitas vezes, os únicos referenciais disponíveis para os motoristas.

O CTB (1997) estabelece os parâmetros legais para a sinalização viária, definindo-a como o conjunto de sinais e dispositivos que visam garantir o uso adequado das vias, promovendo a fluidez e a segurança do tráfego. O Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (2007) reforça a importância da visibilidade e legibilidade da sinalização, que devem permitir a interpretação em tempo hábil para a tomada de decisão.

A correta aplicação da sinalização horizontal tem impacto direto na segurança viária. Ferraz (2012) destaca problemas recorrentes, como a má visibilidade das linhas de separação das faixas e a ausência de sinalização reflexiva em situações críticas. O DNIT (2010) salienta que a manutenção constante é imprescindível para garantir a eficiência da sinalização, visto que o desgaste causado pelo tráfego e pelas condições climáticas compromete sua funcionalidade.

Portanto, a sinalização horizontal, quando corretamente projetada e mantida, constitui um instrumento indispensável para a organização do tráfego e a redução de acidentes. Sua

eficácia depende da escolha adequada dos materiais, da visibilidade diurna e noturna, da legibilidade, bem como da conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação de trânsito, onde o uso das microesferas contribuem ativamente neste sentido.

2.4 Microesferas de vidro e sua fabricação

As esferas e microesferas de vidro têm sido amplamente utilizadas na sinalização viária horizontal devido à sua capacidade de proporcionar retrorrefletividade, conforme já mencionado. Essas estruturas atuam como micro-lentes, captando a luz incidente dos faróis dos veículos e refletindo-a de volta na direção do condutor, o que melhora significativamente a visibilidade das demarcações, especialmente à noite (Moreira; Menegon, 2003). De acordo com a NBR 16184 (ABNT, 2021), as esferas de vidro são definidas como aquelas com diâmetro superior a 1000 μm , enquanto as microesferas possuem diâmetro igual ou inferior a esse valor, podendo ser maciças ou ocas.

Segundo Schwab (1999), as microesferas sólidas são geralmente compostas por vidro do tipo soda-cal-sílica ($\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$), com teor de sílica superior a 65%. A produção envolve a trituração de resíduos de vidro, os quais são posteriormente submetidos a temperaturas de aproximadamente 1200 °C em fornos verticais com correntes de gás ascendentes. A combinação entre alta temperatura e tensão superficial promove a esferolização das partículas (Souza, 2013).

Durante a produção, é comum o surgimento de defeitos nas microesferas, como partículas não esféricas, angulares, contaminadas por materiais estranhos ou com bolhas gasosas que comprometem sua eficiência óptica. Especificamente, a NBR 16184 (ABNT, 2021) diz que microesferas com mais de 25% de sua seção transversal ocupada por bolhas podem apresentar desempenho significativamente inferior.

A obtenção dessas microesferas pode ser realizada por diferentes métodos, os quais se baseiam, essencialmente, na fusão e esferolização de partículas vítreas irregulares sob condições controladas de temperatura e fluxo gasoso. Pase Neto (2023) descreve quatro principais métodos utilizados na fabricação de microesferas de vidro: queda gravitacional, chama horizontal, pulverização de plasma e flutuação de pós. Cada técnica apresenta especificidades em relação aos parâmetros de temperatura, tempo de residência térmica, e granulometria dos fragmentos vítreos, o que impacta diretamente na morfologia e nas propriedades finais das esferas produzidas. Abaixo estão descritos os principais métodos utilizados para produzir microesferas de vidro.

- **Método da queda gravitacional:** Conforme demonstrado por Souza (2015), este método consiste na introdução de partículas vítreas de aluminossilicatos de magnésio, moídas e peneiradas entre 45 μm e 63 μm , em um forno tubular com temperatura de 1420 °C. As partículas são lançadas verticalmente através de um tubo de alumina, sendo esferolizadas durante a queda livre por uma zona de aquecimento. Após a coleta, análises mostraram que as microesferas obtidas apresentaram diâmetro médio de 93 μm , maior que o dos fragmentos originais, o que foi atribuído à aglomeração de partículas unidas por forças de Van der Waals.
- **Método da chama horizontal:** Conforme estudado por Barros Filho (2012), este método envolve a passagem de fragmentos vítreos por uma chama resultante da combustão controlada de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e oxigênio (O_2). Para esse estudo, foram utilizados fragmentos irregulares em diversas faixas granulométricas, dentro do intervalo de 0 μm a 106 μm . Neste processo, o deslocamento horizontal das partículas pela chama permite sua esferolização. A granulometria final variou entre 45 μm e 63 μm , e o diâmetro médio das microesferas formadas foi de 116 μm . Verificou-se que a posição de coleta das partículas influenciava diretamente na esfericidade e tamanho final, sendo que partículas mais próximas da chama apresentaram maior diâmetro.
- **Método da pulverização de plasma:** Como abordado por Bessmertnyi *et al.* (2001), este método utiliza um queimador de plasma como fonte de calor intensa. As partículas irregulares são pulverizadas em um jato de plasma, submetidas a altas temperaturas, esferolizadas e resfriadas em movimento até serem separadas por peneiras vibratórias. Este método permitiu a produção de microesferas com granulometria entre 320 μm e 630 μm , apresentando alta uniformidade e esfericidade, conforme evidenciado nas micrografias obtidas pelos autores citados.
- **Método da flutuação de pós:** Conforme descrito por Tong *et al.* (2009), este método baseia-se na introdução de partículas vítreas finamente moídas (< 35 μm) em um fluxo de ar de alta pressão dentro de um forno com temperatura de 1600 °C. As partículas flutuam internamente até atingir a forma esférica, sendo posteriormente coletadas por meio de insuflação. As microesferas obtidas neste processo apresentaram tamanhos variando entre 1 μm e 30 μm , demonstrando grande potencial para aplicações que exigem microesferas de pequenas dimensões.

Cada uma dessas técnicas possui vantagens e limitações que devem ser avaliadas conforme a aplicação final das microesferas. Fatores como a composição do vidro, o controle da temperatura, o tempo de residência térmica, bem como o método de resfriamento e coleta, são determinantes para a obtenção de microesferas com elevado grau de esfericidade, uniformidade, granulométrica e estabilidade físico-química.

No que se refere a aplicação das microesferas na sinalização viária, estas são classificadas com base na sua forma de aplicação e nas condições ambientais das rodovias. Na Tabela 1 é possível visualizar a classificação destas microesferas:

Tabela 1- Classificação das microesferas

Tipo	Características	Faixa granulométrica
IA, V e VI	Microesferas incorporadas a massas termoplásticas, durante a fabricação, mantendo-se abaixo da superfície da demarcação, tornando-se retrorrefletivas após o desgaste da película. São destinados a regiões com alta incidência de chuva ou neblina.	As microesferas do Tipo IA variam seu diâmetro entre 300 e 600 μm ; Os Tipos V e VI são constituídos de esferas com diâmetros superiores a 1000 μm .
IB	Microesferas incorporadas à tinta ou ao plástico a frio, durante a fabricação, mantendo-se imersas nas pinturas até que ocorra o desgaste da película de tinta aplicada na via, permitindo a retrorrefletividade após a exposição.	O diâmetro deste grupo varia entre 63 μm e 300 μm .
IIA, IIB, IIC, IID, IIE, III e IV	Microesferas aplicadas por aspersão, permanecendo na superfície da demarcação e proporcionando retrorrefletividade imediata.	Os Tipos IIA, IIB, IIC, IID e IIE são constituídos por microesferas com diâmetros inferiores a 1000 μm ; O Tipo III varia seu diâmetro entre 1700 μm e 710 μm ; O Tipo IV varia seu diâmetro

		entre 2000 μm e 850 μm .
VII	Microesferas aplicadas por meio de aspersão ou extrusão, sendo comumente empregadas em pistas de aeroportos ou em locais onde se exige maior visibilidade da sinalização horizontal, a fim de potencializar sua eficácia	O diâmetro deste grupo varia entre 300 μm e 1180 μm .

Fonte: Adaptado NBR 16184 (2021)

Quanto às técnicas de aplicação, existem dois métodos principais: Premix e Drop-on. No sistema Premix, as microesferas são incorporadas diretamente à tinta antes da aplicação, podendo essa inserção ocorrer na fábrica ou em campo (Salles et al., 2015). Já no sistema Drop-on, as microesferas são aplicadas separadamente da tinta, diretamente sobre a demarcação recém-pintada, podendo ser lançadas manualmente ou por meio de sistemas automatizados de aspersão simples ou dupla (Largergren, 2005).

2.4.1 Microesferas do Tipo IB

As microesferas do Tipo IB, classificadas pelo DNER – 373/2000 como “Premix”, junto com as do Tipo Drop-on, são as mais empregadas em rodovias. O Tipo IB é incorporado à tinta antes da aplicação, proporcionando retrorrefletividade progressiva à medida que a película se desgasta e as microesferas são expostas. De acordo com a especificação técnica de sinalização horizontal, a aplicação de microesferas de vidro do Tipo IB, em conjunto com tinta à base de resina acrílica retrorrefletorizada, deve obedecer a uma dosagem de 200 a 250 gramas de microesferas para cada litro de tinta de demarcação viária, para garantir os níveis de retrorrefletividade exigidos pelo contratante (BHTRANS, 2014; ABNT, 2016). Além disso, conforme orientações do Departamento de Trânsito do Paraná (DETRAN/PR, s.d.), a tinta deve ser aplicada, ainda no estado úmido, com uma espessura compreendida entre 0,4 mm e 0,9 mm. Conforme estabelecido pela NBR 16184:2021, as microesferas de vidro classificadas como Tipo IB devem apresentar diâmetro inferior a 300 μm , com faixa granulométrica compreendida principalmente entre 212 μm e 63 μm , conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2- Granulometria das Microesferas do Tipo IB

Peneira	Abertura (μm)	% Passando
50	300	100
70	212	85-100
80	180	-
100	150	15-55
140	106	-
200	75	-
230	63	0-10

Fonte: Adaptado de NBR 16184:2021

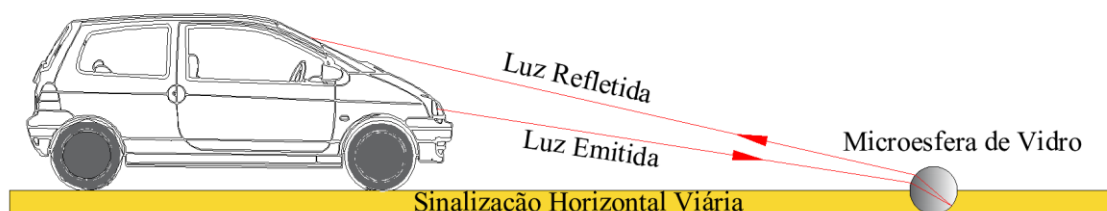
A NBR 16184 (2021) estabelece alguns requisitos técnicos que devem ser atendidos pelas microesferas de vidro dos tipos IB a fim de garantir desempenho adequado em termos de retrorrefletividade. Dentre os critérios definidos, destacam-se:

- **Resistência química:** As microesferas devem apresentar resistência ao ataque de soluções de cloreto de cálcio, ácido clorídrico, água e sulfeto de sódio. Para avaliação é realizado um ensaio que tem por objetivo verificar se a superfície permanece transparente e livre de embaçamento, condição essencial para assegurar a eficiência da retrorreflexão. A perda dessa propriedade pode indicar degradação superficial, especialmente quando expostas a sais e precipitações ácidas.
- **Composição química:** O teor de sílica (SiO_2) deve ser igual ou superior a 65%.
- **Características físicas:** As microesferas devem ser limpas, incolores, redondas, claras e isentas de materiais estranhos.
- **Distribuição granulométrica:** A granulometria deve estar de acordo com as faixas estabelecidas nas Tabelas 1 e 2 da norma NBR 16184 (2021).
- **Índice de refração:** Deve ser, no mínimo, igual a 1,50.
- **Densidade aparente:** Deve situar-se no intervalo entre 2,4 e 2,6 g/cm^3 .
- **Limites de elementos tóxicos:** A concentração de arsênio (As), chumbo (Pb) e antimônio (Sb) deve ser inferior a 200 mg/kg .

