

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
MESTRADO EM ENGENHARIA**

JULIANO PASE NETO

**REENGENHARIA DO CICLO PRODUTIVO DE MICROESFERAS APLICADAS À
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL**

**Alegrete
2026**

JULIANO PASE NETO

**REENGENHARIA DO CICLO PRODUTIVO DE MICROESFERAS APLICADAS À
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL**

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

2026

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).

P277r Pase Neto, Juliano

Reengenharia do ciclo produtivo de microesferas aplicadas à sinalização horizontal / Juliano Pase Neto.
80 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIA, 2026.

"Orientação: Jacson Weber de Menezes".

1. Microesferas. 2. Reciclagem de vidro. 3. Economia circular. I. Título.

JULIANO PASE NETO

**REENGENHARIA DO CICLO PRODUTIVO DE MICROESFERAS APLICADAS À
SINALIZAÇÃO HORIZONTAL**

Dissertação apresentada ao Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 19/02/2026

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes

Orientador

Unipampa

Prof. Dr. Luis Fernando de

Ávila FT-Unicamp

Prof. Dra^a. Chiara

Valsecchi Unipampa



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES , PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/02/2026, às 09:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI , PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/02/2026, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Luis fernando de Avila , Usuário Externo**, em 20/02/2026, às 19:00, 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 **1966675** e o código CRC **5CF20806**.

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram a seguir por este caminho.

AGRADECIMENTOS

Dedico primeiramente à minha família. Aos meus pais, Estelamaris Bertoldo e Valdir Meneghetti Pase, e aos meus irmãos, Regina Pase e Marcos Pase. Muito obrigado pelo apoio e por sempre me incentivarem a conquistar meus sonhos.

Ao meu orientador, Professor Jacson Webber de Menezes, expresse minha profunda gratidão pela orientação desde a iniciação científica até a pós-graduação. Obrigado pela ajuda, conselhos e ensinamentos transmitidos ao longo destes anos. Também agradeço à professora Chiara Valsecchi, que sempre me auxiliou nas atividades quando necessário.

Agradeço também aos colegas e amigos do grupo de pesquisa: Ingrid, Felix, Paola e Patrícia. Obrigado pela ajuda, conversas e risadas durante o mestrado. Um agradecimento especial à Ingrid e ao Felix, pois sem o auxílio deles este trabalho não seria possível.

Aos meus amigos e familiares que estiveram presentes em minha trajetória, muito obrigado pelo apoio e por compartilharem esta caminhada comigo.

Aos técnicos e funcionários da UNIPAMPA, por todo o auxílio e suporte prestados.

Por fim, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa, fator importante para a realização e conclusão deste trabalho.

RESUMO

Estima-se que o mercado de microesferas no Brasil, aplicado a sinalização horizontal, seja cerca de 40 mil toneladas/ano sendo que a maioria do material para a fabricação vem da utilização de vidros reciclados, o que mostra a importância da reciclagem de vidro para esta aplicação. Durante o processo de fabricação, existe uma perda de material (resíduo), seja pelo método de fabricação que não coleta toda a massa de vidro inserida nos queimadores ou pela granulometria das microesferas que não se encaixam na classificação das normas vigentes. Não existem informações claras sobre esta perda, mas supondo que as 40 mil toneladas por ano venham de um processo com 70% de eficiência, a quantidade de resíduo gerado pode ser estimada em 12 mil toneladas/ano. Este resíduo representa um desperdício de valor anual de aproximadamente 3,6 milhões de reais considerando que o custo médio do kg do vidro incolor gira em torno de R\$ 0,30. Muitas vezes este resíduo acaba ocupando grandes espaços na indústria que poderiam ser usados para armazenar as microesferas úteis para a comercialização. Dependendo, este resíduo pode ser descartado de forma inadequada ao meio ambiente, o que pode ser um problema ainda maior. Como o vidro é um material teoricamente 100% reciclável, neste trabalho, propõe-se uma abordagem de reciclagem interna na cadeia de microesferas, em que os resíduos de produção são reintroduzidos como matéria-prima secundária na formulação de novos vidros. Essa estratégia, alinhada aos princípios da economia circular, visa reduzir o desperdício, prolongar o ciclo de vida útil do vidro e minimizar a extração de recursos naturais. Além disso, este resíduo já possui características desejadas para as microesferas, como por exemplo, a coloração (incolor). Neste sentido, vidros reciclados foram usados para gerar microesferas do Tipo IB; com o resíduo destas microesferas foi fabricado vidro novamente, o qual foi moído para gerar novas microesferas. Este processo seguiu por três vezes além da geração de microesferas a partir do vidro reciclado original. Visando avaliar se a qualidade das microesferas se mantém após cada etapa, foram realizadas caracterizações das amostras do ponto de vista de: composição, espectros ópticos, índice de refração, densidade, morfologia, granulometria e retrorefletividade. Os resultados mostram que a reciclagem de vidro, nesse contexto, transcende a simples recuperação de um material; trata-se de uma reengenharia do ciclo produtivo, na qual cada resíduo pode ser reinterpretado como um insumo de valor com características desejadas. A implementação de um ciclo fechado de reaproveitamento de resíduos finos de microesferas para a produção de novos vidros estabelece um modelo de economia circular aplicada, reduzindo impactos ambientais, custos energéticos e a necessidade de aterros industriais.

Palavras-chaves: microesferas; reciclagem de vidro; economia circular.

ABSTRACT

It is estimated that the glass bead market in Brazil for horizontal road marking is approximately 40,000 tons per year. Most of the manufacturing material comes from recycled glass, highlighting the importance of glass recycling for this application. During the manufacturing process, material loss (waste) occurs, either due to the production method failing to collect all the glass mass inserted into the burners or because the particle size of the beads does not meet current standards. While there is no clear data on these losses, assuming that the 40,000 tons per year result from a process with 70% efficiency, the amount of waste generated is estimated at 12,000 tons per year. This waste represents an annual financial loss of approximately 3.6 million BRL, considering an average cost of R\$ 0.30 per kg for clear glass. Frequently, this waste occupies large industrial spaces that could otherwise store finished products. Furthermore, improper environmental disposal of this residue can pose significant problems. Since glass is theoretically 100% recyclable, this study proposes an internal recycling approach within the glass bead supply chain, where production waste is reintroduced as secondary raw material for the formulation of new glass. This strategy, aligned with circular economy principles, aims to reduce waste, extend the glass life cycle, and minimize the extraction of natural resources. Additionally, this waste already possesses desired characteristics for glass beads, such as color (colorless). In this context, recycled glass was used to produce Type IB glass beads; the resulting waste was then used to manufacture new glass, which was ground to generate new beads. This process was repeated three times beyond the initial generation from the original recycled glass. To evaluate whether the quality of the beads is maintained after each stage, the samples were characterized based on composition, optical spectra, refractive index, density, morphology, particle size, and retroreflectivity. The results show that glass recycling, in this context, transcends simple material recovery; it represents a reengineering of the production cycle, where each waste component can be reinterpreted as a high-value input. The implementation of a closed-loop system for reusing fine glass bead waste in the production of new glass establishes a model of applied circular economy, reducing environmental impacts, energy costs, and the need for industrial landfills.

Keywords: glass beads; glass recycling; circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do fenômeno de retrorreflexão em microesferas de vidro.	23
Figura 2 - Características das geometrias de 15 (a) e 30 (b) metros.	24
Figura 3 - Retrorrefletômetros: a) portátil; b) montados sobre rodas; c) montados em veículos.	26
Figura 4 - Diagrama dos procedimentos experimentais que foram realizados para a produção das microesferas.	41
Figura 5 - a) Fragmentos de vidro plano após fragmentação inicial; b) Vidro refundido uma vez; c) Fragmentos do vidro plano comercial em dimensões micrométricas após moagem.	42
Figura 6 - Conjunto de peneiramento utilizado para separação dos fragmentos que foram utilizados para produção de microesferas.	43
Figura 7 - a) Cadinho de platina e ouro com partículas finas de vidro plano comercial para refundição; b) Forno mufla; c) Vidro vertido em uma placa metálica após resfriamento.	44
Figura 8 - a) Protótipo baseado no método de pulverização por chama; b) Detalhes da zona de alimentação e coleta.	45
Figura 9 - Espectômetro de fluorescência de Raios-X utilizado neste trabalho.	47
Figura 10 - a) Vidro plano comercial; b) Vidro refundido 1 vez; c) Vidro refundido 2 vezes; d) Vidro refundido 3 vezes.	48
Figura 11 - Espectômetro de fluorescência de Raios-X utilizado neste trabalho.	48
Figura 12 - Aparato utilizado para análise do índice de refração das amostras de vidro.	49
Figura 13 - Processo de contagem de partículas realizados neste trabalho.	50
Figura 14 - Conjunto de peneiramento composto por peneiras granulométricas com malhas de 300 μm , 212 μm , 150 μm , 63 μm e fundo utilizado para análise granulométrica.	51
Figura 15 - Proveta de vidro com 25 ml de água destilada e microesferas submersas.	53
Figura 16 - Retrorrefletômetro.	54
Figura 17 - Placa de MDF utilizada para análises de retrorrefletividade.	54

Figura 18 - Placa de MDF e amostras que simulam o pavimento com adição de microesferas.....	55
Figura 19 - Espectros de transmitância para as diferentes amostras de vidro estudadas.....	58
Figura 20 - Micrografia óptica de diferentes formas morfológicas presentes nas amostras de microesferas de vidro.	61
Figura 21 - Microscopia ópticas das amostras: a) MEVP; b) ME1R; c) ME2R; d) ME3R.	61
Figura 22 - Comparativo entre os requisitos morfológicos da norma com os obtidos das amostras de microesferas produzidas.....	63
Figura 23 - Distribuição granulométricas das microesferas produzidas.	64
Figura 24 - Retrorrefletividade das amostras na geometria de 15 metros.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de retrorrefletividade para cada classe de rodovia.	25
Tabela 2 - Faixas granulométricas das microesferas do tipo IB e IIA.	31
Tabela 3 - Lista de siglas utilizadas para as diferentes amostras de vidro.	56
Tabela 4 - Composição química de cada tipo de vidro.	57
Tabela 5 - Índice de refração obtida dos tipos de vidros pesquisados.	59
Tabela 6 - Lista de siglas utilizadas para as diferentes amostras de microesferas de vidro.	60
Tabela 7 - Morfologia das microesferas de vidro produzidas.	62
Tabela 8 - Composição granulométrica das microesferas da faixa granulométrica de 180 -150 μm	64
Tabela 9 - Densidade de massa das microesferas produzidas.	65

LISTA DE ABREVIATURAS

°C - Graus Celsius °C/min: Graus Celsius por minuto

g - Gramas

g/cm³ - Gramas por centímetro cúbico

g/m² - Gramas por metro quadrado

kg - Quilograma

kgf/cm² - Quilograma-força por centímetro quadrado

km/h - Quilômetros por hora

m - Metros

mcd.m⁻².lx⁻¹ - Milicandelas por metro quadrado por lux

mg/kg - Miligramas por quilograma

ml - Mililitros

mm - Milímetros

mph - Milhas por hora

nm - Nanômetros

R\$ - Real

tCO₂ - Toneladas de dióxido de carbono

toneladas/ano - Toneladas por ano

µm - Micrômetros

LISTA DE SIGLAS

ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV - Análise de Ciclo de Vida
ADAS - *Advanced Driver Assistance Systems*
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
CEN - Comitê Europeu de Normalização
CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito
COP30 - 30ª Conferência das Partes da ONU sobre Mudanças Climáticas
DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FRX - Fluorescência de Raios X
GLP - Gás Liquefeito de Petróleo
LIDAR - *Light Detection and Ranging*
LKA - *Lane Keep Assist*
MD - *Machine Detectability*
MEVP - Microesferas de vidro plano comercial
ME1R - Microesferas de vidro 1 vez refundido
ME2R - Microesferas de vidro 2 vezes refundido
ME3R - Microesferas de vidro 3 vezes refundido
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MUTCD - *Manual on Uniform Traffic Control Devices*
NBR - Norma Brasileira
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS - Organização Mundial da Saúde
ONU - Organização das Nações Unidas
PEVs - Pontos de Entrega Voluntária
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
Q_d - Visibilidade Diurna
R_L - Retrorrefletividade Noturna
SLR - Sistema de Logística Reversa
SRT - *Skid Resistance Tester*
UV-Vis - Espectroscopia de Ultravioleta-Visível

VP - Vidro plano comercial

V1R - Vidro 1 vez refundido

V2R - Vidro 2 vezes refundido

V3R - Vidro 3 vezes refundido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 Estrutura do trabalho	20
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 A sinalização viária horizontal	21
2.1.1 Propriedades ópticas das microesferas vítreas e fenômenos físicos envolvidos.....	22
2.1.2 Relação entre propriedades ópticas das microesferas e a norma DNIT 409/2017	23
2.1.3 Avaliação da retrorrefletividade em função de parâmetros críticos	27
2.1.4 Microesferas e a norma brasileira NBR 16184:2021	30
2.1.5 Pesquisas correlatas atuais na área de microesferas	31
2.2 Economia circular do vidro, balanço energético e sustentabilidade	35
2.2.1 Relação com o Acordo de Paris, Decreto nº 11.300/2022 e COP30	36
2.3 Sistema de logística reversa (SLR) de vidros e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).....	37
2.4 O resíduo fino da produção de microesferas de vidro	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 Preparação dos fragmentos de vidro para produção de microesferas	41
3.1.1 Moagem dos vidros e separação da faixa de produção de microesferas .	41
3.1.2 Processo de refundição dos fragmentos de vidro	43
3.2 Produção de microesferas de vidro	44
3.3 Análises das amostras de vidro.....	46
3.3.1 Natureza do vidro, teor de sílica e presença de elementos tóxicos por fluorescência de raios X	46
3.3.2 Espectrofotometria UV-Vis	47

3.3.3 Índice de refração	49
3.4 Análise das amostras de microesferas de vidro do tipo IB	50
3.4.1 Análise morfológica e granulométrica	50
3.4.2 Densidade de massa	52
3.4.3 Retrorrefletividade	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 Caracterização dos vidros	56
4.1.1 Fluorescência de Raios X	56
4.1.2 Espectrometria UV-Vis	57
4.1.3 Índice de refração	58
4.2 Caracterização das microesferas	59
4.2.1 Caracterização granulométrica e morfológica	60
4.2.2 Densidade de massa	65
4.2.3 Retrorrefletividade	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A sinalização viária horizontal desempenha um papel fundamental na orientação dos condutores, assegurando a legibilidade das vias e contribuindo para a segurança no trânsito, especialmente em condições adversas de iluminação ou clima (DNIT, 2010; CONTRAN, 2022). Entre os diversos parâmetros que determinam sua eficácia, a retrorrefletividade é um dos mais relevantes, pois define a capacidade das demarcações no pavimento de refletirem a luz dos faróis de um veículo de volta à origem, permitindo que as marcas sejam visíveis durante a condução noturna (BABÍĆ *et al.*, 2020; HO *et al.*, 2021; LEE *et al.*, 2024). Esse fenômeno físico é obtido por meio da incorporação de microesferas de vidro na tinta utilizada para a marcação, cuja função óptica é redirecionar o feixe luminoso de forma controlada e eficiente, mantendo o contraste e a visibilidade mesmo em condições de baixa iluminância (ZHANG; HUMMER; RASDORF, 2009). A indústria de microesferas normalmente usa vidros incolores reciclados para a geração do seu produto (BURGHARDT *et al.*, 2022). Neste sentido, a reciclagem de vidro representa um eixo estratégico para a transição rumo a uma economia circular no Brasil, especialmente quando associada à cadeia produtiva de microesferas vítreas utilizadas na sinalização horizontal de vias públicas. Apesar do vidro ser um material teoricamente 100% reciclável e infinitamente reaproveitável sem perda de qualidade (DELBARI; HOF, 2024), o país ainda apresenta um desempenho modesto frente aos padrões internacionais. Estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO, 2023) indicam que aproximadamente 47% do vidro consumido no Brasil é efetivamente reciclado, percentual significativamente inferior ao observado na Europa (cerca de 78%), Japão (96%) e Alemanha (83%), entre outros. Tal discrepância evidencia lacunas estruturais em logística reversa, segregação de resíduos e valorização econômica do vidro pós-consumo.

A coleta seletiva de vidro no Brasil enfrenta desafios adicionais relacionados à mistura de cores e à contaminação por outros materiais (CIRCULA VIDRO, 2024; ABIVIDRO, 2024). O vidro verde e âmbar apresentam menor demanda e restrições de uso em processos que exigem transparência, o que limita sua reintegração ao ciclo produtivo (GERACE; MAURO, 2024). Muitas vezes, no processo de reciclagem os vidros e cacos de vidros de diferentes cores estão misturados, o que inviabiliza a sua utilização para a fabricação de materiais incolores. No contexto das microesferas

vítreas para sinalização viária, a exigência de vidros incolores e de alta pureza é particularmente crítica. Essas microesferas, classificadas segundo a norma NBR 16184:2021 em tipos IB (premix) e IIA (drop-on), são incorporadas à tinta de demarcação para garantir retrorrefletividade e visibilidade noturna. Entretanto, a fabricação convencional depende de matérias-primas vítreas homogêneas e com baixa coloração residual, o que restringe o uso de vidros reciclados coloridos (ABNT 2021). Além disso, uma parcela significativa da produção industrial de microesferas gera resíduos finos — partículas menores que o limite especificadas para os tipos normalizados — que não são comercialmente aproveitáveis no contexto da sinalização viária (SWARCO, 2023). Embora existem estudos que mostram que estas microesferas menores podem ser usadas como partículas de reforço e tenacidade em compósitos poliméricos (YADAV; LOHIYA, 2021; LEE; YEE, 2001) o que se observa normalmente é o acúmulo ou descarte inadequado, gerando impactos ambientais e custos de armazenagem.

Nesse cenário, propõe-se uma abordagem inovadora de reciclagem interna na cadeia de microesferas, em que os resíduos finos de produção, que não se enquadram em nenhuma classificação de microesferas, são reintroduzidos como matéria-prima secundária na formulação de novos vidros. Além desses vidros já estarem de acordo com as normas vigentes no que se refere a coloração, essa estratégia, alinhada aos princípios da economia circular, visa reduzir o desperdício, prolongar o ciclo de vida útil do vidro e minimizar a extração de recursos naturais. Em síntese, o aproveitamento de resíduos não conformes em granulometria, mas tecnicamente adequados em composição, representa uma oportunidade concreta de inovação tecnológica com impacto ambiental positivo, convergindo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 12 e 13) das Nações Unidas. A consolidação dessa prática poderia transformar um passivo industrial em um recurso estratégico, aproximando o Brasil dos padrões internacionais de reciclagem e sustentabilidade no setor vítreo.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade dos vidros e microesferas aplicados a sinalização horizontal considerando uma abordagem de reciclagem interna dos resíduos de vidro como matéria-prima secundária na formulação de novos vidros e microesferas.

1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar vidros incolores reciclados para aplicação em sinalização horizontal;
- b) Utilizar o resíduo gerado da fabricação das microesferas para a produção de novos vidros e novas microesferas e caracterizar os novos materiais, repetindo este processo mais duas vezes;
- c) Fabricar microesferas do Tipo IB a partir dos vidros reciclados;
- d) Caracterizar as microesferas geradas a partir dos vidros reciclados;
- e) Comparar os resultados para cada novo vidro produzido do ponto de vista de composição de material, índice de refração e resposta ótica na faixa visível do espectro;
- f) Comparar os resultados para cada novas microesferas do ponto de vista de densidade, morfologia, granulometria e retrorrefletividade.

1.3 Estrutura do trabalho

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

- Capítulo 1 – Introdução e Objetivo: Este capítulo apresenta a motivação para a escolha do tema de estudo, com ênfase numa economia circular dentro da própria indústria.
- 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 para a execução.
- 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

Em conformidade com os objetivos apresentados no Capítulo 1, este capítulo aborda conceitos sobre a sinalização horizontal viária, a economia circular do vidro, balanço energético e sustentabilidade e resíduo fino da produção de microesferas de vidro.

2.1 A sinalização viária horizontal

A sinalização viária horizontal desempenha papel central na organização do fluxo de veículos e na segurança do transporte rodoviário, atuando como referência visual primária para motoristas, ciclistas e pedestres, especialmente em condições de baixa luminosidade ou visibilidade reduzida causada por chuva, neblina ou desgaste do pavimento (DNIT, 2010). A literatura demonstra que a ausência de sinalização ou sua degradação contribui diretamente para o aumento da acidentalidade, particularmente em estradas de tráfego rápido ou em trechos urbanos com elevada interação modal (CNT, 2018; FERKO *et al.*, 2019). Segundo dados da Organização Mundial da Saúde, aproximadamente 1,19 milhão de mortes por ano estão relacionadas a acidentes de trânsito, sendo que condições inadequadas de sinalização figuram entre os fatores de risco identificados (OMS, 2023).

Do ponto de vista técnico, a sinalização horizontal oferece informação visual de curta distância, permitindo correções rápidas de trajetória e mantendo o condutor orientado espacialmente. Estudos de ergonomia visual indicam que, durante a condução noturna, entre 70% e 90% da percepção do motorista provém da interpretação das linhas de demarcação do pavimento, o que torna a qualidade óptica das demarcações um elemento crítico da segurança operacional (BABIC; ŠČUKANEC; BABIC, 2016). Dessa forma, a durabilidade, luminância e retrorrefletividade das sinalizações pintadas tornam-se parâmetros essenciais para o desempenho da infraestrutura viária.

Do ponto de vista mais atual, o desenvolvimento recente de sistemas avançados de assistência ao motorista (ADAS), como permanência automática em faixa (LKA), frenagem assistida e direcionalização inteligente, ampliou ainda mais a relevância da sinalização viária. Tais sistemas dependem diretamente da capacidade dos sensores ópticos e algoritmos embarcados identificarem, de forma precisa, as

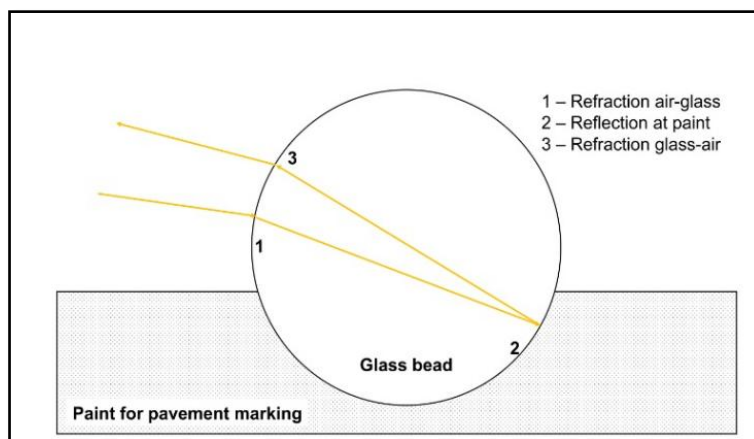
linhas de demarcação do pavimento (NITIN; SATI; MEHTA, 2024). Em situações onde a sinalização apresenta baixo contraste, desgaste ou baixa retrorrefletividade, os sistemas ADAS perdem funcionalidade, aumentando o risco de manobras incorretas ou falhas operacionais (STORSÆTER; PITERA; MCCORMACK, 2021). Em veículos autônomos, esse efeito é ainda mais crítico. A sinalização horizontal passa a ser não apenas uma referência ao motorista humano, mas um componente de navegação para o sistema de percepção computacional do veículo. Assim, a infraestrutura viária deixa de ser passiva e passa a ser parte integrante do ecossistema de automação.

2.1.1 Propriedades ópticas das microesferas vítreas e fenômenos físicos envolvidos

A amplificação da sinalização horizontal é conseguida com a utilização de microesferas aplicadas a tinta, amplificação que se baseia no fenômeno da retrorreflexão (BURGHARDT *et al.*, 2020). Mais especificamente, a retrorreflexão é o fenômeno físico que permite que parte da luz proveniente dos faróis dos veículos seja devolvida na direção do motorista, aumentando substancialmente a visibilidade noturna das demarcações (OSICHENKO; SPIELHOFER, 2018). A retrorrefletividade das demarcações viárias horizontais é resultado direto da interação da luz incidente dos faróis dos veículos com microesferas vítreas parcialmente embebidas no filme de tinta. Essa interação é governada por uma combinação de fenômenos ópticos fundamentais, incluindo refração, reflexão parcial e total, espalhamento e absorção, todos condicionados pela geometria do sistema óptico veículo–sinalização–observador. Quando um feixe luminoso incide sobre uma microesfera, ocorre inicialmente a refração na interface ar–vidro, descrita pela Lei de Snell. O raio refratado propaga-se no interior da microesfera até atingir a interface vidro–tinta (ou vidro–ar, nos casos de exposição inadequada), onde pode ocorrer reflexão parcial ou reflexão total interna, dependendo do ângulo de incidência interno e do índice de refração relativo entre os meios (STOUDT; VEDAM, 1978). Em condições ideais, o feixe é redirecionado aproximadamente na direção da fonte luminosa, caracterizando o fenômeno da retrorreflexão, na Figura 1 este fenômeno pode ser observado. A eficiência desse processo depende fortemente da esfericidade, do índice de refração da microesfera, do grau de ancoragem na tinta e da distribuição granulométrica, os

quais determinam o acoplamento óptico entre a fonte luminosa e o observador (SCHWAB, 1999).

Figura 1 - Representação esquemática do fenômeno de retrorreflexão em microesferas de vidro.

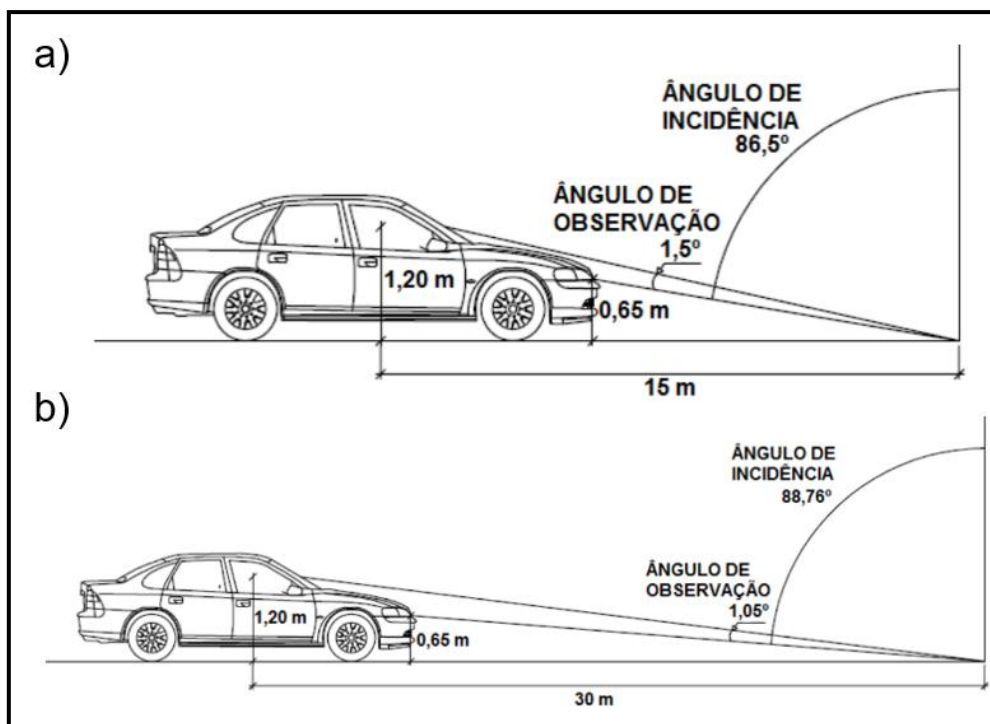


Fonte: MAZZONI *et al.* (2022).

2.1.2 Relação entre propriedades ópticas das microesferas e a norma DNIT 409/2017

A norma DNIT 409/2017 – PRO – Sinalização Horizontal estabelece critérios mínimos de desempenho retrorrefletivo com base em geometrias padronizadas de observação, que representam condições reais de condução. Especificamente, a norma adota as geometrias equivalentes a 15 m e 30 m, que simulam as distâncias dos condutores dos veículos até a posição da microesfera na sinalização. Na Figura 2 é observado as características de ambas geometrias.

Figura 2 - Características das geometrias de 15 (a) e 30 (b) metros.



Fonte: HENZ (2018).

Essas geometrias influenciam diretamente o ângulo de entrada da luz na microesfera e o ângulo de observação, impactando o caminho óptico interno e, portanto, a eficiência da retroreflexão. A norma DNIT correlaciona esses efeitos a valores mínimos de retrorefletividade noturna (R_L), medidos em milicandelas por metro quadrado por lux ($\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$), refletindo a capacidade das microesferas em manter desempenho óptico sob diferentes condições geométricas e operacionais. A NBR 14723:2020 define que retrorefletividade inicial é o valor da retrorefletividade da demarcação medido até 15 dias após a aplicação na via e, retrorefletividade residual como sendo o valor medido da retrorefletividade após a retrorefletividade inicial.

A avaliação do desempenho dos materiais de sinalização horizontal é realizada por normas técnicas que estabelecem valores mínimos de retrorefletividade para garantir a visibilidade noturna e a segurança viária. No Brasil, a norma DNIT 100/2018 – ES determina os requisitos para a sinalização rodoviária, baseado na geometria de 15 metros. Para a sinalização provisória, a retrorefletividade inicial mínima deve ser de $150 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$, para a cor branca e $100 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$, para a amarela. Já para a sinalização definitiva, as exigências sobem para $250 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ (branca) e 150

$\text{mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ (amarela). Em relação à retrorrefletividade residual a norma estipula valores mínimos de $100 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ para a cor branca e $80 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ para a amarela.

Em âmbito estadual, o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER), através do Programa de Contratos de Restauração e Manutenção (CREMA-RS), estabelece critérios ligeiramente distintos. A retrorrefletividade inicial mínima recomendada para a geometria de 15 metros seja superior a $220 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ para a tinta branca e $170 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ para a amarela. Para a retrorrefletividade residual, o programa define um valor de $130 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ para ambas as cores.

No cenário internacional, nos Estados Unidos, não existe um valor único para a retrorrefletividade inicial, ela é definida pelos departamentos de transportes de cada estado. A norma federal “*Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)*” define valores mínimos de manutenção, baseando-se em uma geometria de 30 metros. O manual exige, sob condições secas, um desempenho de $100 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ para rodovias com limites de velocidade iguais ou superiores a 70 mph (113 km/h). Para rodovias com limites a partir de 35 mph (56 km/h), o mínimo é de $50 \text{ mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$ desde que o volume médio diário anual seja de pelo menos 6.000 veículos.

Na Europa, a normalização é conduzida pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) através da norma EN 1436. O sistema europeu classifica o desempenho retrorreflexivo em classes, permitindo que as autoridades de cada país determinem a classe exigida conforme a importância da via. A Tabela 1 apresenta as classes de desempenho estipuladas por esta norma.

Tabela 1 - Valores de retrorrefletividade para cada classe de rodovia.

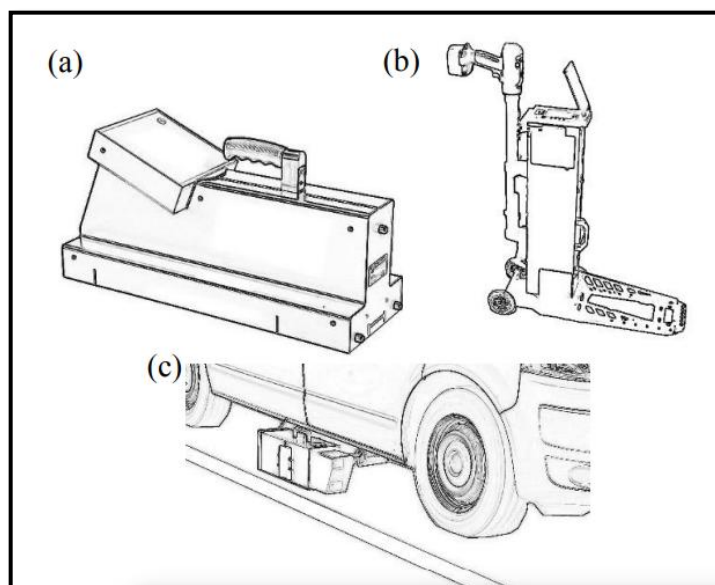
Classe	Valor mínimo ($\text{mcd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$)	Aplicação típica
R2	100	Valor mínimo aceitável para manutenção
R3	150	Padrão comum em estradas principais
R4	200	Estradas de alto fluxo e segurança
R5	300	Sinalização nova

Fonte: Adaptado HIGHWAY MARKINGS (2015).

Os equipamentos mais utilizados para avaliação da retrorrefletividade são os retrorrefletômetros portáteis e móveis. Os portáteis são geralmente manuseados

manualmente para medir o R_L da sinalização horizontal de um local para outro ou montados sobre rodas e empurrados manualmente à velocidade de uma caminhada. Os móveis são montados em um dos lados de um veículo, e a medição é realizada enquanto o veículo se desloca a velocidades de até 120 km/h. Na Figura 3 pode-se visualizar os diferentes tipos de retrorrefletômetros (CHOU *et al.*, 2020).

Figura 3 - Retrorrefletômetros: a) portátil; b) montados sobre rodas; c) montados em veículos.



Fonte: CHOU *et al.* (2020).