2.5 Retrorrefletividade

Na sinalização horizontal viária, o fenômeno da retrorrefletividade desempenha papel fundamental na visibilidade noturna. Esse efeito óptico ocorre quando a luz incidente, proveniente dos faróis dos veículos, penetra nas microesferas incorporadas à tinta de demarcação e é refletida de volta na direção da fonte emissora, ou seja, aos olhos do condutor, proporcionando melhor leitura da sinalização, especialmente em condições de baixa luminosidade (Moreira; Menegon, 2003). A Figura 2, representa o fenômeno descrito.

Figura 2- Fenômeno de retrorreflexão



Fonte: Adaptado ARTERIS (2017)

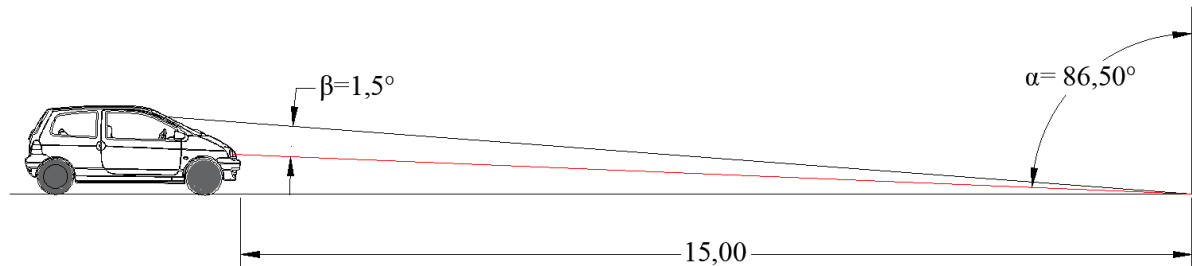
Estudos demonstram que demarcações sem a presença dessas microesferas apresentam visibilidade noturna significativamente reduzida, tornando-se dependentes de iluminação externa (Zhang, 2009). Durante o dia, a ausência de microesferas favorece uma coloração mais uniforme e intensa, porém, à noite, a presença dessas partículas aumenta consideravelmente a quantidade de luz refletida (VDOT, 2008).

A retrorreflexão é medida por meio do coeficiente de retrorreflexão (RL), cuja unidade é expressa em milicandela por lux por metro quadrado (mcd/lux/m^2). A medição desse coeficiente pode ser realizada a diferentes distâncias de observação, sendo as mais comuns 15 m e 30 m, distâncias estas que dependem dos critérios técnicos estabelecidos para a avaliação da sinalização horizontal.

As normas técnicas brasileiras que regulamentam a avaliação da retrorrefletividade em sinalizações horizontais, considerando as geometrias de 15 m e 30 m, são, respectivamente, a NBR 14723:2020 e a NBR 16307:2020. De acordo com a ABNT (2020a), a geometria de 15 metros corresponde a um ângulo de observação (β) de $1,50^\circ$ e a um ângulo de incidência (α) de $86,50^\circ$, representado na Figura 3. Já na geometria de 30 m, conforme especificado pela ABNT (2020b), o ângulo de observação é de $1,05^\circ$ e o ângulo de incidência de $88,76^\circ$, como é possível visualizar na Figura 4. Para que as medições apresentem resultados confiáveis, é

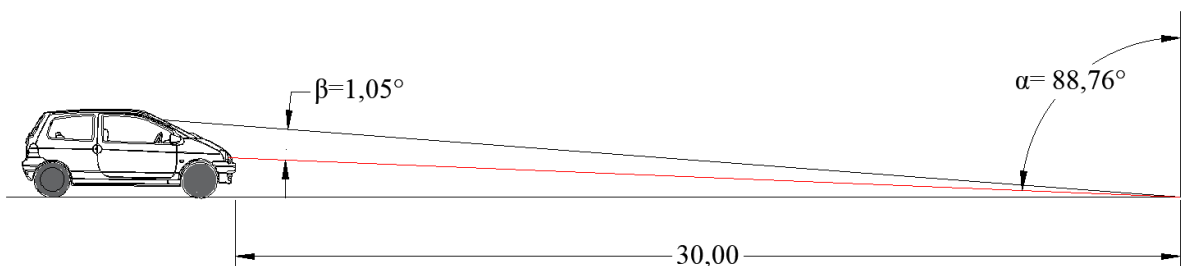
imprescindível que a superfície da sinalização esteja seca, isenta de partículas soltas, resíduos ou qualquer outro elemento que possa comprometer a estabilidade do equipamento de medição, bem como a vedação do compartimento óptico, prevenindo a interferência de luz externa ou solar no processo de avaliação (ABNT, 2020).

Figura 3- Geometria de 15 metros



Fonte: Adaptado ARTERIS (2017)

Figura 4- Geometria de 30 metros



Fonte: Adaptado ARTERIS (2017)

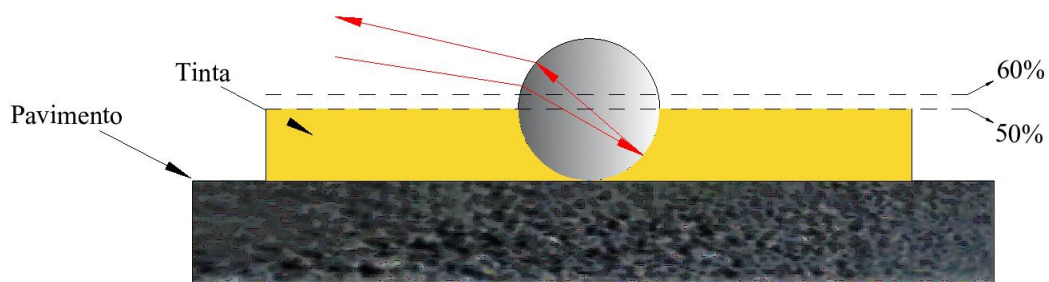
De acordo com Kopf (2004), a eficácia retrorrefletiva está intrinsecamente relacionada à incorporação parcial das microesferas de vidro à camada superficial da tinta. Essa incorporação parcial é essencial, pois permite que parte das microesferas fique exposta à luz incidente, ao mesmo tempo em que se mantém fixada ao revestimento, garantindo o desempenho óptico necessário. Portanto, a seleção de materiais adequados, bem como o controle dos processos de aplicação e manutenção, é determinante para a durabilidade e eficiência retrorrefletiva das demarcações viárias. Porém, a capacidade das microesferas de vidro retrorrefletirem a luz depende de vários fatores, alguns controlados durante o processo de fabricação das microesferas e outros durante o processo de aplicação em campo. Smadi et al. (2014), cita alguns desses fatores:

- **No processo de fabricação:** Esfericidade, transparência, índice de refração e granulometria.
- **Na aplicação em campo:** Tipo de material aglutinante, característica da superfície do pavimento, quantidade e distribuição das microesferas e ancoramento.

Além disso, Schwab (1999) destaca diversas variáveis que influenciam a retrorrefletividade, incluindo a granulometria das esferas em relação à espessura do filme de tinta, o formato e o tamanho das partículas, eventuais imperfeições, a quantidade de esferas expostas, o método de aplicação, a composição do vidro, o índice de refração e o tratamento superficial. Carlson et al. (2005) acrescentam que fatores ambientais, como as condições climáticas, e as características do ligante asfáltico também afetam a eficiência óptica das microesferas.

Já Zhang (2010) ressalta que a retrorrefletividade está intimamente associada à quantidade e qualidade das microesferas aplicadas. Esferas totalmente imersas na pintura não refletem adequadamente a luz, sendo essencial que parte da superfície das partículas permaneça exposta. No mesmo sentido, Moreira e Menegon (2003), ressaltam que a reflexão da luz incidente nas microesferas ancoradas na sinalização horizontal é garantida pelos pigmentos ativos presentes na tinta. Para que a retrorreflexão seja eficiente e durável, recomenda-se que as microesferas estejam ancoradas entre 50% e 60% de seu diâmetro na película de tinta. Esse nível de ancoragem promove tanto a proteção mecânica das microesferas quanto a maximização da área exposta à incidência luminosa, resultando em maior desempenho óptico. A Figura 5 ilustra o esquema representativo da ancoragem ideal das microesferas.

Figura 5- Ancoragem das microesferas



Fonte: Adaptado Moreira e Menegon (2003, p. 45).

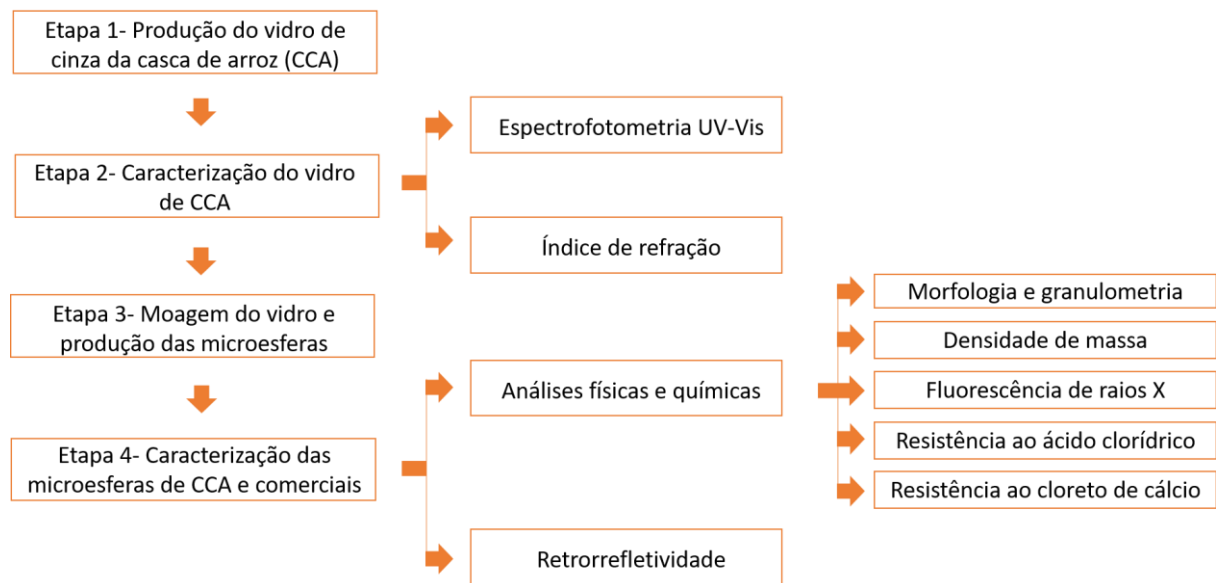
A legislação brasileira vigente não estabelece de forma normativa, valores específicos de retrorrefletância para a sinalização horizontal em rodovias. Na prática, tais parâmetros mínimos são geralmente definidos por órgãos gestores da malha rodoviária, os quais detêm competência para regulamentar e fiscalizar os trechos sob sua jurisdição (Parcianello, 2016). Como exemplo, o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul - DAER (2013) estabelece que os índices mínimos de retrorrefletividade para sinalizações recém-aplicadas (até 48 horas após a execução) devem ser de 220 mcd/lux/m² para a cor branca e 170 mcd/lux/m² para a cor amarela. Para a retrorrefletividade residual (após esse período inicial), os valores mínimos exigidos são de 130 mcd/lux/m² para ambas as cores.