Os retrorrefletômetros portáteis possuem manuseio simples e intuitivo capaz de avaliar simultaneamente a retrorrefletância noturna (R_L) e a visibilidade diurna (Q_d). O aparelho emite luz (com o espectro semelhante ao de uma lâmpada de farol) sobre a faixa de sinalização no pavimento, um sensor mede a quantidade de luz que retorna diretamente para o aparelho (retrorrefletância), simulando o efeito de um farol de carro à noite. São capazes de avaliar a R_L na geometria de 30 metros ($88,76^\circ / 1,05^\circ$ (ASTM E1710) e na geometria de 15 metros ($86,5^\circ / 1,5^\circ$ (ABNT NBR 14723). Também avalia a visibilidade durante o dia, medindo a dispersão da luz na superfície. (EASYLUX, 2015).

2.1.3 Avaliação da retrorrefletividade em função de parâmetros críticos

a) Índice de refração das microesferas

O índice de refração das microesferas é o fator determinante no controle das propriedades retrorrefletivas de sistemas de sinalização viária horizontal. Fisicamente, o índice de refração é uma medida relativa da velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz em um determinado meio de propagação. Esta propriedade é crucial na óptica, uma vez que a razão entre os índices de refração de dois meios distintos governa o desvio (refração) da luz ao transitar entre eles. Atualmente, o índice de refração das microesferas ópticas aplicadas na sinalização horizontal varia de 1,5, para vidros de silicato convencionais, até 2,4, para composições vitrocerâmicas (BURNS; HEDBLOM; MILLER, 2008).

Wenzel *et al.* (2022) classificam as microesferas em quatro tipos, de acordo com o índice de refração (IR):

- **Padrão (*Standard*):** Produzidas a partir de vidro plano reciclado, possuem índice de refração de 1,5.
- **Grande (*Large*):** Também possuem índice de refração de 1,5, distinguindo-se pelo diâmetro maior, visando melhorar a visibilidade sob condições de chuva.
- ***Premium*:** Produzidas a partir de matérias-primas virgens com adição de dióxido de titânio (TiO₂). Possuem índice de refração entre 1,6 e 1,7.
- **Alto Índice (*High Index*):** Utilizadas em aplicações especiais (como aeroportos). Normalmente possuem índice de refração de 1,9 (podendo chegar a 2,4) e contêm alta porcentagem de TiO₂ (30-35%).

Um estudo conduzido por Pike e Datta (2020) avaliou os efeitos do índice de refração das microesferas de vidro (comparando valores de 1,5 e 1,9) e da geometria de medição sobre a retrorrefletividade. Os resultados indicaram que as esferas de alto índice apresentam desempenho significativamente superior, superando as esferas padrão tanto em geometrias de medição convencionais quanto não convencionais. Especificamente na geometria padrão de 30 m, as marcações com esferas de índice de refração de 1,9 exibiram uma retrorrefletividade média 171% maior do que as de índice de refração de 1,5. A análise demonstrou que a elevação do índice de refração

exerce um impacto mais relevante na retrorrefletividade do que o aumento no diâmetro das esferas, embora também tenha sido notada uma tendência geral de aumento de desempenho com a utilização de microesferas maiores, de índice de refração de 1,5.

b) Granulometria das microesferas

Segundo Mazzoni *et al.* (2022), a granulometria é um fator muito importante no contexto das microesferas. Sob a perspectiva óptica, a intensidade de retorreflexão das microesferas é proporcional ao diâmetro das microesferas (LENG *et al.*, 2021). Embora a granulometria defina o desempenho retrorreflexivo, a eficiência máxima depende de como esse tamanho se relaciona com a profundidade de embutimento. A retorreflexão atinge seu pico quando as esferas estão submersas em cerca de 40 a 65% do seu diâmetro, fazendo com que o plano focal do material coincida com a interface refletora (GROGES, 2008; HOLLINGSWORTH, 2012). Consequentemente, o uso de partículas de maiores granulometrias favorece o índice de retorreflexão inicial e intermediária, visto que parte do seu diâmetro permanece sobre a película de tinta. No entanto, elas se desprendem da tinta com mais facilidade e rapidez por estarem menos embutidas na base. Outro ponto importante, é que as microesferas de maior dimensão possuem desempenho melhor em condições de chuva porque seu diâmetro maior permite que elas se projetem acima da lâmina de água que se forma sobre a marcação nos períodos chuvosos. Em contrapartida as microesferas de menores dimensões desempenham um papel fundamental na extensão da vida útil da sinalização. As microesferas de menores diâmetros apresentem menor retorreflexão imediata, por estarem submersas na camada de tinta, demandando que ocorra o desgaste da película para apresentar retorreflexão satisfatória. Este mecanismo garante a manutenção dos índices de visibilidade ao longo do tempo (COVES-CAMPOS *et al.*, 2018; BURNS; HEDBLUM; MILLER, 2008).

Adicionalmente, uma composição granulométrica equilibrada de microesferas contribui para aumentar a densidade de partículas no sistema de demarcação, fazendo com que as microesferas menores consigam preencher os espaços entre as microesferas maiores, aumentando o número de partículas disponíveis para retorreflexão (HOLLINGSWORTH, 2012).

Trabalhos experimentais realizados em campo que adotaram uma distribuição granulométrica controlada apresentaram correlação entre a retrorefletividade inicial e a longevidade do sistema de sinalização. Enquanto as microesferas de maior diâmetro garantem elevados índices de retrorefletividade inicial, as partículas de menor granulometria asseguram a visibilidade noturna ao longo da vida útil da demarcação. (PEREIRA *et al.*, 2024; MAZZONI *et al.*, 2022; MAZZONI *et al.*, 2024).

Dessa forma, o controle granulométrico das microesferas deve ser tratado como uma variável crítica no projeto de sinalização viária, sendo ajustado em conjunto com o tipo de tinta, o método de aplicação e as condições de serviço. O equilíbrio entre as frações granulométricas permite otimizar o desempenho entre a retrorefletividade imediata e a vida útil da demarcação. Isso garante níveis adequados de visibilidade ao longo do tempo e, conseqüentemente, a otimização dos custos operacionais de manutenção das rodovias.

c) Ancoragem das microesferas na tinta

O grau de embutimento das microesferas de vidro na tinta de sinalização é um fator fundamental para a eficiência da retrorefletividade. Se o embutimento for insuficiente, a microesfera perde a capacidade de adesão ao ligante, aumentando a taxa de desprendimento causado pelo impacto e pela carga dos pneus dos veículos. Por outro lado, se o embutimento for excessivo, ocorre a perda da função de retrorefletividade, tornando a sinalização ineficaz ou invisível durante a noite (LEE; LEE; OH, 2012).

O estudo de Lee, Lee e Oh (2012) demonstra que o nível de embutimento necessário para maximizar a retrorefletividade varia conforme o índice de refração da microesfera:

- Índice de 1,5: o desempenho máximo é alcançado com cerca de 60% de embutimento. Como o foco da luz ocorre fora da microesfera, ela necessita estar mais imersa na tinta para garantir o retorno da luz ao condutor;
- Índice de 1,9: ponto ideal ocorre com 50% de embutimento;
- Índice de 2,2: melhor desempenho é obtido com apenas 30% de embutimento.

Já O'Brien (1989) desenvolveu uma metodologia experimental utilizando sistemas termoplásticos de hidrocarbonetos (brancos e amarelos) de diversos fabricantes. O material foi aplicado sobre placas de vinil preto. Esferas de vidro, tanto sem revestimento quanto tratadas contra umidade, foram aplicadas imediatamente sobre as faixas, com densidades variando entre 48,8 g/m² e 683,54 g/m². A avaliação consistiu em análises subjetivas de retrorrefletividade visual em sala escura (com iluminação a distâncias de 3,05 a 7,62 metros), complementadas por fotomicrografias de seção transversal (aumento de 100x) para mensurar o embutimento. Os resultados indicaram que as esferas não tratadas apresentaram embutimento excessivo (75% a 100%) devido ao fenômeno de molhamento, resultando em retrorrefletividade inaceitável, enquanto as esferas tratadas alcançaram o embutimento ideal de 60% a 65%, proporcionando boa retrorrefletividade inicial em todos os sistemas testados.

2.1.4 Microesferas e a norma brasileira NBR 16184:2021

A NBR 16184:2021 estabelece requisitos para microesferas de vidro utilizadas em sinalização viária no Brasil, incluindo composição química, percentual mínimo de sílica, limites de metais pesados, distribuição granulométrica, índice de refração e esfericidade mínima. A norma distingue por exemplo microesferas Tipo IB, as quais são incorporadas à tinta durante a aplicação e permanecem internas à película, permitindo a retrorreflexão apenas após o desgaste superficial da sinalização, e Tipo IIA, aplicadas superficialmente para proporcionar retrorreflexão imediata.

Ademais, a NBR 16184:2021 determina parâmetros que asseguram a estabilidade óptica e a eficiência luminosa do material ao longo do tempo. Em conformidade com o documento, ambos os tipos mencionados devem ser limpos, translúcidos, incolores e isentos de matérias estranhas. Devem possuir, no mínimo, 77% de partículas esféricas, com um limite máximo de 3% de partículas quebradas, vidro não fundido ou elementos estranhos, e no máximo 20% de fragmentos ovóides, deformados, geminados ou bolhas gasosas. Adicionalmente, as microesferas devem ser fabricadas em vidro tipo soda-cal, com teor mínimo de sílica de 65% em massa, índice de refração superior a 1,5 e densidade entre 2,4 g/cm³ e 2,6 g/cm³. Quanto a elementos tóxicos, a norma estipula o limite máximo de 200 mg/kg para Arsênio (As), Chumbo (Pb) e Antimônio (Sb). As faixas granulométricas exigidas para esses tipos de microesferas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Faixas granulométricas das microesferas do tipo IB e IIA.

Abertura da Peneira (μm)	Tipo IB	Tipo IIA
	% passante	
1000	-	100
850	-	98 - 100
600	-	75 - 95
300	100	9 - 35
212	85 - 100	-
180	-	0 - 5
150	15 - 55	-
63	0 - 10	-

Fonte: Adaptado NBR 16184 (2021).

2.1.5 Pesquisas correlatas atuais na área de microesferas

Wenzel et al. (2022) desenvolveram um estudo no qual é analisada a relação entre o dano superficial de microesferas de vidro e a perda progressiva da retrorrefletividade em sinalizações viárias horizontais, com ênfase nos impactos sobre a durabilidade e a sustentabilidade dos materiais. Quatro tipos de microesferas, padrão, grandes, premium e de alto índice (1,9), foram submetidos a ensaios de abrasão e testes em mesa rotativa que simulam o tráfego veicular. As análises por microscopia óptica e eletrônica revelaram que as microesferas de alto índice, embora apresentem retrorrefletividade inicial elevada, degradam-se rapidamente devido à menor resistência à abrasão, reduzindo significativamente sua vida útil. Já as microesferas premium, com incorporação moderada de TiO_2 , demonstraram melhor equilíbrio entre desempenho óptico e resistência mecânica. O estudo conclui que a sustentabilidade das sinalizações viárias está diretamente relacionada à vida útil das microesferas, pois materiais mais duráveis exigem menos renovações e, conseqüentemente, menor consumo de recursos, energia e emissões associadas à produção e aplicação. Dessa forma, as microesferas premium foram consideradas a opção mais sustentável, ao aliarem alto desempenho retrorrefletivo, maior resistência e menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida.

O artigo de Biermeier, Kemper e García-Hernandez (2025) aborda a crescente importância das sinalizações viárias horizontais na era dos sistemas avançados de

assistência ao condutor (ADAS) e dos veículos automatizados, cuja navegação depende da capacidade de sensores ópticos e LiDAR (*Light Detection and Ranging*) em detectar e interpretar corretamente as faixas de rodagem. A pesquisa analisa como os parâmetros fotométricos, R_L e Q_d , diretamente influenciados pela qualidade e composição das microesferas de vidro retrorrefletivas incorporadas à tinta, determinam a detectabilidade das marcações por sensores sob diferentes condições ambientais (dia/noite, seco/úmido). Foram realizados testes controlados com diferentes tipos de marcações e materiais, correlacionando o contraste percebido pelos sensores (Machine Detectability – MD) com as propriedades fotométricas medidas conforme a norma CEN EN 1436. Os resultados demonstraram forte correlação positiva entre MD e R_L/Q_d , confirmando que maiores índices de retrorrefletividade, proporcionados por microesferas adequadamente especificadas (diâmetro, índice de refração e integridade superficial), melhoram a visibilidade tanto para motoristas humanos quanto para sistemas automatizados. Contudo, o estudo evidencia que os critérios atuais de manutenção, focados apenas em valores mínimos de R_L e Q_d , são insuficientes para garantir detecção confiável em todas as condições, especialmente sob chuva e à noite, quando o contraste entre a faixa e o pavimento se reduz. Os autores propõem um modelo dinâmico de manutenção que incorpora parâmetros de contraste e condições ambientais, permitindo ajustar os limites de R_L e Q_d conforme o tipo de sensor e o contexto operacional. Essa abordagem representa um avanço em eficiência e sustentabilidade, ao evitar substituições prematuras e reduzir o consumo de materiais e energia nos processos de repintura, promovendo uma gestão inteligente e ambientalmente responsável da sinalização viária. Assim, o trabalho contribui para o alinhamento entre os domínios operacionais reais (OD) e os domínios projetados (ODD) de veículos automatizados, reforçando o papel estratégico da retrorrefletividade das microesferas de vidro como elemento-chave para a segurança e sustentabilidade das estradas inteligentes do futuro.

Coves-Campos *et al.* (2018) detalha uma investigação experimental *in situ* realizada na rodovia rural em Alicante, Espanha, sob condições reais de tráfego e clima, visando identificar a composição ideal para sinalizações horizontais para maximizar a durabilidade e a segurança. Durante 18 meses, foram monitoradas 18 combinações de materiais de aspersão (*drop-on*) aplicadas sobre uma base de tinta acrílica branca, testando variáveis como o tamanho das microesferas de vidro (125 – 1180 μm), tratamentos de superfície e a inclusão de agregados antiderrapantes

transparentes (vidro 600 μm) ou opacos (mármore Macael 400 μm). Os pesquisadores avaliaram rigorosamente o fator de luminância, as coordenadas cromáticas, a retrorreflexão em condições secas e úmidas, além da resistência ao deslizamento utilizando o pêndulo TRRL (*Transportation and Road Research Laboratory*), seguindo normas internacionais. Os resultados demonstraram que a visibilidade diurna não foi um fator crítico, pois todas as amostras permaneceram dentro dos limites normatizados ao longo do período de teste. Contudo, a retrorreflexão noturna foi fortemente impactada pela composição. O grupo contendo apenas microesferas de vidro obteve o melhor desempenho inicial, enquanto agregados opacos reduziram a visibilidade noturna, ao sombrear as esferas e ocupar o espaço que deveria ser delas. Observou-se que microesferas de maior diâmetro são essenciais para a visibilidade sob chuva, por sobressaírem na lâmina d'água, mas tendem a se desprender mais rapidamente da tinta se não possuem revestimentos, resultando em microcrateras que acumulam detritos e borracha, escurecendo a sinalização. O sistema de aplicação em camada dupla, apresentou maior durabilidade e uma característica de autorregeneração da retrorreflexão entre o sexto e o décimo segundo mês, momento em que o desgaste da camada superficial expôs novas microesferas da camada inferior. Além disso, confirmou-se que as marcações com melhores índices de aderência foram as que mais perderam luminância e retrorreflexão ao longo do tempo, pois sua rugosidade captura maior quantidade de sujeira e borracha de pneus. Conclui-se que a otimização da segurança viária exige um equilíbrio entre a granulometria das esferas, o uso de adesivos e a aplicação de sistemas multicamadas para garantir visibilidade e aderência prolongadas.

Pashkevicha (2020) destaca em seu trabalho que a seleção das microesferas de vidro é tão determinante para a sustentabilidade das marcações rodoviárias quanto a escolha da tinta. Enquanto as microesferas padrão apresentam tipicamente um índice de refração de 1,5 e esfericidade superior a 80%, as microesferas premium são fabricadas com matérias-primas virgens, possuindo índice de refração elevado (1,6–1,7), esfericidade superior a 90% e maior resistência a riscos e abrasão. Os testes de campo demonstraram que a maior resistência das esferas *premium* protege a camada de tinta, prolongando significativamente a vida útil do sistema. Em ambientes urbanos, por exemplo, sistemas utilizando 100% de microesferas premium atingiram uma durabilidade estimada de 3,5 anos, comparado a apenas 1 ano para sistemas com esferas normais. Embora as esferas *premium* tenham um custo inicial mais elevado,

elas geram economia a longo prazo ao reduzirem a frequência de manutenções necessárias. A melhoria na durabilidade resulta em benefícios ambientais diretos, pois menos intervenções de manutenção significam menores emissões acumuladas de poluentes ao longo do ciclo de vida da estrada.