Já o DNIT, por meio da Norma 100/2018, estipula diferentes parâmetros conforme a natureza da sinalização. Para sinalização provisória (de curta duração) e considerando uma geometria de 15 metros, os valores mínimos são de 150 mcd/lux/m² para a cor branca e de 100 mcd/lux/m² para a cor amarela. No caso da sinalização definitiva, os índices exigidos são mais elevados: 250 mcd/lux/m² para a cor branca e 150 mcd/lux/m² para a cor amarela. Além disso, a mesma norma define a retrorrefletividade residual como aquela aferida após 15 dias da aplicação, exigindo que, independentemente das condições físicas ou operacionais da via e do tipo de material especificado em projeto, os valores mínimos sejam de 100 mcd/lux/m² para a cor branca e de 80 mcd/lux/m² para a cor amarela.

3 METODOLOGIA

O procedimento experimental deste trabalho está dividido em etapas conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 6. O fluxograma está organizado por ordem dos procedimentos a serem realizados.

Figura 6- Fluxograma de atividades



Fonte: Elaboração própria

3.1 Produção do vidro de cinza da casca de arroz (CCA)

Para a fabricação de microesferas de vidro de Tipo IB, seguindo a porcentagem mínima de teor de sílica, de acordo com a NBR 16184:2021, primeiramente foi produzido o vidro com as seguintes porcentagens de óxidos, em massa:

- 70% óxido de silício (SiO_2).
- 13% de óxido de sódio (Na_2O);
- 7% de óxido de cálcio (CaO);
- 10% de óxido de boro (B_2O_3);

A fonte de sílica utilizada foi a cinza de casca de arroz (CCA), e o boro foi utilizado a fim de diminuir a temperatura de fusão da mistura. Para preparação desta mistura,

primeiramente foram pesados os carbonatos de sódio e cálcio, de forma que, uma vez decompostos em alta temperatura, resultassem no percentual desejado para produção do vidro. Para pesagem dos óxidos, foi utilizada a balança da marca Shimadzu com precisão de 0,1 mg. Após a pesagem, os componentes foram colocados em um almofariz e homogeneizados com auxílio de um pistilo. Nas Figuras 7 e 8 é possível visualizar a balança utilizada e os materiais utilizados para homogeneização da mistura utilizada para produção do vidro.

Figura 7- Balança utilizada para pesagem



Fonte: Elaboração própria

Figura 8- Materiais utilizados para homogeneização (a) e conjunto homogeneizado (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Após a homogeneização da mistura, o conjunto foi transferido para um cadinho de platina e levado ao forno, ainda desligado. O forno mufla Fortelab, modelo FE 1600/20, foi aquecido a uma rampa de 10 °C por minuto até a temperatura de 900 °C, permanecendo nesta temperatura por 1 hora, para que ocorresse a decomposição dos carbonatos de sódio (Na) e de

cálcio (Ca) e também do bórax. Após isso, a temperatura foi elevada a 1200 °C, com uma variação de 7 °C por minuto, permanecendo nessa temperatura por 1 hora, para completar a decomposição dos carbonatos de sódio e cálcio. Por fim, a temperatura foi elevada até 1500 °C com uma taxa de 5 °C por minuto, mantendo essa temperatura por 3 horas, para homogeneizar a mistura e remover as bolhas presentes durante o processo de fusão. Ao fim da fusão completa da mistura, o conteúdo foi vertido em uma chapa previamente aquecida (400° C) e, após, o vidro foi resfriado em temperatura ambiente. Na Figura 9 é possível visualizar o forno utilizado na produção do vidro.

Figura 9- Forno mufla



Fonte: Elaboração própria

3.2 Caracterização do vidro de cinza da casca de arroz

3.2.1 Espectrofotometria UV-Vis

A caracterização espectroscópica na região do ultravioleta (UV) e do visível (Vis) foi conduzida conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 14910 (ABNT, 2002). Inicialmente, as amostras de vidro *bulk* passaram por um processo de preparação superficial, que consistiu em etapas sucessivas de lixamento com lixas de granulometrias 80, 120, 600, 1200 e 2000. Em seguida, realizou-se o polimento das superfícies, de modo a obter duas faces planas, paralelas e homogêneas, visando minimizar os centros de espalhamento de luz. Para a análise espectroscópica, utilizou-se o equipamento UV-Vis da marca Bel Photonics, modelo

UV-M51, operando na faixa de comprimento de onda de 300 a 750 nm, com leituras de transmitância realizadas a cada 1 nm. Após a aquisição dos dados, os espectros de transmitância foram normalizados para uma espessura padrão de 3 mm, e os resultados foram apresentados graficamente para fins de comparação. Na Figura 10 é possível visualizar o equipamento utilizado.

Figura 10- Espectrofotômetro de UV-Vis



Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Índice de refração

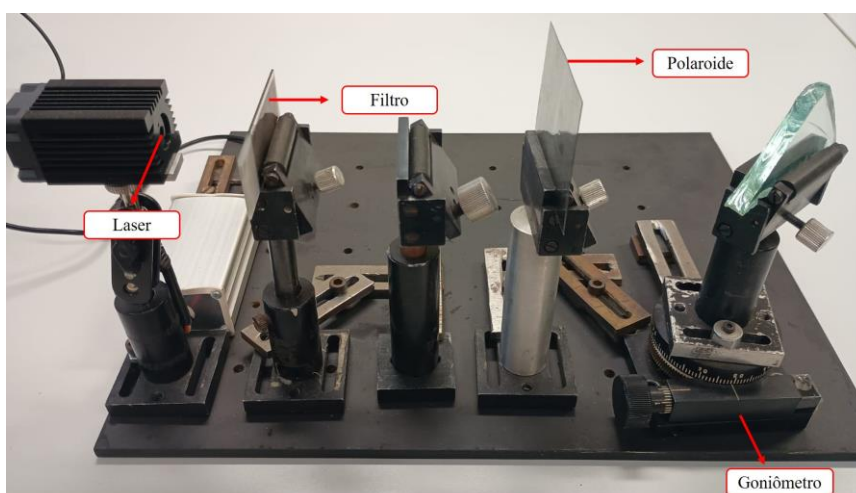
A norma NBR 16184:2021 especifica o índice de refração dos vidros que podem ser utilizados na sinalização viária horizontal. Particularmente, para as microesferas do Tipo IB, produzidas neste trabalho, o índice de refração deve ser superior a 1,50. O índice de refração é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz em um meio específico (Giancoli, 2006). Trata-se de uma grandeza escalar adimensional, cujo valor para materiais homogêneos é sempre igual ou superior a 1,00. Para a realização desta medida, foi construído um dispositivo que permite avaliar o índice de refração para um comprimento de onda específico através do ângulo de Brewster (Hecht, 2002). O dispositivo construído consiste em uma fonte de luz laser com comprimento de onda de 650 nm, um filtro polaroide, que filtra a polarização TE (campo elétrico perpendicular ao plano de incidência da luz), deixando a luz que passa polarizada TM (campo elétrico paralelo ao plano de incidência da luz). A luz polarizada TM incide sobre o vidro fabricado e quando o vidro se encontra no ângulo de Brewster (θ_B), a intensidade da luz refletida cai para um valor mínimo, próximo de

zero. Neste ângulo, o índice de refração do material para o comprimento de onda utilizado pode ser determinado utilizando a Equação 1:

$$n = \arctg \theta_B \quad (1)$$

Para realizar a análise do índice de refração, inicialmente, a amostra de vidro de CCA passou pelo mesmo processo de preparação da superfície, da mesma forma como descrito para o caso da espectroscopia UV-Vis. Uma imagem do aparato utilizado para determinar o índice de refração dos vidros produzidos está mostrado na Figura 11.

Figura 11- Refratômetro construído para medir o índice de refração dos vidros.



Fonte: Elaboração própria

3.3 Produção de microesferas

3.3.1 Moagem do vidro

Os vidros produzidos foram moídos de forma manual, com auxílio de almofariz e pistilo. Foram aplicados golpes a fim de fragmentar o vidro em pequenos pedaços, conforme a granulometria especificada na NBR 16184:2021. Na Figura 12 é possível visualizar os materiais utilizados no processo de moagem.

Figura 12- Materiais utilizados para moagem do vidro (a) e vidro moído (b)



Fonte: Elaboração própria

O vidro já moído foi passado nas peneiras com intuito de separar os fragmentos dentro da faixa granulométrica desejada. As peneiras utilizadas foram de 300 μm e 63 μm , uma vez que as microesferas do Tipo IB possuem diâmetros dentro desta faixa granulométrica. Na Figura 13 é possível visualizar o conjunto de peneiras utilizadas.

Figura 13- Conjunto de peneiras para separação dos fragmentos de vidro



Fonte: Elaboração própria

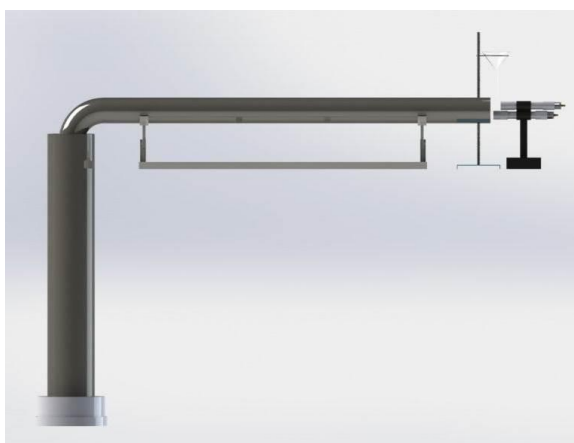
As peneiras foram previamente limpas, com auxílio de um pincel, para retirar qualquer tipo de impureza que pudesse estar presente. Na sequência, os fragmentos de vidro foram colocados na peneira de maior abertura. A peneira foi agitada por cerca de 3 minutos até que sobrasse apenas o material não passante na peneira. O material retido foi colocado novamente no almofariz para nova moagem, repetindo o mesmo processo até que todo o vidro moído passasse pela peneira de 300 μm .

3.3.2 Processo de fabricação das microesferas

Para produção das microesferas do Tipo IB, os fragmentos de vidro foram separados por faixa granulométrica, utilizando as peneiras de 300 μm , 212 μm , 150 μm , 63 μm e fundo.

A fabricação das microesferas foi realizada utilizando o método de chama horizontal. O equipamento utilizado foi produzido no laboratório GOMNDI, por discentes do grupo de pesquisa e vem sendo aprimorado constantemente visando melhorar a eficiência no processo de fabricação. O aparato utilizado consiste em um tubo de aço inoxidável, posicionado na horizontal, de 1485 mm de comprimento, com um joelho de 90° acoplado na sua extremidade, ambos com 84 mm de diâmetro interno e, na vertical, outro tubo também de aço inoxidável, com 1000 mm de altura e 162 mm de diâmetro interno. Para coleta foi utilizado uma forma de alumínio na base do tubo vertical. Para a operação do aparato, foram utilizados dois queimadores atmosféricos acoplados a um botijão de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) de 13 Kg. Na Figura 14(a) é possível visualizar um esquema do equipamento utilizado para produção das microesferas, enquanto na Figura 14(b) pode-se observar o equipamento no laboratório.

Figura 14- Método de Chama Horizontal: Esquema do processo (a) e montagem experimental do laboratório (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, o equipamento foi limpo para que fosse retirada qualquer impureza que pudesse influenciar na produção das microesferas. O GLP foi ajustado a uma pressão de 1 atm, verificada por um manômetro instalado na saída do botijão. Após acender a chama do

queimador, as partículas de vidro moído foram polvilhadas, em pequena quantidade, sobre a chama com apoio de um funil localizado na entrada do tubo horizontal.

Devido à grande variação de diâmetros presentes nas microesferas do Tipo IB, primeiramente foram produzidas microesferas com partículas de vidro compreendidas entre 63 μm e 150 μm e após foram produzidas as microesferas com partículas compreendidas entre 150 μm e 212 μm . Ao final da produção, o GLP foi desligado e, após, foi realizada a coleta das microesferas produzidas que ficaram depositadas na forma de alumínio. Na Figura 15 está apresentado uma imagem que ilustra o funil de deposição das partículas de vidro (fragmentos) bem como os queimadores sobrepostos, os quais foram posicionados desta forma com o intuito de aumentar o tempo de permanência dos cacos na chama, resultando em um aumento da probabilidade de conversão de cacos em microesferas.

Figura 15- Funil utilizado para deposição dos fragmentos de vidro na chama



Fonte: Elaboração própria

3.4 Caracterização das microesferas de CCA e comerciais

3.4.1 Análise morfológica e granulométrica

Após o processo de fabricação das microesferas, por faixa granulométrica, como citado na seção 3.4.1, elas foram misturadas e homogeneizadas. As características morfológicas e a distribuição do tamanho de partículas das microesferas foram avaliadas com auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o equipamento Evo MA10 da marca Zeiss.

Para que a quantificação seja confiável no que se refere a representatividade da amostra em relação a população estudada, foi utilizado o conceito de tamanho de amostra (n), conforme já utilizado em trabalhos prévios, como por exemplo o trabalho de Tomás (2024). Utilizando este conceito, a contagem de aproximadamente 400 partículas por amostra representa estatisticamente o comportamento morfológico das microesferas geradas, com um nível de confiança de 95%, proporção populacional $\pi = 0,5$ e margem de erro de 5%, resultando em um tamanho de amostra necessário de pelo menos 385 elementos. Conseqüentemente, 400 elementos foram analisados para cada tipo de amostra, em triplicata, totalizando 1200 partículas.

Para cada amostra, foram quantificadas as partículas categorizadas como: perfeitamente esféricas, ovoides, geminadas e cacos de vidro, anotando os valores em uma planilha de Excel. A participação de cada classe de partículas foi determinada pela relação entre a quantidade contabilizada em cada categoria e o total de partículas contabilizadas. Esses percentuais foram comparados com os valores de referência estabelecidos na NBR 16184:2021, onde deve-se conter na amostra, no mínimo 77% de esferas, até 20% de ovoides, geminadas ou bolhas gasosas, e no máximo 3% de cacos. A partir desta etapa, as microesferas comerciais começaram a ser caracterizadas juntamente com as microesferas produzidas a partir da cinza da casca de arroz, para efeitos de comparação.

3.4.2 Densidade de massa

Para determinar a densidade de massa, foram utilizadas 50 g de microesferas de vidro. As amostras foram colocadas em uma estufa da marca Biopar Equipamentos Eletrônicos: Modelo S80AD, permanecendo nesta por 2 horas a uma temperatura de 110° C, com a finalidade de retirar toda umidade. Após, as microesferas foram resfriadas no dessecador à temperatura ambiente, durante 2 horas. Na Figura 16 são apresentadas imagens da estufa e dessecador, utilizados para realização desse ensaio.

Figura 16- Estufa (a) e dessecador (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

Foram pesadas na balança analítica 10 g de microesferas, as quais foram retiradas da amostra inicial. Esta massa foi colocada vagarosamente em uma proveta de 100 mL contendo 20 mL de água. A proveta foi agitada lentamente para eliminar o ar retido entre as microesferas. O volume de líquido deslocado devido à imersão das microesferas, verificado através de uma pipeta graduada, corresponde ao volume do material que as compõem.

Para o cálculo da densidade foi utilizada a Equação 2:

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde:

D: Densidade da massa (g/mL);

m: Massa da amostra (g) e;

V: volume da amostra (mL).

3.4.3 Teor de sílica e presença de elementos tóxicos por Fluorescência de raios X

A norma NBR 16184:2021 estabelece ensaios específicos para determinar a natureza do vidro, seguindo os critérios da ASTM C 169, bem como procedimentos para análise do teor de sílica e detecção da presença de elementos tóxicos. Para este trabalho, todos esses critérios foram avaliados de maneira alternativa, utilizando a técnica de Fluorescência de

Raios X, uma metodologia não destrutiva de caracterização de materiais. Esse equipamento permite identificar a composição do vidro, possibilitando a detecção de teores de sílica e a presença de elementos ou óxidos com elementos tóxicos, como arsênio (As), antimônio (Sb) e chumbo (Pb), de forma semi-quantitativa. Na Figura 17 é apresentado o equipamento utilizado para essas análises.

Figura 17- Aparelho de Fluorescência de Raios X

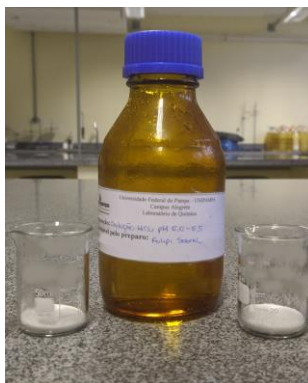


Fonte: Elaboração própria

3.4.4 Resistência ao Ácido Clorídrico

Para a realização do ensaio de verificação da resistência ao ataque de ácido clorídrico (HCl), seguiu-se a norma NBR 16184:2021. Foram pesados 10 g de microesferas de vidro, que foram colocadas em um béquer de 50 mL, sendo posteriormente adicionada uma quantidade suficiente de ácido clorídrico, com pH entre 5,0 e 5,3, para submergi-las completamente. Na Figura 18 está apresentado os materiais utilizados no ensaio.

Figura 18- Ensaio de Resistência ao Ácido Clorídrico



Fonte: Elaboração própria

O material permaneceu submerso e em repouso por 90 horas. Após esse período, o conteúdo foi filtrado utilizando papel-filtro, lavado três vezes com água destilada e, por fim, deixado secar ao ar. A Figura 19 ilustra esse processo de filtragem e secagem das microesferas.

Figura 19- Filtragem (a) e secagem (b) das amostras



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria

As análises das microesferas foram realizadas com microscópio óptico, utilizando aumentos de 100x e 200x, para comparar as microesferas submetidas ao ensaio com aquelas não ensaiadas. Este ensaio visou avaliar a superfície das microesferas, verificando se houve embaçamento da mesma após ser submetida ao ataque ácido. Para quantificar qualquer degradação da superfície, dez medições de retrorrefletividade foram feitas para as amostras antes e depois do tratamento ácido.

3.4.5 Resistência ao Cloreto de Cálcio

Para a realização do ensaio de verificação da resistência ao ataque de cloreto de cálcio (CaCl_2), seguiu-se a norma NBR 16184:2021. O procedimento foi similar ao de resistência ao ataque ácido. Foram pesados 10 g de microesferas de vidro, que foram colocadas em um béquer de 50 mL, sendo posteriormente adicionada quantidade suficiente de cloreto de cálcio, 1N, para submergi-las completamente. O material permaneceu submerso e em repouso por 3 horas. Após esse período, o conteúdo foi filtrado utilizando papel-filtro, lavado três vezes com água destilada e, por fim, deixado secar ao ar.

As análises das microesferas foram realizadas com microscópio óptico, utilizando aumentos de 50x e 100x, para comparar as microesferas submetidas ao ensaio com aquelas não ensaiadas. Este ensaio também visou avaliar a superfície das microesferas, verificando se houve embaçamento da mesma após serem expostas ao CaCl_2 . Com o objetivo de quantificar possíveis degradações na superfície das amostras, foram realizadas dez medições de retrorrefletividade em cada amostra, antes e após a submissão ao CaCl_2 .

3.4.6 Retrorrefletividade

Para realizar as medidas de retrorrefletividade inicial, em quadruplicada, foi utilizado o equipamento EasyLux Clássico Horizontal. As medições foram conduzidas sobre uma superfície composta por uma placa de fibra de média densidade (MDF) com dimensões de 60 cm x 15,3 cm, contendo uma abertura de 34 cm x 10 cm, correspondente à área de leitura do equipamento. A Figura 20 ilustra o equipamento e as superfícies empregadas na obtenção das medições.

Figura 20- Retrorefletômetro horizontal clássico (a) e superfícies de medições sem uso de tinta e com uso de tinta (b)



Fonte: Elaboração própria

As medições foram realizadas de duas formas distintas. Na primeira, as microesferas foram testadas sem a presença de tinta, visando avaliar exclusivamente a influência das microesferas nas medidas de retrorefletividade, sem interferência de variáveis adicionais, como o grau de ancoragem das microesferas na tinta ou a influência da tinta em si. A placa utilizada para essa medida, possui a superfície pintada de preto fosco. Na segunda abordagem, foi aplicada uma camada de tinta para demarcação viária à base de resina acrílica, de cor branca, utilizando-se um rolo de pintura de espuma de poliéster sobre a superfície de MDF. Nesta abordagem, as microesferas foram aspergidas sobre a pintura deixando-as ancoradas na tinta.

Embora as microesferas de vidro do Tipo IB sejam comumente incorporadas à tinta de demarcação viária na proporção de 250 g/L, para esse trabalho, foi adotada uma densidade inferior, de 1,7 g por área de teste (equivalente a 85 g/L), para ambas as amostras. Essa redução foi deliberadamente escolhida com o objetivo de evitar a sobreposição de esferas, fator que poderia comprometer a precisão das medições de retrorefletividade. Também, para facilitar as medidas de retrorefletividade, neste trabalho, como descrito anteriormente, as microesferas foram aspergidas sobre a camada de tinta, representando uma camada exposta após o desgaste. Neste sentido, a espessura da tinta foi ajustada para cerca de 0,6 mm, em conformidade com a norma NBR 14723:2020 (relativa à geometria de 15 metros) e, após a aplicação da tinta, foram aspergidas manualmente 50 g/m² de microesferas (equivalente a 1,7 g de microesferas), com granulometria completa, de acordo com as especificações da NBR 16184:2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

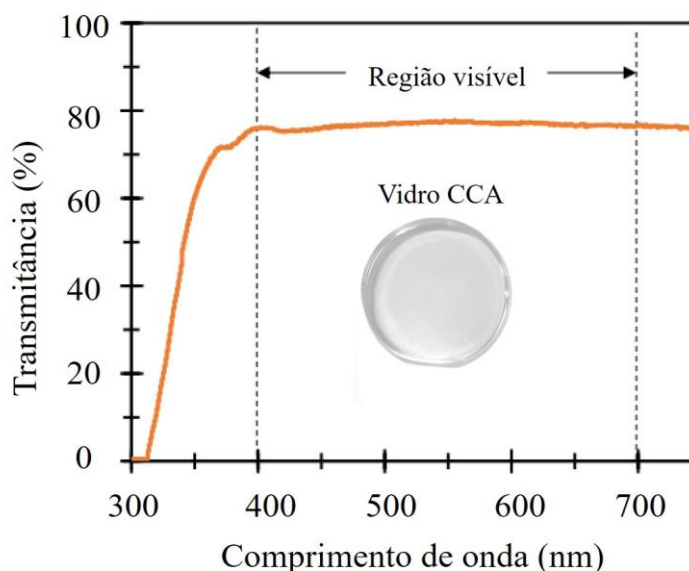
Neste capítulo serão apresentados os resultados deste trabalho, organizados em quatro seções: caracterização do vidro, análises físicas das microesferas, análises químicas das microesferas; e, por fim, os resultados referentes à retrorrefletividade das microesferas.