Teixeira *et al.* (2025) investigou a viabilidade técnica da utilização da cinza da casca de arroz como fonte de sílica para a produção de microesferas de vidro destinadas à sinalização rodoviária horizontal. Usualmente, essas microesferas são fabricadas a partir de areia natural, um recurso que enfrenta escassez global devido à alta extração. Considerando que o arroz é um dos cultivos mais abundantes no Brasil e seu processamento gera resíduos, a cinza da casca do arroz surge como um subproduto rico em sílica (podendo conter até 99,6% de SiO_2), oferecendo uma alternativa de baixo custo para a fabricação de vidro. A pesquisa detalha a formulação de um vidro contendo aproximadamente 70% de SiO_2 derivado da cinza da casca de arroz, fundido a 1500 C° e processado através do método de esferoidização por chama em laboratório para geração de microesferas de vidro. As microesferas resultantes foram caracterizadas conforme a norma NBR 16184:2021 para esferas do Tipo IB (premix), que são incorporadas à tinta antes da aplicação. Os resultados demonstraram que o material produzido possui boas propriedades físicas e químicas. A esfericidade atingiu 91%, superando a amostra comercial analisada, com uma distribuição granulométrica entre 63 e $300\ \mu\text{m}$. O índice de refração medido foi de 1,55, um valor superior ao de microesferas de vidro soda-cal comum, atribuído à presença de boro na composição, o que favorece a eficiência retrorreflexiva. Em testes de desempenho, as microesferas produzidas com cinza da casca de arroz apresentaram valores de retrorreflexividade de $138\ \text{mcd}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{lx}^{-1}$ em superfícies pintadas, superando ligeiramente os resultados das microesferas comerciais de referência. Além disso, o material demonstrou alta estabilidade química, resistindo a ataques de ácido clorídrico e cloreto de cálcio sem apresentar embaçamento ou perda de brilho superficial. O estudo conclui que a transformação de resíduos agrícolas em materiais de alta tecnologia é viável, promovendo a economia circular e reduzindo o impacto ambiental. Essa inovação não apenas atende aos requisitos técnicos de segurança viária, mas também se alinha aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável, valorizando um resíduo disponível.

2.2 Economia circular do vidro, balanço energético e sustentabilidade

A produção de vidro apresenta uma interseção direta entre consumo energético, uso de recursos minerais e emissão de gases de efeito estufa. O vidro convencional utilizado em microesferas é composto predominantemente por sílica (SiO_2), acompanhada de Na_2O proveniente do carbonato de sódio (Na_2CO_3) e, em menor proporção, CaO oriundo do carbonato de cálcio (CaCO_3) (OIKONOMOPOULOU, 2019). A fusão desses componentes ocorre tipicamente entre 1400°C e 1550°C , caracterizando um processo altamente intensivo em energia térmica. Essa energia é fornecida majoritariamente por combustíveis fósseis, como gás natural, GLP ou óleo combustível, resultando em emissões diretas de CO_2 durante a queima (COLANGELO, 2024).

Além das emissões decorrentes da combustão em si, há também emissões processuais, associadas à decomposição térmica de carbonatos utilizados como fundentes. A reação de decomposição do CaCO_3 , por exemplo, libera CO_2 diretamente para a atmosfera:



Esse processo químico é responsável por uma fração significativa das emissões totais da indústria vidreira, representando entre 18% e 30% das emissões totais dependendo da composição do vidro produzido (FURSZYFER DEL RIO, 2022). Assim, o ciclo produtivo do vidro pode ser descrito por duas fontes principais de emissão:

1. Emissões de energia térmica (queimando combustíveis fósseis no forno);
2. Emissões de processo (decomposição dos carbonatos).

Neste sentido, a economia circular emerge então como estratégia para reduzir significativamente ambas as frentes emissoras. Ao incorporar caco de vidro (cullet) no processo de fusão, reduz-se diretamente a necessidade de carbonatos e a demanda térmica do forno. O vidro reciclado possui estrutura amorfa já formada, o que significa que sua fusão requer temperaturas menores, reduzindo entre 25% e 35% o consumo energético necessário para o processo (BAEK; KIM; JANG, 2024). Essa relação é

amplamente documentada em estudos de análise de ciclo de vida (ACV), demonstrando que para cada 10% de vidro reciclado introduzido na mistura de fusão, há uma redução de aproximadamente 2% a 3% no consumo energético e nas emissões associadas (BRISTOGIANNI; OIKONOMOPOULOU, 2022). Em casos onde o vidro reciclado substitui integralmente o uso de matérias-primas minerais primárias, a economia de CO₂ pode exceder 0,30 tCO₂ para cada tonelada de vidro produzido, considerando emissões de combustão e de processo (HESTIN; BURGOS, 2016).

No contexto de sustentabilidade, essa redução se conecta diretamente ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 (Consumo e Produção Sustentáveis) e ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) da Agenda 2030 da ONU. A reciclagem de vidro não só diminui o uso de recursos naturais e o volume de resíduos destinados a aterros, como também representa uma estratégia de mitigação climática alinhada a compromissos internacionais de descarbonização.

O conceito de economia circular, nesse sentido, reconfigura o vidro não como material descartável, mas como um sistema em ciclo fechado, onde o valor material é mantido ao longo de diferentes ciclos produtivos. Entretanto, a implementação plena da circularidade no setor vidreiro enfrenta barreiras, entre elas a segregação inadequada dos descartes, a logística reversa limitada e a existência de frações finas de vidro que não retornam facilmente às rotas tradicionais de reciclagem (DELBARI; HOF, 2024; BLENGINI *et al.*, 2012). É precisamente nessa última barreira que se insere o foco deste trabalho.

2.2.1 Relação com o Acordo de Paris, Decreto nº 11.300/2022 e COP30

O Acordo de Paris (2015) estabeleceu o compromisso global de limitar o aumento da temperatura média do planeta a 1,5°C, demandando reduções graduais das emissões industriais. O Decreto nº 11.300/2022 institui o Plano Nacional de Neutralidade Climática do Brasil, reforçando metas setoriais vinculantes de redução de emissões. A COP30, sediada no Brasil em 2025, destaca a necessidade de soluções industriais escaláveis e baseadas em evidências, especialmente para setores de processo (*hard-to-abate*). A revalorização do resíduo fino de microesferas representa um exemplo concreto de descarbonização de base material, alinhado à transição energética brasileira e ao fortalecimento de cadeias produtivas sustentáveis.

Ou seja, a reintegração do resíduo fino de vidro se alinha diretamente a esses objetivos por proporcionar:

- Redução de emissões diretas e indiretas de CO₂;
- Ampliação da circularidade de materiais no setor industrial;
- Redução da dependência de combustíveis fósseis na fusão.

2.3 Sistema de logística reversa (SLR) de vidros e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)

O Sistema de Logística Reversa (SLR) de vidros é o conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos — neste caso, embalagens e produtos de vidro pós-consumo — ao setor empresarial, para que sejam reaproveitados em novos ciclos produtivos ou tenham destinação ambientalmente adequada. Em outras palavras, trata-se de um mecanismo de retorno do vidro ao fabricante após o uso pelo consumidor, garantindo que o material seja reintegrado à cadeia produtiva e não descartado em aterros. Essa devolução pode ocorrer por meio de coleta seletiva municipal, pontos de entrega voluntária (PEVs), parcerias com cooperativas de catadores ou programas de logística reversa geridos pelo setor privado. O Sistema de Logística Reversa (SLR) de vidros é um dos pilares da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil (Lei nº 12.305/2010), e ele tem uma função estratégica dentro da cadeia de reciclagem e economia circular. A PNRS estabelece que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes são corresponsáveis pelo ciclo de vida dos produtos. No caso do vidro, isso significa que as indústrias produtoras e as empresas que colocam embalagens de vidro no mercado devem implementar sistemas de coleta, transporte e reciclagem.

Desde 2021, com o Acordo Setorial para Logística Reversa de Embalagens em Geral, o vidro passou a ser incluído de forma mais efetiva nos sistemas nacionais, coordenados por entidades como a Coalizão Embalagens e a Abividro (Associação Brasileira das Indústrias de Vidro). O modelo de implementação é de responsabilidade compartilhada, no qual:

- O consumidor devolve ou separa o resíduo adequadamente;

- O comércio disponibiliza pontos de coleta;
- As cooperativas fazem a triagem;
- As indústrias recolhem o vidro beneficiado e o reinserem na fusão para novos produtos.

Apesar do avanço normativo, a efetividade do sistema ainda é limitada. Dados da Abravidro (2025) e do Ministério do Meio Ambiente indicam que menos de 50% do vidro pós-consumo retorna às fábricas, enquanto países europeus superam 80% de taxa de retorno. Os principais entraves são:

- Baixa taxa de coleta seletiva municipal (atinge apenas 22% dos municípios);
- Logística pesada e cara (o vidro é denso e de baixo valor agregado);
- Mistura de cores e contaminação que inviabilizam a fusão direta;
- Ausência de incentivos fiscais e infraestrutura de PEVs adequada.

No contexto das microesferas vítreas para sinalização viária, o SLR de vidros poderia ter um papel estratégico ainda pouco explorado. As indústrias de microesferas, que necessitam de vidros incolores e limpos, poderiam atuar como destino qualificado para parte do vidro retornado pelo sistema de logística reversa. Mais do que isso e indo de encontro ao escopo desta dissertação, o próprio resíduo fino gerado pelas indústrias de microesferas, não enquadrado nos tamanhos normalizados pela NBR 16184:2021, pode ser reencaminhado ao ciclo produtivo, fechando um sistema de logística reversa interna. Essa abordagem permite criar um ciclo fechado de reciclagem, em que o vidro é continuamente reaproveitado dentro da própria indústria, reduzindo o descarte e promovendo autossuficiência em matérias-primas secundárias.

Por outro lado, o SLR é um instrumento central da economia circular, pois transforma resíduos em recursos e reduz a necessidade de matérias-primas virgens. Cada tonelada de vidro reciclado evita a extração de cerca de 1,2 tonelada de areia natural, 0,13 tonelada de barrilha (carbonato de sódio) e 0,09 tonelada de calcário, além de reduzir o consumo energético em até 25% no processo de fusão (FEVE, 2010). Neste sentido, a integração da logística reversa com a produção de microesferas não apenas reduz o passivo ambiental, mas também fortalece a sustentabilidade industrial e diminui custos operacionais. O reaproveitamento contínuo de resíduos vítreos,

internos e externos, representaria um passo concreto rumo a uma cadeia produtiva de microesferas verdadeiramente circular.

2.4 O resíduo fino da produção de microesferas de vidro

A fabricação de microesferas de vidro envolve etapas de moagem, esferoidização térmica e classificação granulométrica. Durante esse processo, uma fração significativa do vidro se converte em pó fino, tipicamente com granulometria muito inferior ao limite de utilização para microesferas do Tipo IB ou IIA. Na maior parte das indústrias produtoras de microesferas, especialmente na América do Sul, essas partículas finas, uma vez que não se encaixam nas classificações, são descartadas, gerando uma fração residual que, apesar de possuir composição química adequada, não retorna ao processo produtivo. Em alguns casos, esse material é enviado para aterros industriais, representando desperdício de matéria-prima já beneficiada, perda de energia já investida no ciclo térmico e emissões indiretas incorporadas ao resíduo. Estima-se que, em plantas com capacidade entre 8.000 e 35.000 toneladas anuais, o resíduo fino pode representar até 30% da massa total processada, configurando um problema ambiental e econômico de escala industrial. A reintegração desse resíduo fino diretamente na fusão de vidro permite a sua revalorização direta. Essa revalorização é o ponto central de contribuição deste trabalho, onde a ideia é não apenas reciclar vidro, mas recircular o resíduo fino da própria cadeia de microesferas, gerando um ciclo fechado com o mínimo de perdas. Quando o resíduo de vidro é reinserido no processo produtivo na forma de cullet, a estrutura vítrea amorfa já se encontra formada, o que implica redução na energia necessária para atingir o estado líquido. Estudos experimentais indicam que a introdução de 30% a 60% de vidro reciclado pode reduzir a temperatura operacional do forno entre 80°C e 150°C, correspondendo a uma diminuição de 20% a 32% no consumo térmico total (SCALET *et al.*, 2013; SARDESHPANDE; GAITONDE; BANERJEE, 2007). Neste sentido, a inserção de resíduo fino reinserido na cadeia produtiva fornece os seguintes ganhos adicionais:

1. Evita-se o descarte do resíduo e sua destinação a aterros industriais;
2. Reduz-se a necessidade de extração e moagem de matéria-prima mineral;

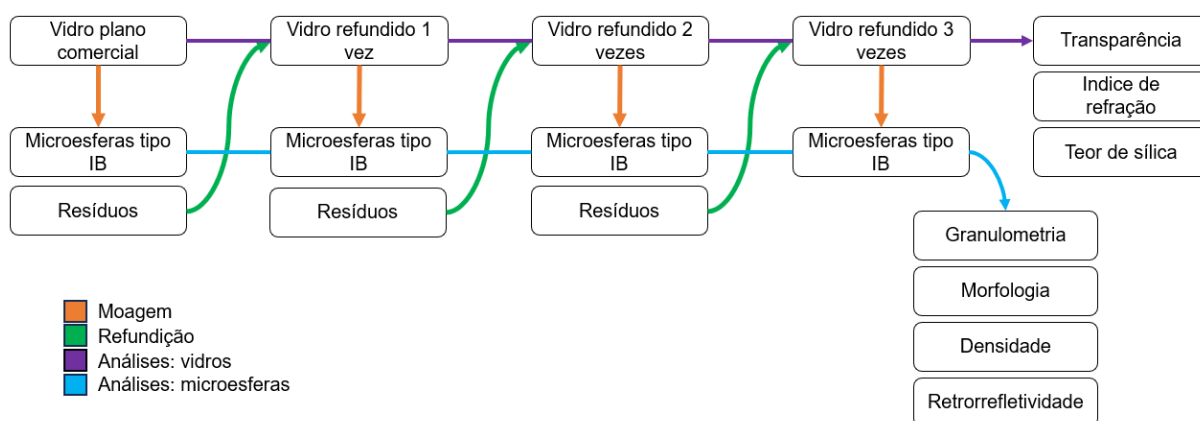
3. Aproveita-se a energia incorporada previamente ao vidro que originou o resíduo.

Logo, trata-se de um processo de circularidade interna, sendo um pouco diferente da reciclagem convencional baseada em logística reversa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 4 apresenta o diagrama dos procedimentos experimentais adotados neste trabalho. O esquema ilustra as etapas sequenciais para a produção das microesferas de vidro do tipo IB aplicadas à sinalização horizontal, partindo da preparação do vidro plano comercial até a caracterização dos materiais obtidos.

Figura 4 - Diagrama dos procedimentos experimentais que foram realizados para a produção das microesferas.



Fonte: Elaboração Própria

3.1 Preparação dos fragmentos de vidro para produção de microesferas

A fabricação das diferentes amostras de microesferas de vidro do tipo IB partiu inicialmente do vidro plano comercial. Este material foi fragmentado e triturado em partículas micrométricas. Os fragmentos que se situaram dentro da faixa granulométrica do tipo IB foram utilizados para a produção das partículas esféricas. Já os fragmentos com diâmetro abaixo da faixa de produção, considerados resíduos, foram refundidos e, posteriormente, passaram novamente pelo procedimento de moagem e produção de microesferas. Esse processo repetiu-se até a obtenção de amostras distintas para cada ciclo de refusão (1, 2 e 3 vezes).

3.1.1 Moagem dos vidros e separação da faixa de produção de microesferas

O processo de moagem dos vidros ocorreu de forma manual, com o auxílio de almofariz e pistilo. Inicialmente, por meio de golpes com o pistilo, fragmentaram-se os

diferentes tipos de vidro em pedaços menores para facilitar a moagem. Em seguida, realizou-se a moagem até a obtenção de partículas finas. Na Figura 5 é apresentado os vidros antes do procedimento, bem como o material triturado ao final do processo.

Figura 5 - a) Fragmentos de vidro plano após fragmentação inicial; b) Vidro refundido uma vez; c) Fragmentos do vidro plano comercial em dimensões micrométricas após moagem.



Fonte: Elaboração Própria.

Posteriormente, realizou-se a separação da faixa granulométrica adequada para as microesferas do tipo IB, utilizando um conjunto de peneiras (Bertel®) de 250 μm , 125 μm e fundo. Adicionaram-se os fragmentos na peneira de 250 μm e, mediante movimentos horizontais e verticais, separou-se a faixa granulométrica de 125 - 250 μm . Esta fração foi selecionada por enquadrar-se nos limites especificados para o tipo IB.

Os fragmentos que ficaram retidos na peneira de 250 μm retornaram ao processo de moagem, enquanto o material passante da peneira de 125 μm foi recolhido e reservado para a refundição. A Figura 6 ilustra o conjunto de peneiramento utilizado.