4.1 Caracterização do vidro

4.1.1 Espectrofotometria UV-Vis

A Figura 21 apresenta o espectro UV-Vis de uma amostra de vidro com 3 mm de espessura, destacando a região visível do espectro eletromagnético (400-700 nm), com a inserção de uma foto do vidro de CCA produzido, obtida nas condições de fabricação selecionadas.

Figura 21- Espectro UV-Vis para o vidro de CCA



Fonte: Elaboração própria

Conforme é possível observar, de 400 nm a 700 nm, o vidro produzido exibe transmittância muito alta e quase constante, o que o caracteriza como incolor na faixa visível do espectro eletromagnético. Além disso, a inspeção visual das microesferas de CCA revelou uma aparência semelhante em termos de coloração.

4.1.2 Índice de refração

O índice de refração do material em estudo foi obtido através do ângulo de Brewster, o qual se baseia na determinação do ângulo de incidência no qual a reflexão da luz polarizada TM é minimizada. Para a realização do experimento, foi utilizado o comprimento de onda de 650 nm, além de um goniômetro com resolução angular de 0,1°. A Tabela 3.2.2 apresenta os resultados encontrados, para o vidro de CCA.

Tabela 3- Índice de refração dos vidros

Tipo de vidro	Índice de Refração
Comercial	n.d
CCA	1,55

n.d. não determinado

Fonte: Elaboração própria

O índice de refração do vidro de CCA foi determinado, a partir do uso da Equação 1, considerando as incertezas do goniômetro, como $1,55 \pm 0,03$ para o comprimento de onda de 650 nm, correspondente ao limite superior do espectro visível. Embora as medições tenham sido realizadas em um único comprimento de onda, há modelos que indicam que o índice de refração de materiais dielétricos homogêneos tende a aumentar à medida que o comprimento de onda diminui (Synowicki; Johs e Martin, 2011, Smith; Shiles e Inokuti, 2004, Sellmeier, 1871; Enkins, 1976). Sendo assim, se o índice de refração do material fabricado é maior que 1,50 para o vermelho (650nm), pode-se afirmar que ele será maior que 1,50 para o restante da faixa visível do espectro eletromagnético. A NBR 16184:2021 estabelece que o índice de refração do vidro, seja igual ou superior a 1,50 para microesferas do Tipo IB. Dessa forma, pode-se dizer que o índice de refração ao longo de toda a faixa do espectro visível, atende os requisitos estabelecidos pela norma.

4.2 Caracterização física das microesferas

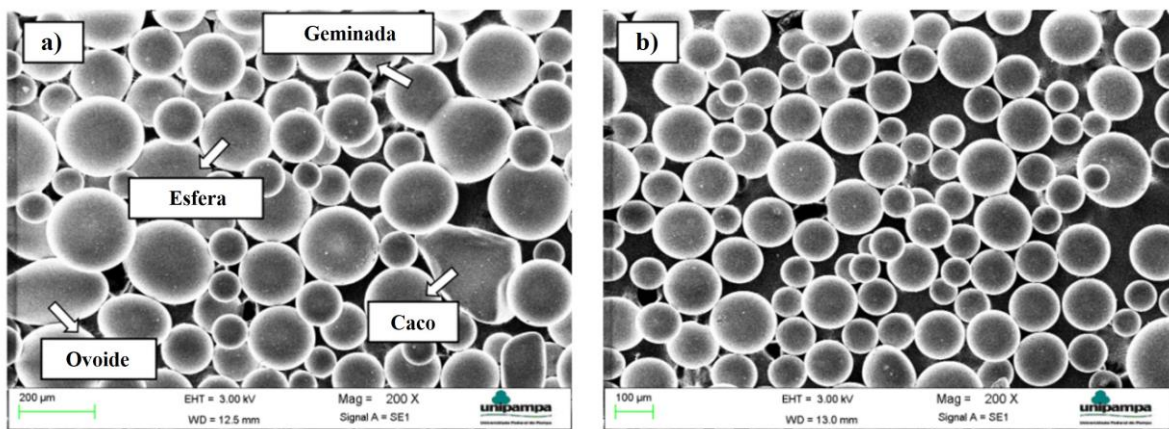
4.2.1 Análise morfológica e granulométrica

A morfologia e a distribuição granulométrica das microesferas de vidro constituem parâmetros fundamentais para seu desempenho na sinalização horizontal viária. A análise

morfológica tem como objetivo verificar a esfericidade das partículas, uma vez que desvios significativos dessa geometria podem comprometer a eficiência do fenômeno de retrorreflexão, reduzindo, assim, a visibilidade e a segurança proporcionadas pela sinalização (Smadi, 2014). Enquanto isso, a análise da distribuição granulométrica possibilita a classificação das microesferas de vidro em faixas dimensionais específicas, o que influencia diretamente a sua adequação aos diferentes métodos de aplicação na sinalização viária (ABNT, 2021).

Na Figura 22 são apresentadas imagens de microscopia eletrônica de varredura das microesferas. A Figura 22(a) exibe uma imagem representativa de microesferas comerciais, onde diferentes resultados geométricos resultantes do processo de produção podem ser identificados, tais como: microesferas esféricas (predominantes), fragmentos, ovoides e partículas geminadas. Já a Figura 22(b), por sua vez, apresenta uma imagem representativa das microesferas produzidas a partir dos vidros à base de CCA. Nesta imagem pode-se observar claramente que o principal formato gerado são esferas com esfericidade elevada.

Figura 22- Tipos de morfologias das microesferas comerciais (a) e de CCA (b)



Fonte: Elaboração própria

Conforme descrito na seção 3.4.1, a avaliação morfológica e granulométrica foi conduzida em triplicata, totalizando 1200 partículas por amostra. A Tabela 4 apresenta os resultados da análise morfológica realizados para as microesferas de CCA e para as microesferas comerciais, juntamente com o desvio padrão das medidas.

Tabela 4- Morfologia das microesferas

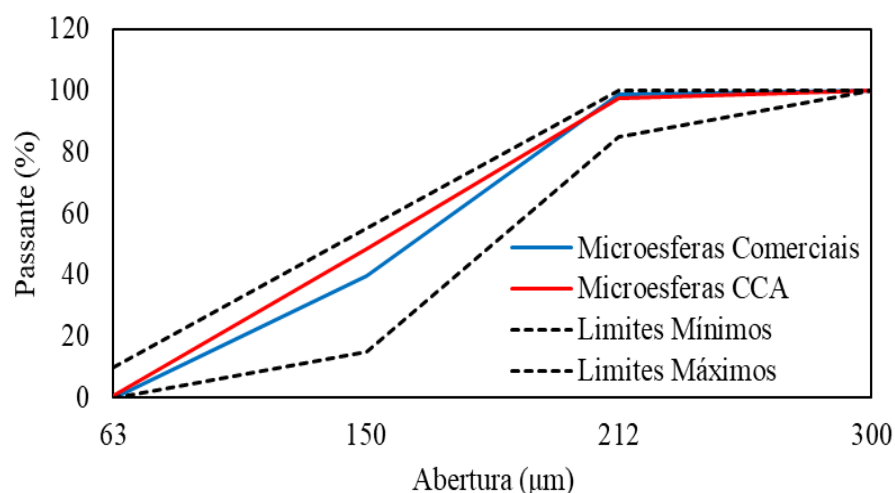
Tipo de Vidro	Esferas (%)	Ovoides/Geminadas (%)	Cacos (%)	Total medidas
Comercial	86 ± 3	11 ± 3	2,1 ± 0,4	1200
CCA	91 ± 3	7 ± 2	1,5 ± 0,2	1200

Fonte: Elaboração própria

Segundo a NBR 16184:2021, para microesferas do Tipo IB, a amostra analisada pode conter até 3% de partículas de vidro não fundido (cacos) e no máximo 20% de fragmentos ovoides, geminados ou com bolhas gasosas. De posse dos dados acima, é possível observar em ambas as amostras, a predominância de partículas com morfologia esférica em relação às demais morfologias encontradas. Com isso, ambas amostras de microesferas atendem os limites estabelecidos pela norma. Essa conformidade morfológica é essencial para garantir a eficiência do desempenho retrorrefletivo, conforme exigido pelos requisitos técnicos dessa aplicação.

A Figura 23 apresenta os resultados granulométricos das microesferas produzidas bem como as comerciais. O gráfico foi construído considerando as massas retidas nas peneiras de 63, 150, 212 e 300 μm , cada uma delas sendo dividida pela massa total.

Figura 23- Granulometria das microesferas



Fonte: Elaboração própria

Como é possível observar na Figura 23, as distribuições granulométricas das amostras de microesferas comerciais e de CCA encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela

NBR 16184:2021 (delimitado pelas linhas pontilhadas), o que permite classificá-las como microesferas do Tipo IB. Essa classificação indica sua adequação para incorporação em tintas de demarcação viária antes de sua aplicação no pavimento.

4.2.2 Densidade de massa

A NBR 16184:2021 estipula os valores máximos e mínimos de densidade de massa de microesferas de acordo com o tipo de microesferas. Para as microesferas do Tipo IB, a norma estabelece que a densidade de massa esteja compreendida entre 2,4 g/cm³ e 2,6 g/cm³.

O ensaio de densidade de massa foi realizado em triplicata. Para as medições, como descrito na seção 3.4.2, foram utilizados 10 g de microesferas e 20 mL de água para cada amostra. Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os valores obtidos para as amostras de microesferas de CCA e microesferas comerciais, respectivamente.

Tabela 5- Densidade das microesferas comerciais

Amostra	Volume do conjunto (mL)	Volume deslocado (mL)	Densidade (g/mL)	Densidade média (g/mL)
1	23,91	3,91	2,56	
2	23,88	3,88	2,58	2,58 ± 0,03
3	23,83	3,83	2,61	

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6- Densidade das microesferas CCA

Amostra	Volume do conjunto (mL)	Volume deslocado (mL)	Densidade (g/mL)	Densidade média (g/mL)
1	23,81	3,81	2,62	
2	23,85	3,85	2,60	2,60 ± 0,02
3	23,86	3,86	2,59	

Fonte: Elaboração própria

A partir dos resultados de densidade obtidos, é possível verificar que tanto as microesferas comerciais quanto as microesferas de CCA apresentam valores compatíveis com os valores estabelecidos pela NBR 16184:2021.

4.3 Caracterização química das microesferas

4.3.1 Natureza do vidro, teor de sílica e presença de elementos tóxicos

Na Tabela 7 são apresentados os valores obtidos referentes aos óxidos de silício (SiO_2), sódio (Na_2O) e cálcio (CaO), principais óxidos presentes nas microesferas analisadas, além da porcentagem de elementos tóxicos, como óxidos de arsênio (As_2O_3), antimônio (Sb_2O_3) e chumbo (PbO). A presença de boro não foi detectada, uma vez que o equipamento utilizado permite a detecção de elementos a partir de $Z = 11$.