Figura 6 - Conjunto de peneiramento utilizado para separação dos fragmentos que foram utilizados para produção de microesferas.



Fonte: Elaboração Própria.

3.1.2 Processo de refusão dos fragmentos de vidro

Inicialmente, os fragmentos de vidro plano passantes na peneira de 125 μm foram recolhidos para serem submetidos à refusão em cadinho de platina e ouro. O material fragmentado foi transferido para o cadinho e posicionado no interior de um forno mufla (Fortelab®, modelo FE 1600/20). O ciclo térmico iniciou-se com uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até 900 $^{\circ}\text{C}$, mantendo-se este patamar por 1 minuto. Na sequência, a temperatura foi elevada a 1200 $^{\circ}\text{C}$ (7 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$), com permanência de 1 minuto. Por fim, aqueceu-se até 1500 $^{\circ}\text{C}$, a uma taxa de 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, mantendo-se por 3 horas para a completa fusão e homogeneização do vidro.

Ao término do processo, o material fundido foi vertido sobre uma chapa metálica previamente aquecida a 400 $^{\circ}\text{C}$, para evitar choque térmico. O vertimento ocorreu em dois formatos distintos, em gotas, para a realização das análises de caracterização das amostras de vidro, e em fios, formato que facilita a moagem para a produção das microesferas. As amostras resfriaram a temperatura ambiente, constituindo a primeira refusão do vidro. O material remanescente aderido ao cadinho foi removido por choque térmico e coletado para também ser utilizado na produção de microesferas.

Ao realizar a primeira refundição, obtiveram-se novamente partículas finas. Estas partículas passaram pelo mesmo procedimento de refundição descrito anteriormente, gerando a segunda refundição do vidro. Da mesma forma, o processamento desta segunda amostra gerou excedentes que, após nova refusão, deram origem ao vidro após três refundições. A Figura 7 ilustra o processo de refundição.

Figura 7 - a) Cadinho de platina e ouro com partículas finas de vidro plano comercial para refundição; b) Forno mufla; c) Vidro vertido em uma placa metálica após resfriamento.



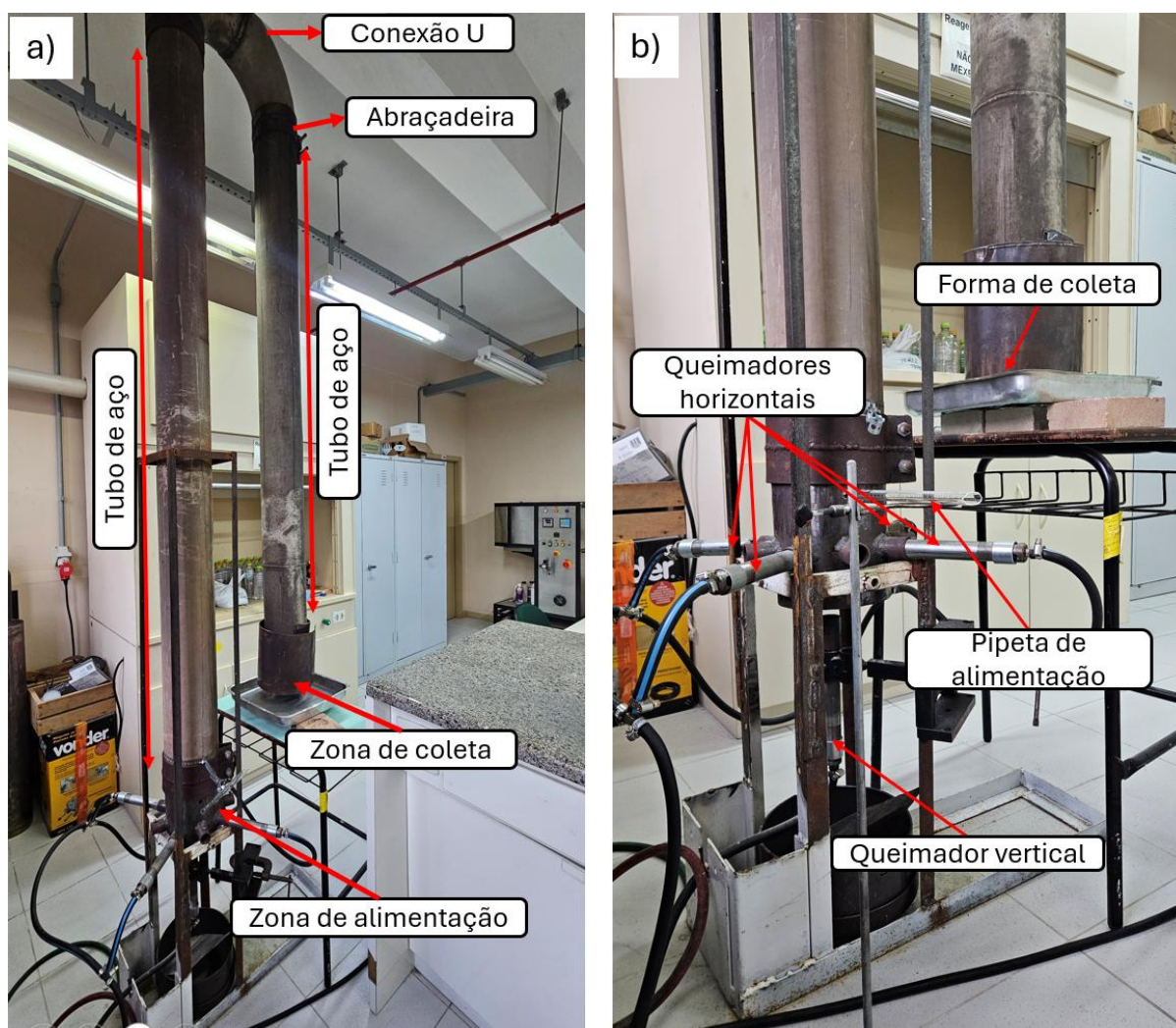
Fonte: Elaboração Própria.

3.2 Produção de microesferas de vidro

Após a conclusão do processo de moagem das diferentes amostras de vidro, as partículas, na faixa granulométrica de 125 μm a 250 μm , foram submetidas ao processo de esferoidização. A esferoidização das partículas irregulares foi realizada em um protótipo desenvolvido com base no método de pulverização por chama, localizado no Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos. O equipamento consiste em dois tubos de aço de 170 mm de diâmetro, instalados verticalmente e em paralelo, cuja ligação é feita por uma conexão em “U”, também de aço, fixada com abraçadeiras. Na parte inferior do protótipo, situa-se o sistema de alimentação, composto por um suporte para quatro queimadores atmosféricos dispostos horizontalmente em quadrante, de forma simétrica. Estes queimadores foram abastecidos conjuntamente por um cilindro de gás liquefeito de petróleo (GLP). Adicionalmente, um quinto queimador atmosférico, instalado verticalmente, também foi alimentado por um cilindro de GLP (VIETTA FILHO, 2025).

Na extremidade oposta do equipamento, localizava-se a zona de coleta, onde foi posicionada uma forma de alumínio destinada ao recolhimento das partículas que atingiam esta área. As pressões dos gases foram controladas por meio de manômetros instalados nos respectivos cilindros. Na Figura 8, pode-se visualizar o protótipo utilizado para esferoidizar as partículas.

Figura 8 - a) Protótipo baseado no método de pulverização por chama; b) Detalhes da zona de alimentação e coleta.



Fonte: Elaboração Própria.

Para a realização do processo de esferoidização, primeiramente foram separados 20 g de fragmentos de vidro, medidos em balança analítica. Após acender os queimadores do protótipo, alimentados por 0,5 kgf/cm² de GLP, a massa de vidro foi transferida para o interior de uma pipeta graduada com o auxílio de um funil. A pipeta contendo o material foi posicionada horizontalmente, próxima ao orifício de

alimentação do protótipo. Por fim, o vidro na pipeta foi introduzido no equipamento, em direção à zona de chama, utilizando um soprador de ar para garantir um fluxo controlado. Ao término do procedimento, os manômetros foram fechados e as partículas geradas foram coletadas no recipiente de coleta.

3.3 Análises das amostras de vidro

Neste tópico serão descritas as análises que foram realizadas para caracterização dos vidros refundidos fabricados neste trabalho.

3.3.1 Natureza do vidro, teor de sílica e presença de elementos tóxicos por fluorescência de raios X

As determinações da natureza do vidro, do teor de sílica e a verificação da presença de elementos tóxicos foram realizadas, alternativamente, pela técnica de Fluorescência de Raios X (FRX) (Panalytical®, Epsilon 1). Embora a NBR 16184:2021 estabeleça ensaios e procedimentos químicos específicos para essas finalidades, optou-se por este método devido à sua capacidade de caracterização rápida e não destrutiva.

O espectrômetro de fluorescência de raios X permite determinar a composição química do vidro, possibilitando a quantificação do teor de sílica e a detecção de elementos tóxicos, como arsênio (As), antimônio (Sb) e chumbo (Pb), de forma semiquantitativa. É apresentado na Figura 9 o equipamento utilizado para análise de fluorescência de raios x.

Figura 9 - Espectômetro de fluorescência de Raios-X utilizado neste trabalho.

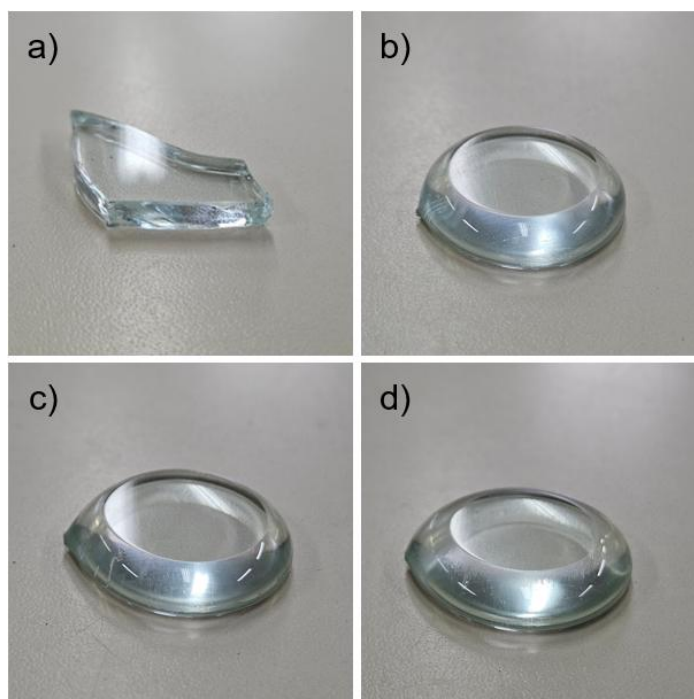


Fonte: Elaboração Própria.

3.3.2 Espectrofotometria UV-Vis

A análise espectroscópica na região do visível foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 14910:2002. As amostras de vidro que foram refundidas passaram pelo processo de tratamento superficial, através do lixamento sucessivo em lixas com granulometrias de 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1200 e 2000. Posteriormente, realizou-se o polimento nas duas superfícies para obter amostras planas e paralelas, visando minimizar o espalhamento de luz. Na amostra do vidro comercial, como já possuía superfícies planas e paralelas, não se realizou a etapa de lixamento. Na Figura 10 são visualizadas as amostras de vidro após lixamento e polimento, utilizadas para realizar as análises.

Figura 10 - a) Vidro plano comercial; b) Vidro refundido 1 vez; c) Vidro refundido 2 vezes; d) Vidro refundido 3 vezes.



Fonte: Elaboração Própria.

Após o tratamento superficial das amostras, utilizou-se um espectrofotômetro UV-Vis (BELPhotonics®, V-M5), operando na faixa de comprimento de onda de 400 a 700 nm, com intervalo de varredura de 2 nm, para a aquisição dos dados de transmitância das amostras de vidro. Por fim, os espectros de transmitância foram normalizados para uma espessura padrão de 3 mm, permitindo a comparação direta entre as amostras. A Figura 11 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 11 - Espectômetro de fluorescência de Raios-X utilizado neste trabalho.



Fonte: Elaboração Própria.

3.3.3 Índice de refração

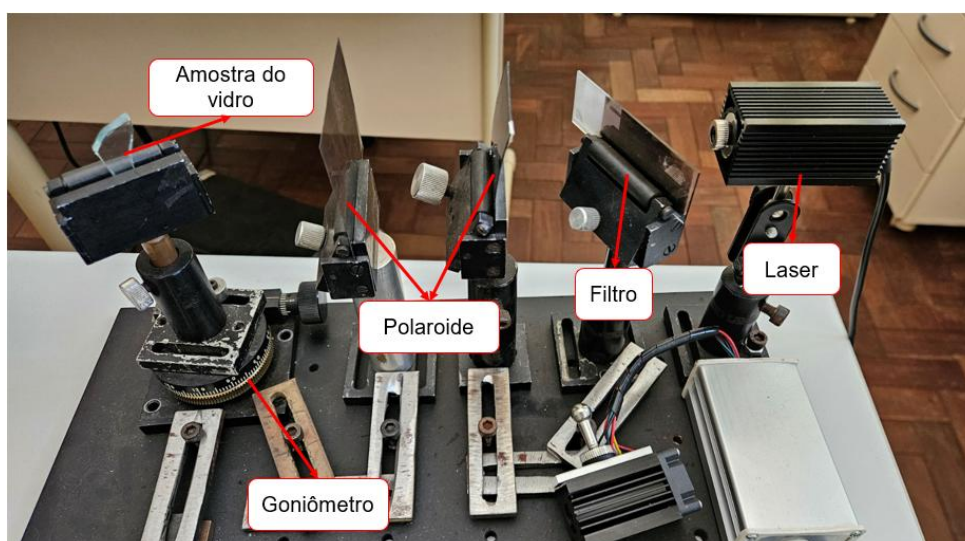
A norma NBR 16184:2021 especifica que o índice de refração das microesferas do tipo IB produzidas deve ser superior a 1,50. Para a verificação desse parâmetro, ensaio realizado de forma alternativa, foi construído um dispositivo baseado no método do ângulo de Brewster (HECHT, 2002), permitindo avaliar o índice de refração para um comprimento de onda específico.

O aparato consiste em uma fonte de luz laser (650 nm), um filtro para controlar a potência do laser e dois filtros polarizadores, ajustados para bloquear a polarização TE (campo elétrico perpendicular ao plano de incidência) e transmitir apenas a luz com polarização TM (campo elétrico paralelo ao plano de incidência). O feixe polarizado TM incide sobre a amostra de vidro e, quando este se encontra no ângulo de Brewster (θ_B), o qual pode ser encontrado utilizando um goniômetro, a intensidade da luz refletida é minimizada, tendendo a zero. Conhecendo-se esse ângulo, o índice de refração (n) do material pode ser determinado pela Equação 1:

$$n = \operatorname{arctg} \theta_B \quad (1)$$

Para a realização da análise, foram utilizadas as amostras de vidro do ensaio de espectroscopia UV-Vis. Na Figura 12 é visualizado o aparato experimental utilizado para a determinação do índice de refração.

Figura 12 - Aparato utilizado para análise do índice de refração das amostras de vidro.



Fonte: Elaboração Própria.

3.4 Análise das amostras de microesferas de vidro do tipo IB

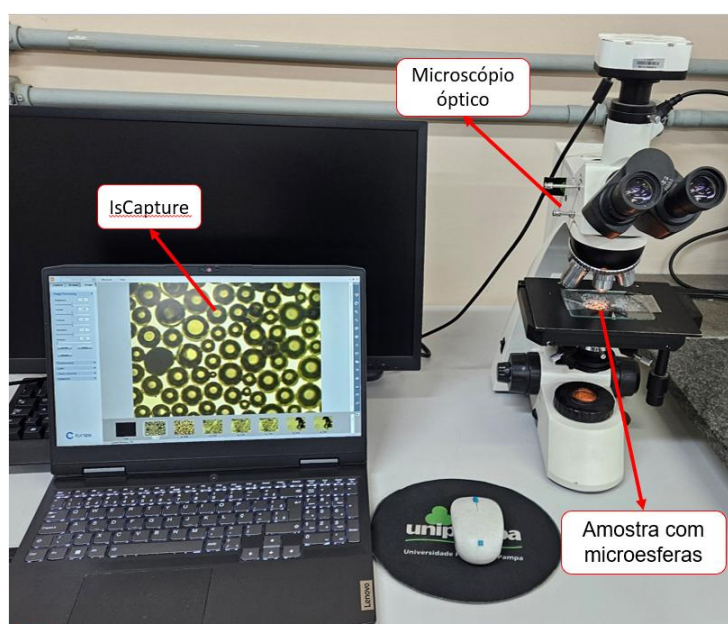
Após processo de esferoidização, realizou-se a caracterização das 4 diferentes amostras de microesferas e aferiu-se a retrorrefletividade de cada uma delas de duas maneiras: a primeira em uma superfície com fundo preto onde pode-se determinar a retrorrefletividade intrínseca das microesferas; a segunda em tinta de demarcação viária simulando a pintura de um pavimento.