Tabela 7- Composição química das microesferas

Tipo de Vidro	SiO₂	Na₂O	CaO	As₂O₃, Sb₂O₃, PbO	Outros
Comercial	72,70	4,70	21,00	-	1,60
CCA	72,80	2,80	20,50	-	3,90

Fonte: Elaboração própria

Em relação a natureza do vidro, a NBR 16184:2021 estabelece que o vidro deve ser do tipo sódico-cálcico. Para a verificação do teor de sílica, de acordo com a norma vigente, para que as microesferas de vidro sejam consideradas aptas à comercialização no que se refere à sua composição química, é exigida a presença mínima de 65% em massa de sílica (SiO_2). Com base nos resultados obtidos, observa-se que ambos os tipos de vidros analisados atendem o valor mínimo estabelecido pela NBR 16184:2021, com teores superiores a 72%. Cabe destacar que, embora outros elementos estejam presentes na composição dessas microesferas, seus teores não foram discutidos, uma vez que a norma em questão não estabelece limites mínimos ou máximos para os demais óxidos.

Tratando da presença de elementos tóxicos como arsênio (As), antimônio (Sb) e chumbo (Pb), a NBR 16184:2021 limita em 200 mg/kg a presença de elementos tóxicos nas amostras de microesferas, o que equivale a um percentual de 0,02% de massa. Nesse sentido, as microesferas também satisfazem a norma uma vez que não foi detectado nenhuma presença de tais elementos.

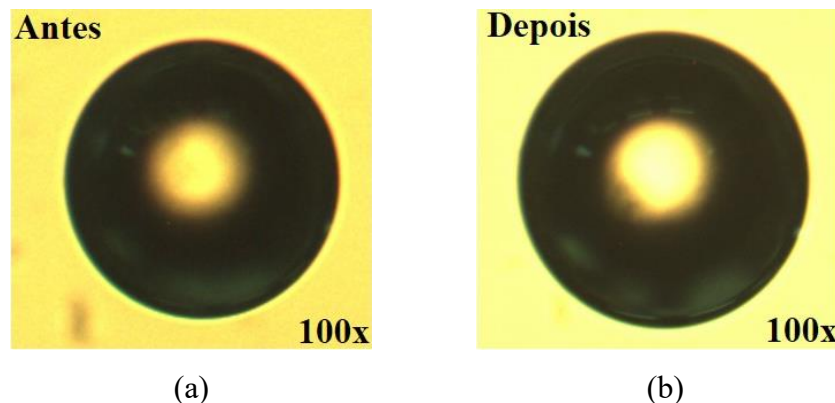
4.3.2 Resistência ao Ácido Clorídrico

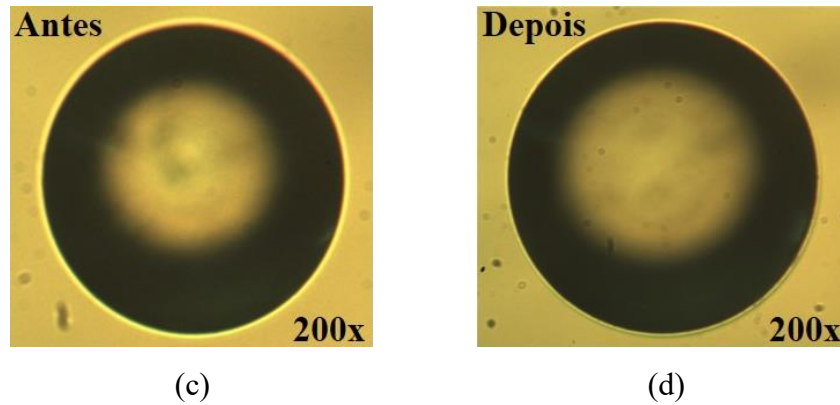
A exposição das microesferas ao ataque ácido permite a análise da sua estabilidade química quando expostas a ambientes agressivos, como soluções ácidas (chuvas ácidas) ou condições altamente corrosivas. Tal avaliação é essencial para aplicações em que as microesferas estejam sujeitas a intempéries ou substâncias reativas, como, por exemplo, na sinalização horizontal viária (Shellenberger; Logan, 2002).

A partir da execução dos ensaios descritos na seção 3.4.4, destinados a avaliar a resistência das microesferas de vidro ao ataque por ácido clorídrico (HCl), conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 16184:2021, foram obtidas imagens por microscopia óptica para ambas as amostras (comercial e CCA), antes e após o ataque ácido. Para a captura das imagens, utilizou-se o software ISCapture, aplicando ampliações de 100x e 200x, com o objetivo de observar eventuais alterações na superfície das microesferas após o ensaio. Segundo a norma, as superfícies devem ser verificadas levando em consideração se as amostras apresentam superfície embaçada ou não após o ataque ácido.

As Figuras 24 e 25 apresentam as imagens obtidas, antes e após o ataque ácido, na amplificação de 100x e 200x para microesferas comerciais e de CCA, respectivamente. Cabe destacar que tais imagens foram ampliadas (recortadas) com o objetivo de facilitar a visualização.

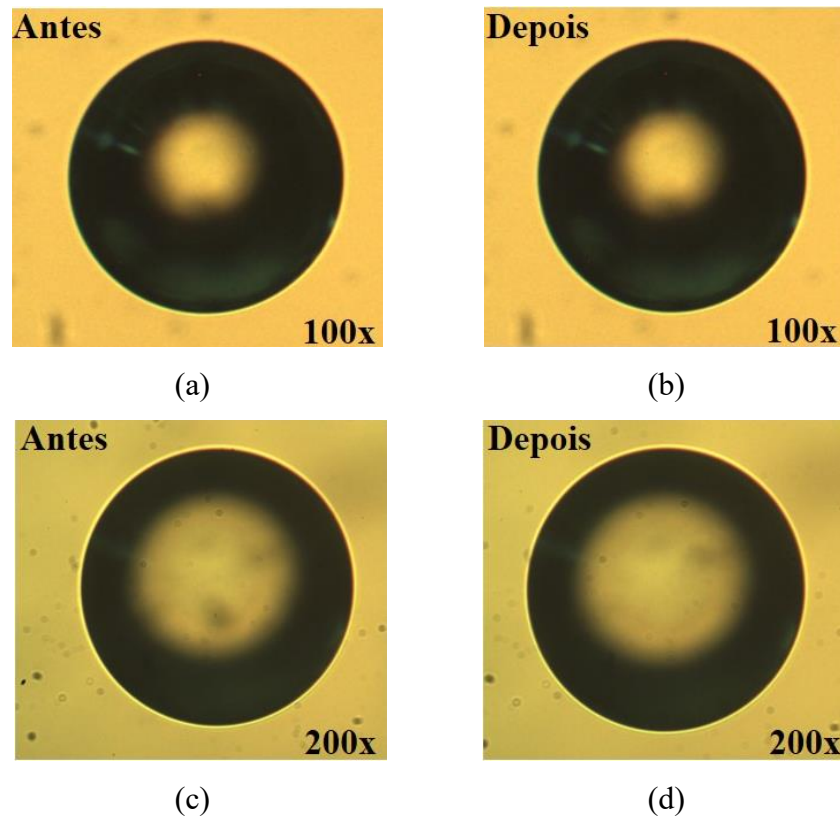
Figura 24- Microesferas comerciais: (a) antes e (b) após o ataque ácido, com aumento de 100 vezes e, (c) antes e (d) após o ataque, com aumento de 200 vezes





Fonte: Elaboração própria

Figura 25- Microesferas de CCA: (a) antes e (b) após o ataque ácido, com aumento de 100 vezes e, (c) antes e (d) após o ataque, com aumento de 200 vezes



Fonte: Elaboração própria

É possível observar que tanto as microsferas comerciais quanto as microsferas produzidas a partir do vidro de CCA não apresentaram sinais de embaçamento superficial após a exposição ao ataque ácido. Esses resultados indicam que ambos os tipos de microsferas atendem aos requisitos estabelecidos pela norma. Para reforçar que não houve mudanças da superfície das microsferas após o ataque ácido, foram feitas medidas de

retrorefletividade antes e depois do ataque. Essas medidas serão mostradas na seção 4.4 deste capítulo.

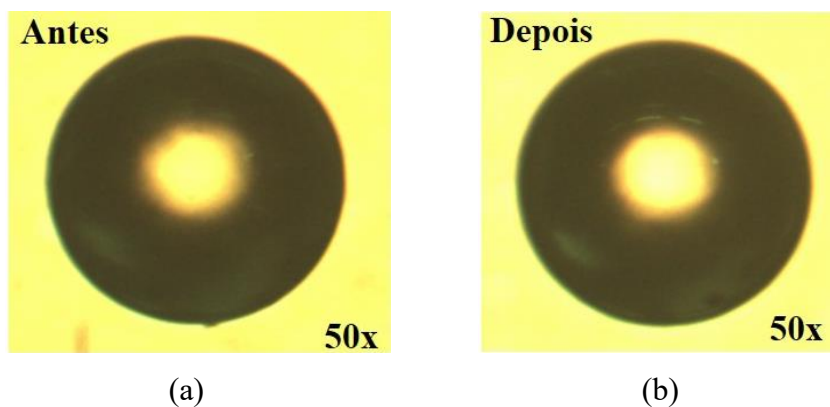
4.3.3 Resistência ao Cloreto de Cálcio

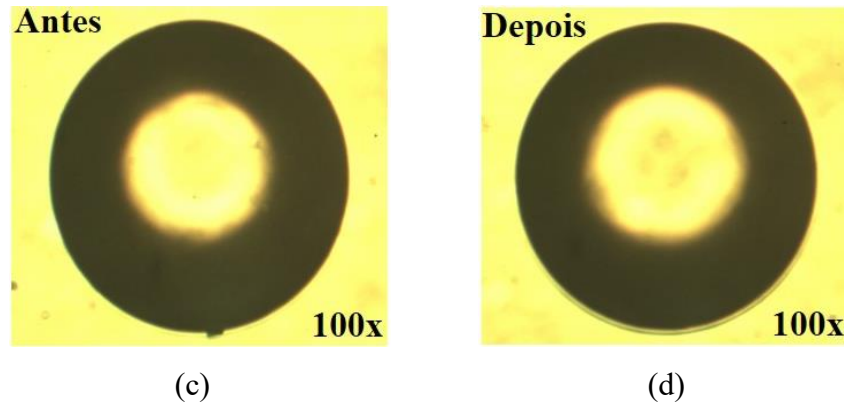
A exposição das microesferas ao cloreto de cálcio (CaCl_2) é importante para simular condições ambientais específicas, tais como a exposição a meios ricos em íons cálcio, típicos de ambientes de concretos (como pavimentos de blocos intertravados e vias de concreto de cimento Portland), solos calcários ou sistemas de revestimento, possibilitando a avaliação da durabilidade e estabilidade das microesferas nestas condições.

A partir da realização dos procedimentos descritos na seção 3.4.5, a fim de verificar a resistência das microesferas de vidro a exposição ao CaCl_2 , seguindo os procedimentos descritos pela norma NBR 16184:2021, foram capturadas imagens por microscopia óptica para ambas amostras, antes e após a exposição, assim como para o ataque ácido. Para o registro das imagens, utilizou-se o software ISCapture, utilizando aumentos de 50x e 100x, com a finalidade de observar eventuais mudanças na superfície das microesferas após o ensaio. De acordo com a norma, as superfícies devem ser verificadas levando em consideração se as amostras apresentam embaçadas ou não após a exposição ao reagente, assim como para o ataque ácido.

As Figuras 26 e 27 apresentam as imagens das microesferas obtidas antes e após a exposição ao CaCl_2 . Novamente, ressalta-se que essas imagens foram ampliadas para permitir uma melhor visualização dos detalhes morfológicos.

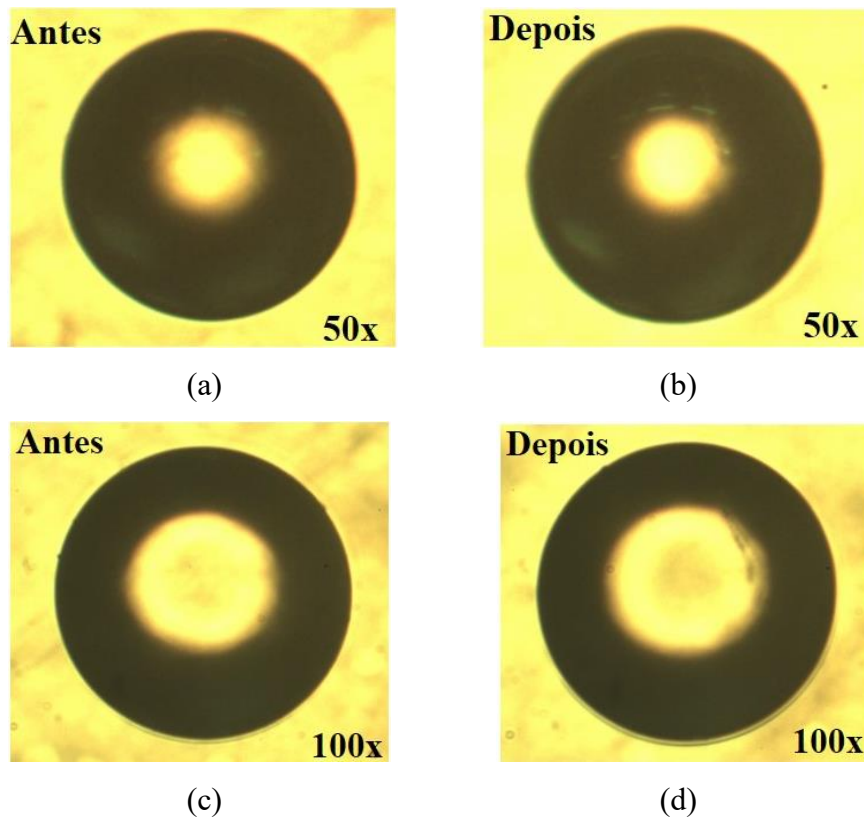
Figura 26- Microesferas comerciais: (a) antes e (b) após a exposição ao CaCl_2 , com aumento de 50 vezes e, (c) antes e (d) após a exposição, com aumento de 100 vezes





Fonte: Elaboração própria

Figura 27- Microesferas de CCA: (a) antes e (b) após a exposição ao CaCl_2 , com aumento de 50 vezes e, (c) antes e (d) após a exposição, com aumento de 100 vezes



Fonte: Elaboração própria

Novamente é possível verificar que as microesferas de CCA e as microesferas comerciais analisadas não apresentam superfície embaçada após serem submetidas a exposição ao CaCl_2 . Diante disso, é possível verificar que as microesferas de ambos tipos de vidro também atendem as especificações da norma neste quesito. Assim como feito para o ataque ácido, para reforçar que não houve mudanças da superfície das microesferas após a

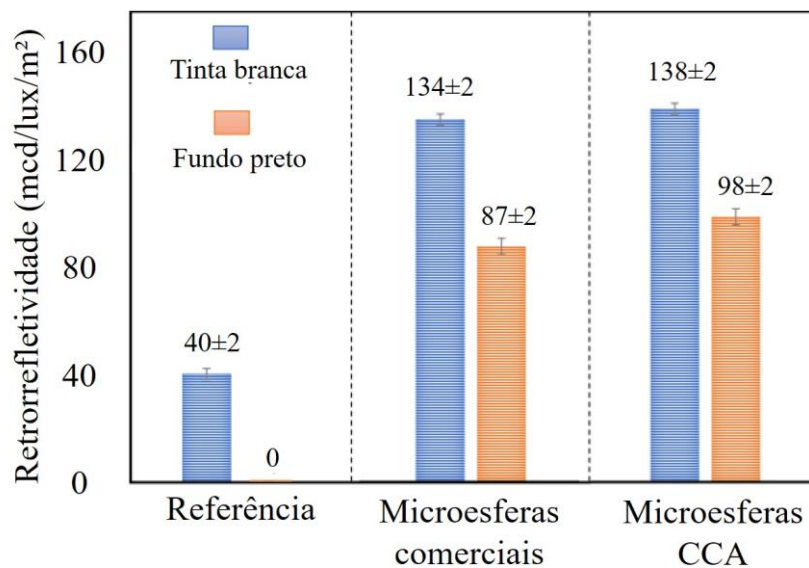
exposição, foram feitas medidas de retrorrefletividade antes e depois da exposição. Essas medidas também serão mostradas na seção 4.4 deste capítulo.

4.4 Retrorrefletividade

Seguindo os procedimentos descritos na seção 3.4.6, após a validação do processo de produção, quanto às características físicas e químicas das amostras de microesferas comerciais e de microesferas de CCA, foi realizada a avaliação do desempenho destas no que diz respeito a retrorrefletividade. As medições foram realizadas utilizando a geometria de 15 metros, configuração padrão adotada pela maioria dos órgãos de infraestrutura viária no Brasil, como DAER e DNIT.

Antes de realizar as medidas de retrorrefletividade das microesferas, foi medido a retrorrefletividade das duas referências: fundo preto (sem tinta de demarcação visando a avaliação intrínseca das microesferas) e tinta branca. É importante ressaltar que o objetivo principal das medições não foi atingir a maior retrorrefletividade possível, mas sim comparar o desempenho retrorrefletivo das microesferas à base de CCA com as comerciais do mesmo Tipo. A Figura 28 apresenta os resultados de retrorrefletividade obtidos para ambas as amostras (comerciais e CCA), considerando a distribuição granulométrica segundo a Tabela 2, no fundo preto e na tinta branca.

Figura 28- Retrorrefletividade para microesferas de CCA e microesferas comerciais

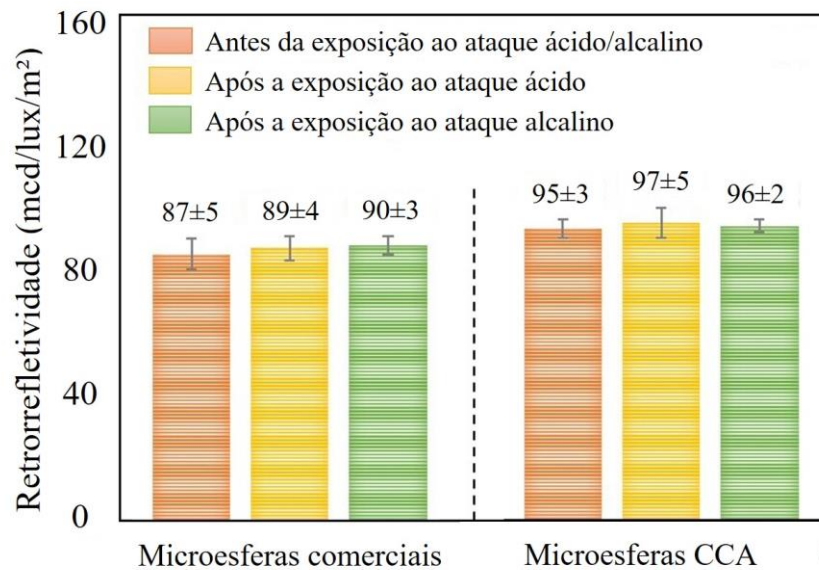


Fonte: Elaboração própria

Como é possível observar, tanto a presença das microesferas comerciais quanto as de CCA resultaram em aumentos substanciais na retrorefletividade em comparação com seus respectivos controles (referências). Mais importante ainda, os resultados revelaram que as microesferas de CCA apresentaram valores de retrorefletividade semelhantes aos das microesferas de vidro comerciais, corroborando sua potencial implementação em aplicações de demarcação viária.

Para complementar o teste de resistência ao ácido clorídrico e ao cloreto de cálcio, foram realizadas medições de retrorefletividade, no fundo preto, antes e depois de cada exposição química, para verificar se o desempenho óptico foi comprometido. Para isso, foram utilizadas microesferas com granulometria específica, compreendida entre 180 μm – 150 μm . A Figura 29 apresenta os resultados obtidos.

Figura 29- Retrorefletividade das microesferas antes e após os ataques químicos



Fonte: Elaboração própria

É possível observar na Figura 29 que as microesferas também não mostraram mudanças significativas nos valores de retrorefletividade após os ataques químicos, confirmando a estabilidade química e a confiabilidade do desempenho das microesferas de CCA em condições ambientais mais agressivas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram produzidas microesferas do Tipo IB a partir do vidro da cinza da casca de arroz (CCA), considerando a norma NBR 16184:2021 como referência, e suas propriedades foram comparadas com microesferas comerciais de mesmo tipo, considerando as características físicas, químicas e ópticas. Os resultados mostraram que:

- Os vidros produzidos apresentam uma característica de vidro incolor, revelada pelo espectro UV-Vis, satisfazendo um dos critérios da NBR 16184:2021;
- Na verificação do índice de refração, os vidros provenientes da CCA atenderam ao valor mínimo de 1,50 estabelecido pela NBR 16184:2021;
- No que se refere a análise granulométrica, as microesferas produzidas bem como as comerciais utilizadas como referência atendem aos critérios de limites estabelecidos pela norma NBR 16184:2021, tendo granulometria compreendida entre 63 μm e 300 μm , sendo classificadas como Tipo IB
- Referente à morfologia das amostras, as microesferas produzidas, bem como as comerciais, atendem aos percentuais mínimos de partículas esféricas e aos percentuais máximos de ovoides/geminadas e cacos, estabelecidos pela NBR 16184:2021;
- Em relação à densidade, as amostras de microesferas, de CCA e comerciais, se encontram dentro do limite de valores estabelecidos pela NBR 16184:2021;
- No que se refere ao teor de sílica, tanto as microesferas de CCA e comerciais apresentaram mais de 65% de sílica, atendendo a quantidade mínima especificada pela NBR 16184:2021. Além disso não apresentaram a presença de elementos tóxicos como arsênio (As), antimônio (Sb) e chumbo (Pb), como indica a NBR 16184:2021;
- Em relação a resistência aos ataques químicos das microesferas comerciais e de CCA, ambas as amostras analisadas atenderam os parâmetros dispostos na NBR 16184:2021, não apresentando superfície embaçada após o ataque ácido;
- No comparativo de retrorefletividade, tanto nas medidas considerando somente a influência das microesferas, no fundo preto, quanto nas medidas levando em conta a influência da tinta, as microesferas comerciais e as microesferas de CCA tiveram valores de retrorefletividade similares,

demonstrando a capacidade das microesferas de CCA para aplicações comerciais;

Os resultados obtidos neste trabalho comprovam a viabilidade técnica da produção de microesferas de vidro do Tipo IB, destinadas à aplicação na sinalização horizontal viária, a partir do vidro produzido com a CCA como fonte alternativa de sílica. As análises ópticas, físicas, químicas, morfológicas e de retrorrefletividade realizadas demonstraram que as microesferas produzidas atendem aos requisitos estabelecidos pela norma brasileira NBR 16184:2021, comprovando seu potencial de aplicação conforme as exigências normativas.