3.4.1 Análise morfológica e granulométrica

A morfologia das microesferas geradas foi executada com o auxílio de um microscópio óptico (Laborana®, MTM-3030) e do software ISCapture, utilizado para contabilizar as partículas. Para cada amostra, utilizou-se 1 grama de microesferas, transferidas para uma fita adesiva com 10 cm de comprimento e 4,5 cm de largura, mantendo-as bem distribuídas e sem sobreposições por toda a área.

Com o auxílio do equipamento, contabilizaram-se 400 partículas para cada amostra, em triplicata, quantidade está determinada utilizando o conceito de tamanho de amostra, conforme adotado em trabalhos anteriores, como o de Tomás (2024) e Teixeira (2025). Na Figura 13, pode-se observar o processo de contagem das partículas presentes nas amostras.

Figura 13 - Processo de contagem de partículas realizados neste trabalho.



Fonte: Elaboração Própria.

Em cada uma das amostras, foram quantificadas as diferentes aparências e defeitos (partículas esféricas, ovoides, geminadas, bolhas gasosas e fragmentos irregulares), anotando-se os valores em uma planilha de Excel para determinar os percentuais de cada classe morfológica. Os percentuais obtidos foram comparados com os limites da NBR 16184:2021, com mínimo de 77% de esferas, máximo de 20% de partículas ovoides, geminadas ou bolhas gasosas e no máximo de 3% de fragmentos.

A análise granulométrica foi realizada conforme a NBR 16184:2021, utilizando um conjunto de peneiramento com malhas de 300 μm (Bronzinox[®]), 212 μm (Bertel[®]), 150 μm (Bronzinox[®]), 63 μm (Bertel[®]) e fundo. As amostras, considerando uma massa 30 g de microesferas, foram adicionadas à peneira de 300 μm , onde realizaram-se movimentos verticais e horizontais durante alguns minutos. Posteriormente, a massa retida em cada peneira foi aferida em balança analítica, procedendo-se ao cálculo do percentual passante via software Excel. Na Figura 14 é possível observar o conjunto de peneiramento utilizado.

Figura 14 - Conjunto de peneiramento composto por peneiras granulométricas com malhas de 300 μm , 212 μm , 150 μm , 63 μm e fundo utilizado para análise granulométrica.



Fonte: Elaboração Própria.

3.4.2 Densidade de massa

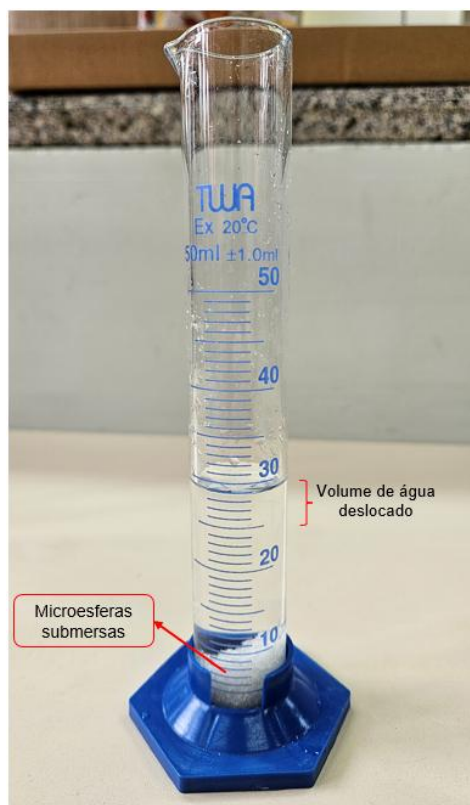
A densidade das microesferas foi determinada a partir do princípio de Arquimedes. Inicialmente, para os quatro tipos de microesferas produzidas, aferiu-se a massa de 27 g em balança analítica com o auxílio de um béquer. Em seguida, transferiram-se os béqueres para uma estufa programada a 110 °C por 2 horas, para remoção de umidade. Logo após, as microesferas foram retiradas e levadas para um dessecador, onde permaneceram por mais 2 horas.

Ao fim deste período, as 27 g de microesferas foram divididas em três amostras de 9 g, para realização da avaliação em triplicata. Este procedimento foi realizado para todas as microesferas produzidas. Posteriormente, mediram-se 25 ml de água destilada em uma proveta de 50 ml e, com auxílio de um funil, as amostras foram submersas no líquido. A fim de retirar bolhas de ar que poderiam estar contidas no material, agitou-se levemente a proveta. A determinação do volume das amostras se deu com a retirada do volume deslocado ao adicionar as microesferas na água. Neste processo, utilizou-se uma pipeta graduada de 1 ml e um pipetador, anotando-se ao final o volume retirado. Para calcular a densidade, utilizou-se a Equação 2:

$$d = \frac{m_{\text{microesferas}}}{v_{\text{água deslocada}}} \quad (2)$$

Na Figura 15 é demonstrado o procedimento de medição de volume deslocado para o cálculo da densidade das amostras.

Figura 15 - Proveta de vidro com 25 ml de água destilada e microesferas submersas



Fonte: Elaboração Própria.

3.4.3 Retrorrefletividade

Para a determinação da retrorrefletividade, utilizou-se o retrorrefletômetro EasyLux® Clássico Horizontal, apresentado na Figura 16, configurado para a geometria de 15 metros, conforme determinações do DNIT (2018). Foram utilizadas duas metodologias de medição: uma em fundo preto, para avaliar a capacidade intrínseca de retroreflexão, sem a ajuda da reflexão da tinta branca, e outra em amostras simulando a pintura horizontal das vias.

Figura 16 - Retrorrefletômetro.



Fonte: Elaboração Própria

Para a análise da retrorrefletividade no fundo preto, foi utilizada uma placa composta de fibras de média densidade (MDF) pintadas com tinta preta fosca. Na parte central, a placa possui uma abertura nas dimensões de 34 x 10 cm, que corresponde à área de medição do retrorrefletômetro. Nesta área, foi distribuída a quantidade de 1,7 g de microesferas, correspondendo a uma densidade superficial de microesferas de 50 g/m².

Logo após, o retrorrefletômetro foi posicionado sobre a placa e realizou-se as medidas. Para cada um dos 4 diferentes tipos de microesferas, foram tomadas 10 leituras. Na Figura 17, é observada a placa onde foi realizada a análise da retrorrefletividade no fundo preto.

Figura 17 - Placa de MDF utilizada para análises de retrorrefletividade.



Fonte: Elaboração Própria

Para as medidas em amostras que simulam o pavimento, foram utilizadas superfícies de MDF nas dimensões de 34 x 10 cm. Nesta superfície, realizou-se a pintura de aproximadamente 0,6 mm de espessura, em conformidade com a norma NBR 14723:2020, com tinta branca à base de água para demarcação viária (ICD VIAS®, Aquaflex), com o auxílio de um rolo de 9 cm.

Imediatamente após a pintura, as placas foram levadas para um recipiente plástico, onde os 1,7 g de microesferas foram depositados de forma bem distribuída sobre a tinta. Em seguida, as microesferas que caíram fora da área pintada foram recolhidas e lançadas novamente sobre a superfície. Na Figura 18, pode-se observar a placa de MDF pintada e a placa com a pintura e as microesferas aderidas a tinta.

Figura 18 - Placa de MDF e amostras que simulam o pavimento com adição de microesferas.



Fonte: Elaboração Própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa, organizados em duas seções. A primeira dedica-se à caracterização das amostras de vidro, enquanto a segunda foca na análise das microesferas de vidro produzidas a partir desse material.

4.1 Caracterização dos vidros

Nesta seção, expõem-se os resultados da caracterização das amostras de vidro, obtidos por meio das técnicas de índice de refração, espectroscopia UV-Vis e FRX. Na Tabela 3, é possível visualizar a nomenclatura de cada amostra estudada.

Tabela 3 - Lista de siglas utilizadas para as diferentes amostras de vidro.

Sigla	Significado
VP	Vidro plano comercial
V1R	Vidro uma vez refundido
V2R	Vidro duas vezes refundido
V3R	Vidro três vezes refundido

Fonte: Elaboração Própria.

4.1.1 Fluorescência de Raios X

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para os óxidos de silício (SiO_2), sódio (Na_2O) e cálcio (CaO), constituintes majoritários dos vidros analisados. Também são indicados os teores de elementos tóxicos, como óxidos de arsênio (As_2O_3), antimônio (Sb_2O_3) e chumbo (PbO).

Tabela 4 - Composição química de cada tipo de vidro.

Óxidos	VP	V1R	V2R	V3R
SiO₂	76,4 ± 0,8	76,6 ± 0,9	76,7 ± 0,8	76,6 ± 0,8
Na₂O	13,2 ± 0,5	13,3 ± 0,4	13,6 ± 0,5	13,7 ± 0,5
CaO	8,6 ± 0,3	8,4 ± 0,2	8,3 ± 0,4	8,5 ± 0,2
As₂O₃, PbO, Sb₂O₃	Elementos não detectados			
Outros (<1,5)	2,3 ± 0,2	2,3 ± 0,3	2,4 ± 0,2	2,3 ± 0,2

Fonte: Elaboração Própria.

Segundo a NBR 16184:2021, o vidro utilizado em microesferas deve ser do tipo sódico-cálcico. A presença de óxidos de sódio (Na₂O) e cálcio (CaO), além da presença de óxido de silício, observada na Tabela 7 confirma essa classificação para todas as amostras (BRISTOGIANNI; OIKONOMOPOULOU, 2022; BAEK; KIM; JANG, 2024; MUSGRAVES; HU; CALVEZ, 2019).

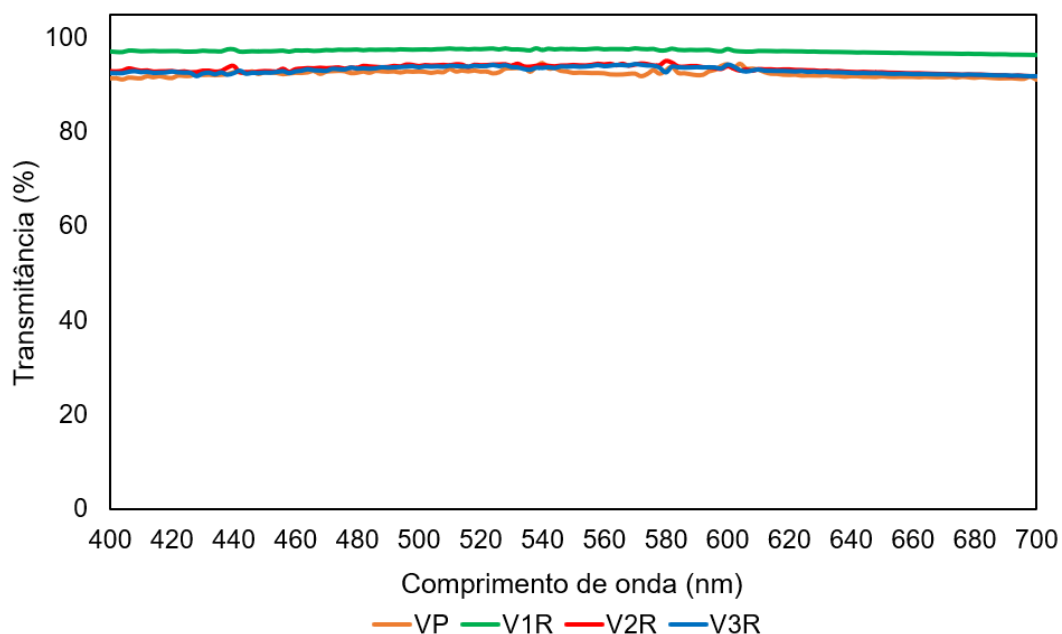
Quanto à composição química, a norma em questão exige um teor mínimo de 65% em massa de sílica (SiO₂) para a comercialização do produto. Os resultados indicam que as quatro amostras analisadas atendem a este requisito, apresentando teores superiores a 76%, estando em conformidade com a norma. Nota-se também que não há diferença estatística significativa entre a amostra VP e as demais (V1R, V2R, V3R), considerando os desvios-padrão apresentados. Isso sugere que o processo de refundição não alterou a matriz vítrea, mantendo a composição química.

No que tange aos contaminantes tóxicos, a NBR 16184:2021 estabelece um limite máximo de 200 mg/kg (0,02% em massa). Neste aspecto, as microesferas também estão em conformidade, uma vez que tais elementos não foram detectados.

4.1.2 Espectrometria UV-Vis

A Figura 19 apresenta os espectros de transmitância na região do visível (400 a 700 nm) para as diferentes amostras de vidro. Os dados mostram os espectros normalizados para uma espessura padrão de 3 mm.

Figura 19 - Espectros de transmitância para as diferentes amostras de vidro estudadas.



Fonte: Elaboração própria.

A análise dos espectros de transmitância evidencia a elevada transparência das amostras de vidro, visto que todas apresentaram transmitância superior a 90% na região visível. Este resultado confirma a adequação do material para a produção de microesferas de boa retrorefletividade, uma vez que as amostras são praticamente transparentes (incolors) no espectro visível. Nota-se que a amostra V1R obteve transmitância superior (~98%), desempenho que pode ser atribuído a um melhor acabamento superficial obtido nas etapas de lixamento e polimento, reduzindo as perdas por espalhamento de luz. Já as amostras VP, V2R e V3R mostraram comportamento semelhante entre si (~93%). Estes resultados sugerem que os processos de refundição não alteraram a coloração dos vidros, mantendo-os incolor, e, portanto, estando de acordo com a norma.

4.1.3 Índice de refração

Para a aferição do índice de refração, aplicou-se a técnica do ângulo de Brewster, baseada na incidência de luz polarizada TM. As medidas foram tomadas sob comprimento de onda de 650 nm, com auxílio de um goniômetro de resolução 0,1°. Os valores encontrados para as amostras de vidro constam na Tabela 5.

Tabela 5 - Índice de refração obtida dos tipos de vidros pesquisados.

Vidros	Índice de refração (n)
VP	1,53 ± 0,02
V1R	1,52 ± 0,02
V2R	1,53 ± 0,02
V3R	1,52 ± 0,02

Fonte: Elaboração própria.

Os índices de refração das amostras de vidro foram determinados por meio da Equação 1, descrita no capítulo anterior. Estes resultados são típicos para microesferas produzidas com vidro do tipo soda-cal (virgem ou reciclado), estando em conformidade com a literatura (BURGHARDT; PASHEVICH; WENZEL, 2021; CARLSON; PIKE; MILES, 2015). Embora a medição tenha sido pontual, modelos teóricos indicam que, para materiais dielétricos homogêneos, o índice de refração tende a aumentar com a diminuição do comprimento de onda (SYNOWICKI; JOHS; MARTIN, 2011; SMITH; SHILES; INOKUTI, 2004). Portanto, visto que o valor obtido para a região do vermelho (650 nm) já supera o limite de 1,50, infere-se que o índice será ligeiramente superior para o restante do espectro visível. Dessa forma, todas as amostras de vidro estudadas atendem aos requisitos da norma NBR 16184:2021 para microesferas do Tipo IB.

4.2 Caracterização das microesferas

Nesta seção, são expostos resultados da caracterização das amostras de microesferas de vidro. Na Tabela 6, é possível visualizar a nomenclatura de cada amostra estudada.

Tabela 6 - Lista de siglas utilizadas para as diferentes amostras de microesferas de vidro.

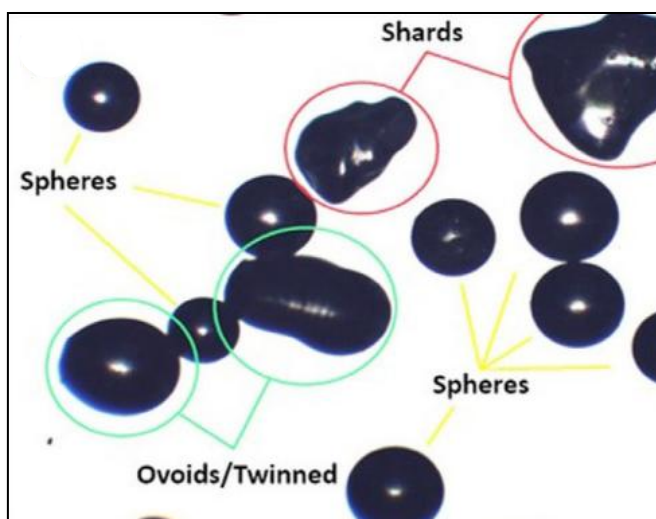
Sigla	Significado
MEVP	Microesferas do vidro plano comercial
ME1R	Microesferas do vidro uma vez refundido
ME2R	Microesferas do vidro duas vezes refundido
ME3R	Microesferas do vidro três vezes refundido

Fonte: Elaboração Própria.

4.2.1 Caracterização granulométrica e morfológica

Para que a sinalização horizontal viária apresente eficiência na visibilidade noturna, a morfologia e a granulometria das microesferas de vidro devem atender aos parâmetros normativos. A esfericidade é o fator determinante na análise morfológica, uma vez que eventuais irregularidades nas partículas interferem nos ângulos de refração e nos padrões de reflexão luminosa. Tais desvios resultam na perda da capacidade de retrorreflexão, reduzindo o fluxo luminoso direcionado ao condutor e comprometendo a segurança da via (SMADI *et al.*, 2014, MAZZONI *et al.* 2024). Adicionalmente a distribuição granulométrica define as classes das microesferas de vidro. Segundo a ABNT (2021), essa delimitação de faixas granulométricas é o que influencia a adequação do material aos diversos métodos de aplicação na sinalização horizontal. Na Figura 20, observa-se as diferentes partículas que podem ser encontradas ao realizar a análise morfológica.

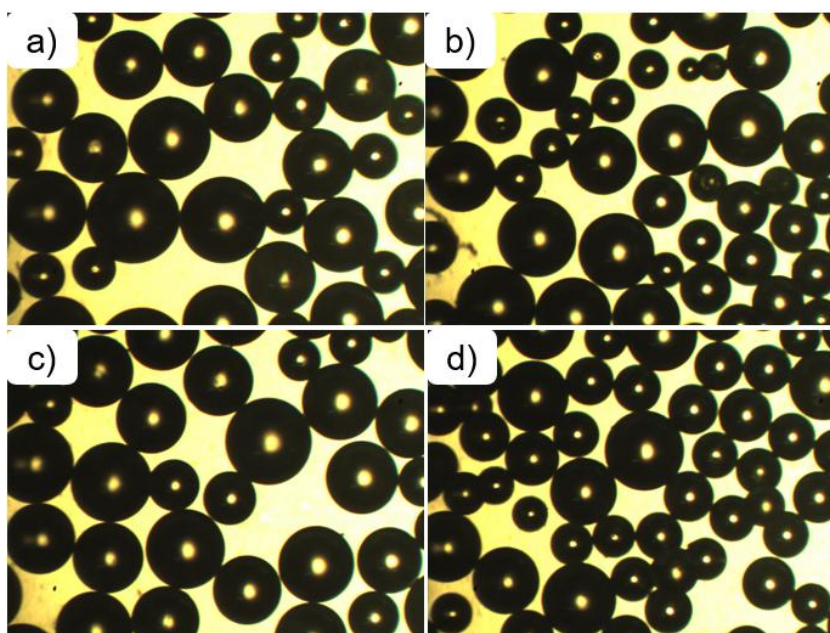
Figura 20 - Micrografia óptica de diferentes formas morfológicas presentes nas amostras de microesferas de vidro.



Fonte: Pase Neto, 2023.

A Figura 21 apresenta as micrografias ópticas das microesferas de vidro produzidas, com aumento de 50x. As imagens (a), (b), (c) e (d) correspondem, respectivamente, às amostras MEVP, ME1R, ME2R e ME3R. A partir da análise visual, observa-se a predominância de partículas com elevada esfericidade em todas as amostras, característica essencial para uma boa eficiência da retrorreflexão.

Figura 21 - Microscopia óptica das amostras: a) MEVP; b) ME1R; c) ME2R; d) ME3R.



Fonte: Elaboração Própria.

As avaliações morfológicas foram realizadas em triplicata, totalizando a análise de 1.200 partículas por amostra. A Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização morfológica obtidos para os quatro tipos de microesferas produzidas, acompanhados de seus respectivos desvios padrão.

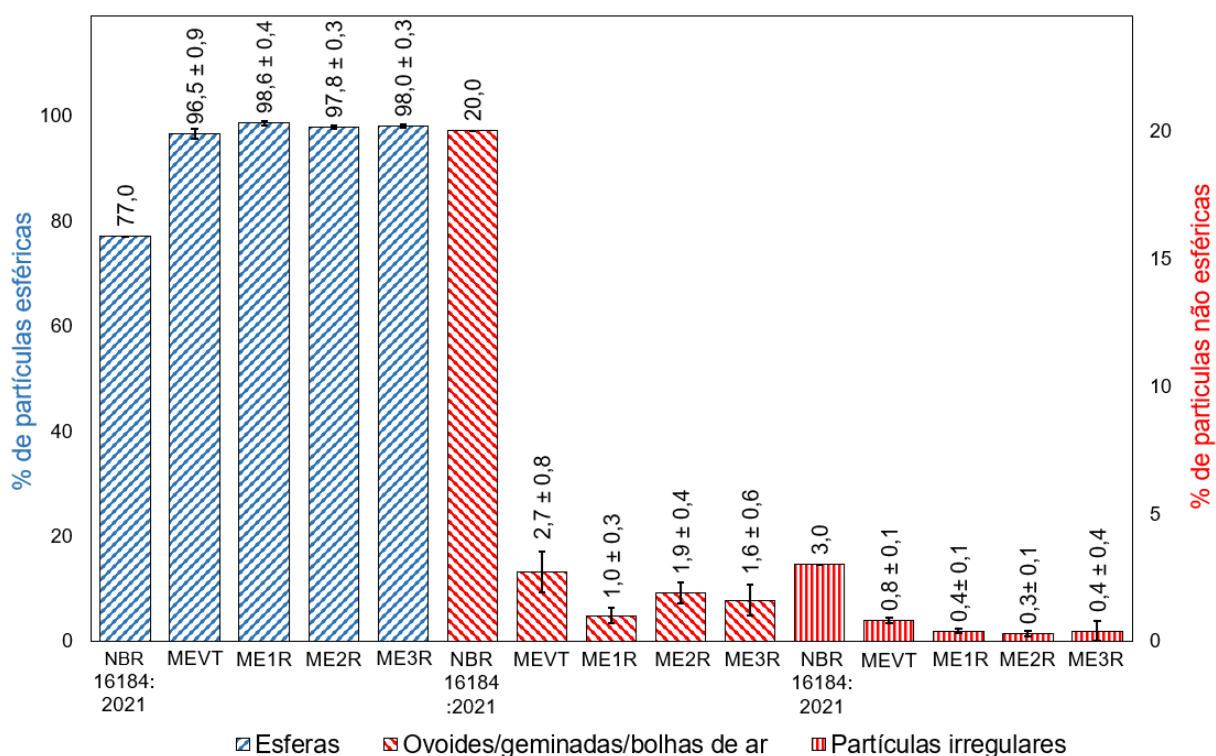
Tabela 7 - Morfologia das microesferas de vidro produzidas.

Amostras	Contagem de partículas	Partículas esféricas	Partículas ovoides/ geminadas/bolhas de ar	Fragmentos irregulares
MEVP	3 X 400	96,5 ± 0,9	2,7 ± 0,8	0,8 ± 0,1
ME1R	3 X 400	98,6 ± 0,4	1,0 ± 0,3	0,4 ± 0,1
ME2R	3 X 400	97,8 ± 0,3	1,9 ± 0,4	0,3 ± 0,1
ME3R	3 X 400	98,0 ± 0,3	1,6 ± 0,6	0,4 ± 0,4

Fonte: Elaboração Própria.

De acordo com os requisitos da NBR 16184:2021 para microesferas do Tipo IB, o material pode apresentar até 3% de partículas de vidro não fundido (fragmentos irregulares) e um limite máximo de 20% de defeitos como fragmentos ovoides, geminados ou com presença de bolhas gasosas. A análise dos dados obtidos revela que todas as amostras estudadas apresentam a predominância de partículas esféricas. A Figura 22 apresenta o comparativo da composição morfológica de cada amostra.

Figura 22 - Comparativo entre os requisitos morfológicos da norma com os obtidos das amostras de microesferas produzidas.



Fonte: Elaboração Própria.

Como pode ser observado, a distribuição morfológica das microesferas está de acordo com a norma, evidenciando que todas as amostras analisadas superaram o índice mínimo de 77% de esfericidade exigido pela NBR 16184:2021, apresentando esfericidade acima de 95%. Observa-se uma uniformidade entre as microesferas produzidas após as refundições, o que atesta a repetibilidade e a estabilidade do processo produtivo. Adicionalmente, nota-se que as microesferas de vidro refundido apresentaram uma esfericidade ligeiramente superior à da amostra de vidro original, a análise de variância (ANOVA) confirmou que essa diferença é estatisticamente significativa no intervalo de confiança de 95%, indicando que o reprocessamento do material não comprometeu as morfologias das partículas.

Complementarmente, realizou-se a análise morfológica de microesferas na faixa granulométrica de 180 a 150 µm. Realizou-se a análise granulométrica nesta faixa devido sua utilização nos ensaios de retrorefletividade. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição granulométrica das microesferas da faixa granulométrica de 180 -150 μm .

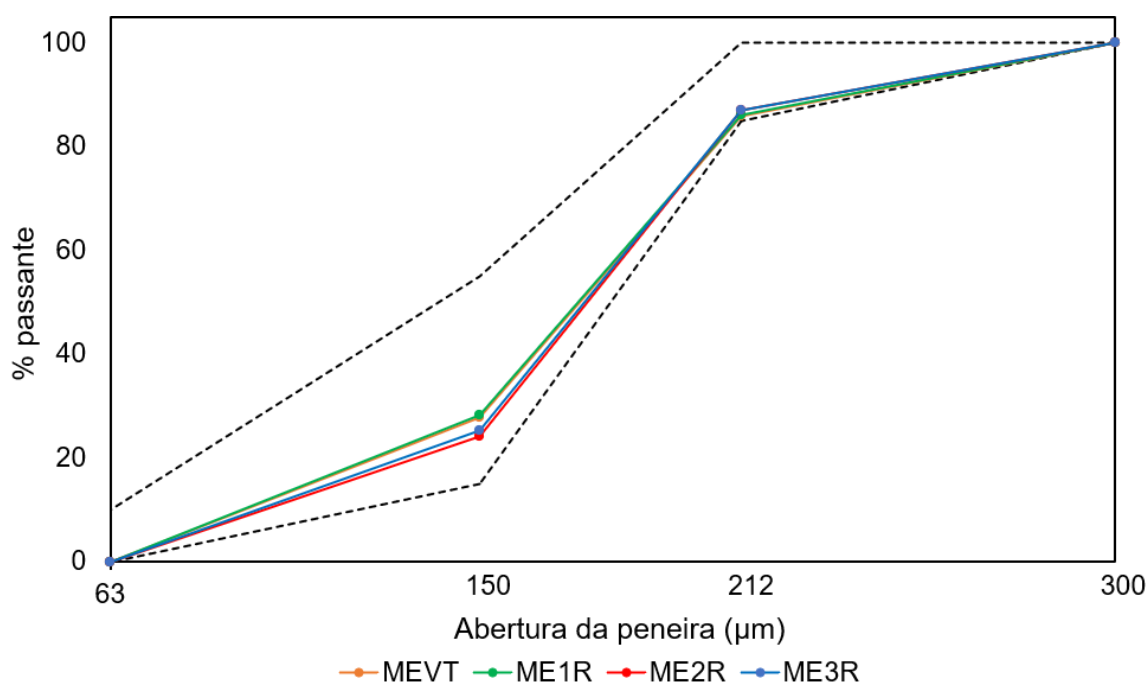
Amostras	Contagem de partículas	Partículas esféricas	Partículas ovoides/ geminadas/bolhas de ar	Fragmentos irregulares
MEVP	3 X 400	98,0 \pm 0,2	1,8 \pm 0,3	0,2 \pm 0,1
ME1R	3 X 400	98,3 \pm 0,6	1,6 \pm 0,6	0,1 \pm 0,1
ME2R	3 X 400	99,0 \pm 0,9	0,8 \pm 0,8	0,2 \pm 0,1
ME3R	3 X 400	99,1 \pm 0,3	0,8 \pm 0,3	0,2 \pm 0,1

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados apresentados na Tabela 8 revelam que todas as amostras atingiram percentual de partículas esféricas acima de 98%, e o percentual de fragmentos não esféricos e irregulares permaneceu significativamente baixo, estando em conformidade com a NBR 16184:2021.

Na Figura 23 é possível observar a distribuição granulométrica das microesferas produzidas. Os dados representam a fração de massa passante em cada peneira utilizada, calculada em relação à massa total das amostras.

Figura 23 - Distribuição granulométricas das microesferas produzidas.



Fonte: Elaboração Própria.

Conforme ilustrado na Figura 23, as curvas granulométricas de todas as amostras situam-se dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 16184:2021 (delimitados pelas linhas tracejadas), o que permite classificar todas as amostras de microesferas como Tipo IB. Além disso, visualiza-se que as curvas granulométricas estão próximas e se sobrepõe, evidenciando a repetibilidade do processo produtivo, bem como, demonstrando que a utilização de diferentes tipos de vidro não gera variações significativas na distribuição granulométrica das microesferas.

4.2.2 Densidade de massa

De acordo com a NBR 16184:2021, microesferas do Tipo IB devem apresentar densidade de massa situada no intervalo entre 2,4 g/cm³ e 2,6 g/cm³. Os valores obtidos para cada amostra deste estudo estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Densidade de massa das microesferas produzidas.

Amostras	Densidade (g/cm³)
MEVT	2,56 ± 0,09
ME1R	2,58 ± 0,03
ME2R	2,55 ± 0,03
ME3R	2,56 ± 0,04

Fonte: Elaboração Própria.

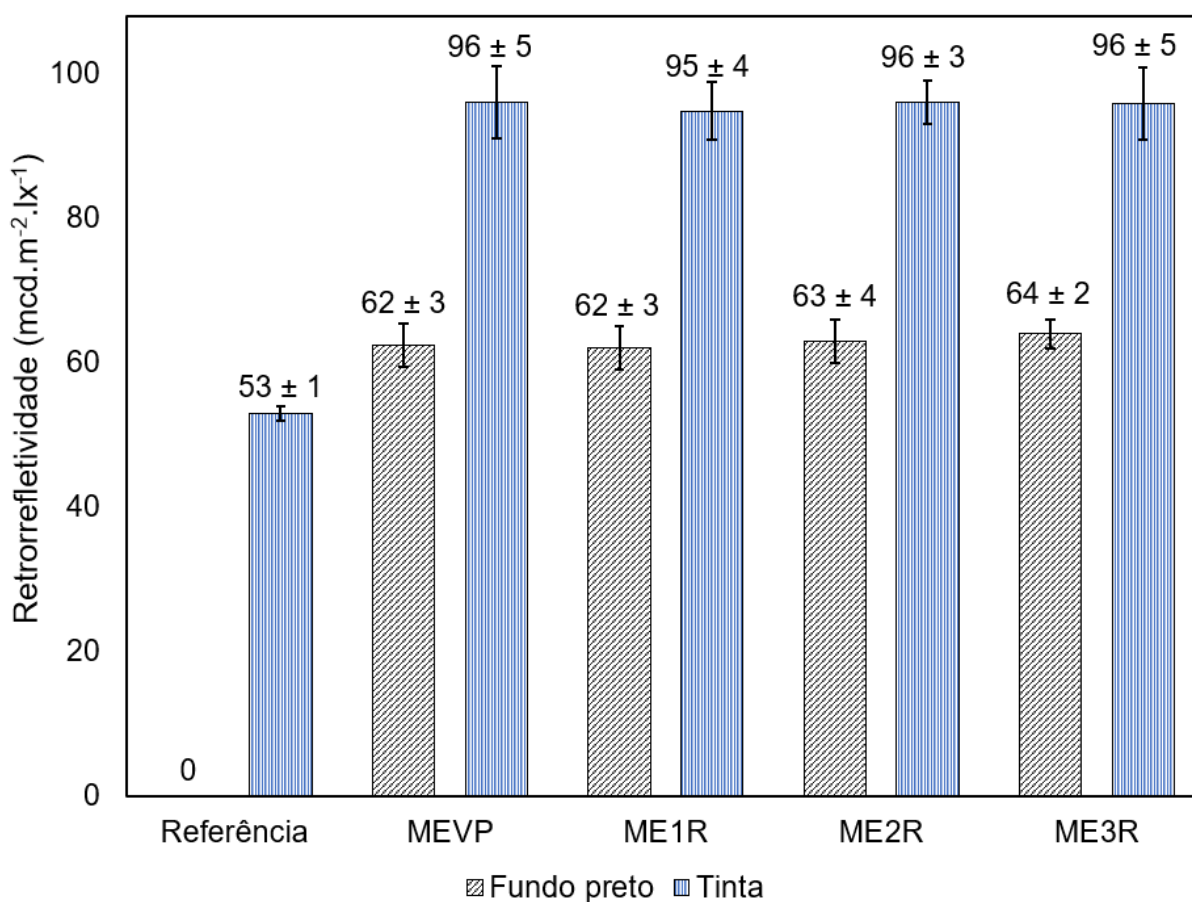
A análise das densidades revela que todas as microesferas avaliadas apresentam valores semelhantes, dentro da margem de erro, e também estão dentro das especificações da NBR 16184:2021.