A transformação da CCA como fonte de sílica, para produção de vidros, e posterior produção em microesferas de vidro, reforça os princípios da economia circular e da valorização de resíduos sólidos, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do uso de recursos naturais não renováveis, como a areia de quartzo. Considerando a expressiva produção de arroz em países como o Brasil, a utilização desse resíduo como fonte alternativa de sílica caracteriza como uma solução ambientalmente sustentável, com potencial para aplicação em larga escala na indústria de materiais para sinalização viária.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14723:** Sinalização horizontal viária — Determinação do coeficiente de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 15 m – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- 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 16307:** Sinalização horizontal viária — Determinação do coeficiente de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 30 m – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15405:** Sinalização horizontal viária – Esferas de vidro – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16184:** Sinalização horizontal viária – Tintas para demarcação viária à base de resina acrílica – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- AKERMAN, M. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro.** Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil, p. 37, 2000. Disponível em: https://www.academia.edu/download/32460655/VIDROS_saint_gobain.pdf. Acesso em: 12 de abril de 2025.
- ARMELINI, C.; FERNANDES, D. **Utilização da sucata de vidro para a publicação de novos produtos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 48., 2004, Curitiba/PR. **Anais** [...]. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2004/artigos/48cbc-13-08.pdf>. Acesso em: 14 de abril de 2025.
- ARTERIS. **Metodologia para avaliação técnica e de durabilidade de sinalização horizontal de rodovias de tráfego muito pesado.** 2017.
- ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL - O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz em casca do Brasil. **Economia**, 2024. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/arroz>. Acesso em: 17 de abril de 2025.
- BARROS FILHO, C. A. **Produção de microesferas de vidro pelo método da chama horizontal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- BESSMERTNYI, V. S. et al. **Production of glass microspheres using the plasma-spraying method.** Glass and ceramics, v. 58, n. 7-8, p. 268-269, 2001.

BHTRANS - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S.A. **Especificações Técnicas:** Sinalização estatigráfica horizontal. Belo Horizonte/MG: Gerência de Sinalização - GESIN. 2019. 32 p

CARLSON, P. et al. **Evaluation of wetweather pavement markings.** 2005.

CHIM, M. R. **Estudo de caracterização e aplicabilidade comercial de vidro produzido a partir da cinza da casca de arroz como substituto à sílica de minério.** Orientadora: Chiara Valsecchi. 2025. 104p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, 2025, Alegrete. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/rii/10018>. Acesso em: 15 de abril de 2025.

CÓDIGO DE TRÂNSITO BRASILEIRO – **CTB** – LEI Nº 9.503, DE 23 DE SETEMBRO 1997. Conselho Nacional De Trânsito. 2021.

CONTRAN - CONTRAN CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Sinalização horizontal:** 1ª edição. Brasília/DF: Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, 2007. 128 p.

DE ARAUJO, E B. **Vidro: Uma Breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 19, n. 3, 1997.

DENATRAN – DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito:** Sinalização Horizontal. Volume 4. Brasília: DENATRAN, 2007.

DAER- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER/RS). **Instrução de Serviço para Estudos e Projetos CREMA IS-112/13.** Rio Grande do Sul: DAER/RS. 2013.

DETRAN/PR - DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO PARANÁ. **Sinalização Horizontal:** Fornecimento de tinta para demarcação viária a base de resina acrílica. s.d. Disponível em: https://www.detrans.pr.gov.br/arquivos/File/coordenadoria/coad/cp22/Sinalizacao_H.pdf. Acessado em: 22 de abril de 2025.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Sinalização Rodoviária.** Ministério dos Transportes, 1999.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Microesferas de vidro retrorrefletivas para sinalização horizontal rodoviária:** Especificação do material. Rio de Janeiro: DNER/IPR. 2000. 5 p.p. 94-102.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Obras complementares – Segurança no tráfego rodoviário – Sinalização horizontal:** Especificação de serviço. Rio de Janeiro/RJ: Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. 2018. 15 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. **Manual de sinalização rodoviária:** 3ª Edição. Rio de Janeiro/RJ: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2010. 412 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Estatística de produção - Arroz**. Agência de Informação Tecnológica, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>. Acesso em: 16 de abril de 2025.

ENKINS, Francis A.; WHITE, Harvey E. **Fundamentals of Optics**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1976.

FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto “Coca” [et al.]. **Segurança Viária**. São Carlos, SP: Suprema Gráfica e Editora, 2012.

FOLETTTO, Edson Luiz et al. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. Química Nova, v. 28, n. 6, p. 1055-1060, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422005000600021&script=sci_arttext. Acesso em: 04 de maio de 2025.

GIANCOLI, Douglas C. **Física: princípios com aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 2.

GONÇALVES, J. L. S. dos. **Fabricação de vidros utilizando sílica proveniente da cinza da casca do arroz**. Orientador: Jacson Weber de Menezes. 2019. 65p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, 2019, Alegrete. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/rii/4888>. Acesso em: 15 de abril de 2025.

HACKER, N. **Road Marking Materials: Their Properties and Uses**. London: TMS Publishing, 1995.

HECHT, E. **Óptica**. 4. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2002.

HOSSAIN, SK S.; MATHUR, Lakshya; ROY, P. K. Casca de arroz/cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica em cerâmica: uma revisão. **Revista das Sociedades Asiáticas de Cerâmica**, v. 6, n. 4, p. 299-313, 2018.

IRGA - INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ. **Produtividades Municipais - safra 2021/2022**. 2022. Disponível em: <https://admin.irga.rs.gov.br/upload/arquivos/202206/22145448-produtividades-municipais-safra-2021-22.pdf>. Acesso em: 17 de abril de 2025.

KOPF, J. **Reflecivity of pavement markings: analysis of retroreflectivity degradation curves**. Washington: University of Washington, 2004. Relatório Técnico. (Washington State Transportation Center – TRAC).

LARGERGREN, E. **Retroreflectivity of Pavement Markings: Literature Review**. Minnesota Department of Transportation, 2005.

LEE, C.; DONNELL, E. T. **Safety effects of centerline rumble strips: an empirical analysis using before–after and cross-sectional methods**. Accident Analysis & Prevention, v. 39, n. 3, p. 576–588, 2007.

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.

LIMA, L. C. de. **Fabricação de vidros boro sódico-cálcicos transparentes utilizando sílica proveniente da casca de arroz**. Orientador: Jacson Weber de Menezes. 2020. 63p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, 2020, Alegrete. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/handle/rii/5519>. Acesso em: 15 de abril de 2025.

MARÇAL, J. M. M. **Contribuições para a sustentabilidade na construção: comparação do vidro de cinza de casca com o vidro comercial para aplicação em aberturas**. 2023.

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.

MIGLETZ, J.; GRAHAM, J. **Long-term performance of pavement markings**. Report FHWA-RD-00-109. Washington: Federal Highway Administration, 2002.

MOREIRA, D. M.; MENEGON, S. J. Sinalização horizontal viária: análise das propriedades retrorrefletivas das microesferas de vidro. *Revista Brasileira de Engenharia de Tráfego*, 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.

PARCIANELLO, F. P. **Avaliação da influência textura do pavimento no desempenho da retrorrefletividade em demarcações viárias: estudo de caso em um trecho monitorado em Santa Maria/RS**. Orientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira. 2016. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Curso de Engenharia Civil, Santa Maria/RS, 2016.

PASE NETO, J. **Microesferas produzidas a partir da cinza da casca do arroz para aplicação na sinalização viária horizontal**. 2023.

PAVLIUKEVICH, Yury G.; PAPKO, Ludmila F.; TRUSOVA, Ekaterina E. Optical glass with increased refractive index based BaO–B₂O₃–SiO₂ system. *Chemistry and chemical engineering*, v. 2024, n. 2, p. 1, 2024.

POKORNY, A. **Obtenção e caracterização de espumas vítreas a partir de resíduos de vidro sodo-cálcicos e calcário dolomítico como agente espumante**. Orientador: Dr. Carlos Pérez Bergmann. 2006. 129 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Mestrado em Engenharia, Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/8020>. Acesso em 12 de abril de 2025.

ROBERTSON, H. D. **Transportation Engineering and Planning**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2011.

ROSA, S. E. S. da; COSENZA, J. P.; BARROSO, D. V. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil**. BNDES Setorial, n. 26, p. [101-137], set. 2007., 2007.

SALLES, M. R. et al. Materiais de sinalização viária: desempenho retrorrefletivo de diferentes microesferas de vidro. **Revista Transportes**, v. 23, n. 2, p. 89–98, 2015.

SANTOS, W. J. **Caracterização de vidros planos transparentes comerciais**. Scientia Plena, v. 5, n. 2, 2009.

SCHWAB, R. **Pavement Marking Handbook**. Texas Department of Transportation, 1999.

SELLMEIER, W. **Zur Erklärung der abnormen Farbenfolge im Spectrum einiger Substanzen**. Annalen der Physik, v. 219, n. 6, p. 272–282, 1871.

SHELLENBERGER, K.; LOGAN, B. E. **Effect of molecular scale roughness of glass beads on colloidal and bacterial deposition**. *Environmental Science & Technology*, Washington, v. 36, n. 2, p. 184–189, 2002.

SILVA, G. L. C. D. **Geração e otimização de microesferas vítreas produzidas a partir da cinza da casca de arroz**. Orientador: Dr. Jacson Weber de Menezes. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, Alegrete/RS, 2020. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/handle/rii/5280>. Acesso em 14 de abril de 2025.

SMADI, G. et al. Factors affecting the performance of retroreflective glass beads for pavement markings. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 140, n. 2, p. 203–210, 2014.

SMITH, D. Y.; SHILES, E.; INOKUTI, Mitio Inokuti, Refraction and dispersion in optical glass. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**. v. 218, p. 170-175, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X04000333>. Acesso em: 01 de julho de 2025.

SOUZA, M. F. **Aproveitamento de resíduos vítreos para produção de microesferas retrorrefletivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SYNOWICKI, Ron A.; JOHS, Blaine D.; MARTIN, Andrew C. Optical properties of soda-lime float glass from spectroscopic ellipsometry. **Thin Solid Films**, v. 519, n. 9, p. 2907–2913, 2011. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004060901001759>. Acesso em: 01 de julho de 2025.

TIBIRIÇÁ, L. G. **A cadeia produtiva mineral da areia em Goiás**. Ateliê Geográfico, Goiânia/GO: Programa de pós-graduação em Geografia do IESA, ed. 12, ano 2018, p. 118–131, Semestral.

TOMÁS, A. L. **Produção e caracterização de microesferas vítreas de diferentes cores produzidas a partir de vidros reciclados para a sinalização viária**. 2024.

TONG, Jufang et al. **Fabrication of glass microspheres using the powders floating method.** In: 2009 Symposium on Photonics and Optoelectronics. 2009, Wuhan. IEEE, 2009. p. 1-3.

VIRGINIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - VDOT. **Pavement marking materials and retroreflectivity standards.** Virginia: VDOT Research Council, 2008.

ZHANG, Y. **Nighttime Visibility of Pavement Markings: Effects of Retroreflectivity and Roadway Lighting.** Dissertation (Ph.D.) – University of Iowa, Iowa City, 2009.

ZHANG, Y. **Performance Evaluation of Retroreflective Pavement Markings in Various Environmental Conditions.** Journal of Transportation Engineering, v. 136, n. 12, p. 1143–1149, 2010.