4.2.3 Retrorrefletividade

Após a caracterização física das microesferas produzidas, procedeu-se à avaliação da retrorrefletividade. Primeiramente realizou-se a medição da amostra de referência (sem microesferas) para o fundo preto e da tinta branca. Em seguida, para assegurar a comparabilidade entre os resultados, utilizou-se uma faixa granulométrica estreita (150 – 180 µm) para avaliação da retrorrefletividade. Ressalta-se que o objetivo central das medições não foi a obtenção do valor máximo de

retrorefletividade, mas sim o estabelecimento de um comparativo de desempenho entre as diferentes amostras de mesma dimensão. As medições seguiram a geometria de 15 metros, configuração adotada por órgãos de infraestrutura viária brasileiros, como o DAER e o DNIT. A Figura 24 apresenta os resultados de retrorefletividade obtidos para as diferentes amostras.

Figura 24 - Retrorefletividade das amostras na geometria de 15 metros.



Fonte: Elaboração própria.

Ao analisar os resultados de retrorefletividade sobre o fundo preto, observa-se que todas as amostras produzidas apresentaram um desempenho similar, com valores situados na faixa de 62 a 64 mcd.m⁻².lx⁻¹, enquanto a amostra de referência teve retrorefletividade zero. Em relação aos resultados obtidos sobre as amostras com tinta, observa-se um salto significativo na retrorefletividade para todas as amostras em comparação à referência. Enquanto a amostra de Referência apresenta um valor de aproximadamente 53 mcd.m⁻².lx⁻¹, as amostras MEVP, ME1R, ME2R e ME3R atingiram valores entre 95 a 97 mcd.m⁻².lx⁻¹, aumento este que ocorre devido

ao efeito combinado da retrorreflexão da microesfera com a tinta na sua superfície, o que propicia uma reflexão maior comparado com o caso intrínseco.

Estes resultados evidenciam que as sucessivas refundições dos resíduos de vidro original não comprometem o desempenho retrorreflexivo das microesferas. Ao considerar os desvios padrão, observa-se que os resultados não apresentam variações significativas no desempenho de retrorrefletividade entre as microesferas de vidro original (MEVP) e as produzidas a partir de vidros refundidos (ME1R, ME2R e ME3R).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, microesferas do tipo IB foram produzidas a partir de vidro plano comercial e de seus resíduos, após processos de refundição sucessivos. As propriedades ópticas, físicas e químicas das amostras de vidro e das microesferas resultantes foram comparadas entre si e comparadas com os requisitos da norma NBR 16184:2021. Os resultados indicaram que:

- Todas as amostras de vidro apresentaram teor de sílica superior a 65%, atendendo ao requisito mínimo da NBR 16184:2021. Adicionalmente, não foram detectados elementos tóxicos como arsênio (As), antimônio (Sb) e chumbo (Pb). Observou-se que o processo de refundição sucessiva não alterou significativamente a composição química, mantendo teores de sílica equivalentes aos do vidro original;

- Os vidros mantiveram a característica de vidro incolor, confirmada pelo espectro UV-Vis, com curvas de transmitância semelhantes entre as amostras, o que satisfaz os critérios da NBR 16184:2021;

- Todas as amostras de vidro apresentaram valores de índice de refração superiores ao mínimo de 1,50 estabelecido pela NBR 16184:2021;

- Referente à morfologia das amostras, todas as microesferas produzidas, atendem aos percentuais mínimos de partículas esféricas e aos percentuais máximos de ovoides, geminadas e bolhas gasosas e fragmentos irregulares, estabelecidos pela NBR 16184:2021, o que demonstra que o processo de fabricação utilizado é adequado para esta aplicação;

- Referente a análise granulométrica, todas as microesferas produzidas atenderam aos limites superiores e inferiores estabelecidos pela norma NBR 16184:2021, apresentando granulometria compreendida entre 63 e 300 μm , sendo classificadas como tipo IB;

- As densidades das amostras situaram-se dentro dos limites normativos estipulados pela NBR 16184:2021;

- A análise comparativa da retrorefletividade demonstrou que as amostras mantiveram valores similares em ambos os cenários testados, tanto na avaliação sobre fundo preto quanto na presença da tinta. Esses resultados indicam que os sucessivos processos de refundição não comprometem a capacidade de retroreflexão das microesferas.

Os resultados desta pesquisa confirmam a viabilidade técnica da conversão de resíduos de vidro em microesferas do Tipo IB para sinalização horizontal viária. Por meio de análises ópticas, físicas, químicas, constatou-se que os materiais produzidos atendem aos requisitos da norma NBR 16184:2021. A refundição de resíduos de vidro e posterior transformação em microesferas para sinalização viária reforça os princípios da economia circular e da valorização de resíduos sólidos urbanos e industriais. Esta abordagem contribui diretamente para a redução do descarte deste resíduo, minimiza a extração de matérias-primas virgens e reduz poluição atmosférica. Também oferece à indústria de materiais viários uma fonte de matéria-prima abundante e de baixo impacto ambiental, alinhada às demandas globais por sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABRAVIDRO. **Meta de reciclagem de vidro em 2024 é alcançada no Brasil.** Abravidro, 25 fev. 2025. Disponível em: <https://abravidro.org.br/punoticias/meta-de-reciclagem-de-vidro-em-2024-e-alcancada-no-brasil>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Logística e valor são principais desafios para reciclagem de vidro decolar no Brasil.** 2024. Disponível em: <https://abividro.org.br/2024/09/27/logistica-e-valor-sao-principais-desafios-para-reciclagem-de-vidro-decolar-no-brasil/>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Reciclagem de vidro no Brasil.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://abividro.org.br/reciclagem/>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14723:** Sinalização horizontal rodoviária – Microesferas de vidro – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 38 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14910:** Embalagens de vidro para produtos alimentícios - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2002. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16184:** sinalização horizontal viária: esferas e microesferas de vidro: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

BABIĆ, Dario; FIOLIĆ, Mario; BABIĆ, Darko; GATES, Timothy. Road markings and their impact on driver behaviour and road safety: a systematic review of current findings. **Journal of Advanced Transportation**, [S. l.], v. 2020, p. 1-19, 2020. Article ID 7843743. DOI: [10.1155/2020/7843743](https://doi.org/10.1155/2020/7843743).

BABIĆ, Dario; ŠČUKANEC, Anđelko; BABIĆ, Darko. Determining the correlation between daytime and night-time road markings visibility. **The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering**, Vilnius, v. 11, n. 4, p. 283-290, 2016. DOI: 10.3846/bjrbe.2016.33.

BAEK, Choong Real; KIM, Hwidong D.; JANG, Yong-Chul. Exploring glass recycling: Trends, technologies, and future trajectories. **Environmental Engineering Research**, v. 30, n. 3, art. 240241, 2025. DOI: 10.4491/eer.2024.241. Disponível em: <https://doi.org/10.4491/eer.2024.241>.

BIERMEIER, Stefan; KEMPER, Dirk; GARCÍA-HERNANDEZ, Alvaro. Road marking visibility for automated vehicles: Machine detectability and maintenance standards. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 22, e04430, jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04430>

BLENGINI, G. A.; BUSTO, M.; FANTONI, M.; FINO, D. Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. **Waste Management**, v. 32, p. 1000-1008, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.10.018.

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume IV – Sinalização Horizontal**. Brasília: CONTRAN, 2022.

BRASIL. Decreto nº 11.300, de 21 de dezembro de 2022. Institui a Estratégia Nacional para Neutralidade Climática (ENNC) e o Plano Nacional para Descarbonização. Diário Oficial da União, Brasília, 2022.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de sinalização rodoviária**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2010. 412 p. (IPR. Publ. 743).

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 409/2017-PRO**: Sinalização horizontal – Execução de demarcação com tinta acrílica – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2017. 16 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 100/2018-ES**: Sinalização horizontal – Tintas – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR/DNIT, 2018. 15 p.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 22 dez. 2025.

BRISTOGIANNI, Telesilla; OIKONOMOPOULOU, Faidra. Glass up-casting: a review on the current challenges in glass recycling and a novel approach for recycling “as-is” glass waste into volumetric glass components. **Glass Structures & Engineering**, v. 8, p. 255-302, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00206-9>

BURGHARDT, Tomasz E.; ETTINGER, Karl; KÖCK, Birgit; HAUZENBERGER, Christoph. Glass beads for road markings and other industrial usage: Crystallinity and hazardous elements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, e01213, 2022. DOI: [10.1016/j.cscm.2022.e01213](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01213).

BURGHARDT, Tomasz E.; MOSBÖCK, Harald; PASHKEVICH, Anton; FIOLIĆ, Mario. Horizontal road markings for human and machine vision. **Transportation Research Procedia**, [s. l.], v. 48, p. 3622-3633, 2020. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.089.

BURGHARDT, Tomasz E.; PASHKEVICH, Anton; WENZEL, Kevin M. A study of premium glass beads for road marking materials. **Roads and Bridges - Drogi i Mosty**, [s. l.], v. 20, p. 125-138, 2021. DOI: 10.7409/rabd.021.008

BURNS, David M.; HEDBLUM, Thomas P.; MILLER, Terry W. Modern Pavement Marking Systems: Relationship Between Optics and Nighttime Visibility.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., n. 2056, p. 43-51, 2008. DOI: 10.3141/2056-06.

CARLSON, P.; PIKE, A.; MILES, J. Evaluation of glass bead refractive index and retroreflectivity for runway applications. Report of the **Texas A&M Transportation Institute (TTI)** prepared for Potters Industries Inc, 2015.

CHOU, Chia-Pei; LEONG, Kin-Wai; CHEN, Ai-Chin; LEE, Yao-Xuan. Road marking retroreflectivity study via a visual algorithm. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 13, p. 614–620, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42947-020-6001-x>.

CIRCULA VIDRO. **Manual Operacional Básico**. São Paulo: Circula Vidro, 2024. Disponível em: https://circulavidro.org/wp-content/uploads/2024/05/Manual-Operacional-Basico_vf.pdf. Acesso em: 22 dez. 2025.

COALIZÃO EMBALAGENS. **Relatório Anual Nacional 2021: juntos pela logística reversa**. São Paulo: Coalizão Embalagens, 2022. Disponível em: <https://www.coalizacaoembalagens.com.br>. Acesso em: 9 fev. 2026.

COLANGELO, Scott. Reducing the environmental footprint of glass manufacturing. **International Journal of Applied Glass Science**, v. 15, p. 350–366, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijag.16674>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Sinalização ruim agrava acidentes mesmo com pavimento em boas condições. Brasília: Agência CNT, 5 jun. 2018. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/acidentes-aumentam-com-pavimento-bom-sinalizacao-ruim>. Acesso em: 10 jan. 2026.

CONFERÊNCIA DAS PARTES DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (COP30). Roteiro Temático Preliminar para a Indústria. Belém, 2024. Disponível em: <https://cop30.gov.br>. Acesso em: 05 nov. 2025

COVES-CAMPOS, Andrés; BAÑÓN, Luis; COVES-GARCÍA, José Andrés; IVORRA, Salvador. In Situ Study of Road Marking Durability Using Glass Microbeads and Antiskid Aggregates as Drop-On Materials. **Coatings**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 371, out. 2018. DOI: 10.3390/coatings8100371

DELBARI, Seyed Ali; HOF, Lucas A. Glass waste circular economy - Advancing to high-value glass sheets recovery using industry 4.0 and 5.0 technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 462, art. 142629, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142629>.

EASYLUX. **Retrorefletômetros**. Santo André: Easylux, 2015. 43 p. Disponível em: https://www.easylux.com.br/download/folders/Easylux_Catalog_ptx.pdf Acesso em: 02 jan. 2026.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1436**: Road marking materials - Road marking performance for road users and others. Brussels: CEN, 2018

FERKO, Marija; STAŽNIK, Ana; MODRIĆ, Maja; DIJANIĆ, Helena. The Impact of Traffic Sign Quality on the Frequency of Traffic Accidents. **Promet – Traffic & Transportation**, Zagreb, v. 31, n. 5, p. 549-558, 2019.

FEVE – THE EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION. **Recycling**: why glass always has a happy CO2 ending. Bruxelas: FEVE, 2010. Disponível em: <https://feve.org/wp-content/uploads/2016/04/FEVE-brochure-Recycling-Why-glass-always-has-a-happy-CO2-ending-.pdf#page=3.31>. Acesso em: 28 dez. 2025.

FURSZYFER DEL RIO, D. D. et al. Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, art. 111885, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111885>.

GERACE, Katy S.; MAURO, John C. Characterization of soda-lime silicate glass bottles to support recycling efforts. **International Journal of Ceramic Engineering & Science**, v. 6, e10217, 2024. DOI: 10.1002/ces2.10217.

GROSGES, T. Retro-reflection of glass beads for traffic road stripe paints. **Optical Materials**, v. 30, n. 10, p. 1549-1554, 2008. DOI: 10.1016/j.optmat.2007.09.010

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

HESTIN, M.; DE VERON, S.; BURGOS, S. **Economic study on recycling of building glass in Europe**. [S.l.]: Deloitte, 2016. Disponível em: <https://glassforeurope.com/wpcontent/uploads/2018/04/Economic-study-on-recyclingof-building-glass-in-Europe-Deloitte.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2025.

RENZ, Eduardo Martins. Avaliação do comportamento da retrorrefletividade de pintura de demarcação viária em micro revestimento asfáltico à frio. 2018. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018

HIGHWAY MARKINGS. **A Guide to IS EN 1436 European Standard for Road Markings**. [s.l.]: Highway Markings, 2015. Disponível em: https://www.highwaymarkings.ie/documents/is_en_1436_1.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026

HO, Linda Lee; BUENO FILHO, Júlio Silvío de Souza; FUJII, Walquiria Yumiko; MACHADO, Cláudia A. S.; BERNUCCI, Liedi Legi Bariani; QUINTANILHA, José Alberto. Pavement markings: identification of relevant covariates and controllable factors of retroreflectivity performance as a road safety measure. **Transportation Safety and Environment**, [S. l.], v. 00, n. 0, p. 1-9, 2021. DOI: 10.1093/tse/tdaa034.

HOLLINGSWORTH, Joshua D. **Understanding the Impact of Bead Type on Paint and Thermoplastic Pavement Markings**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engineering Management) – Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 2012. Disponível em: <https://scholar.afit.edu/etd/1267>

LEE, Chang Geun; LEE, Hyun Seock; OH, Heung Un. High performance glass beads for traffic marking in wet weather. **International Journal of Highway Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 9-16, fev. 2012.

LEE, J.; YEE, A. F. Inorganic particle toughening II: Toughening mechanisms of glass bead filled epoxies. **Polymer**, v. 42, n. 2, p. 589-597, 2001.

LEE, Sangbin; KOH, Eunbyul; JEON, Sung-il; KIM, Robin Eunju. Pavement marking construction quality inspection and night visibility estimation using computer vision. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, e02953, 2024. DOI: [10.1016/j.cscm.2024.e02953](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02953).

LENG, Zhengwei et al. Simulation analysis of reflective performance of marking glass beads. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1952, n. 4, p. 042004, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1952/4/042004>

MAZZONI, L. N. *et al.* Characterization of glass beads by image methods for pavement marking retroreflectivity. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, p. 1-15, 2022. DOI 10.14295/transportes.v30i1.2584.

MAZZONI, L. N. *et al.* Field Data Analysis of Pavement Marking Retroreflectivity and Its Relationship with Paint and Glass Bead Characteristics. **Applied Sciences**, Basel, v. 14, n. 10, p. 1-17, 2024. DOI 10.3390/app14104205

MUSGRAVES, J. David; HU, Juejun; CALVEZ, Laurent (Ed.). **Springer handbook of glass**. Springer Nature, 2019.

NITIN; SATI, Bhaskar; MEHTA, Ashima. Advanced Driver Assistance System (ADAS). **International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)** , v. 4, n. 5, p. 506-512, abr. 2024. DOI: 10.48175/IJARSCT-17582.

O'BRIEN, Jim. Embedment and retroreflectivity of drop-on glass spheres in thermoplastic markings. **Transportation Research Record**, Washington, DC, n. 1230, p. 37-44, 1989.

OIKONOMOPOULOU, F. (2019). Unveiling the third dimension of glass: Solid cast glass components and assemblies for structural applications [Dissertação de Doutorado], Delft University of Technology]. A+BE | Architecture and the Built Environment. ISBN 978-94-6366-220-8.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU Brasil, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Global status report on road safety 2023**. Geneva: WHO, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>. Acesso em: 22 dez. 2025.

OSICHENKO, Denitsa; SPIELHOFER, Roland. **Monitoring and inventory of road signs and road markings: State of the art a review of existing methods and systems**. In: PROCEEDINGS OF 7TH TRANSPORT RESEARCH ARENA (TRA 2018), 2018, Viena. Anais [...]. Viena: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, 2018. p. 1-9.

PASHKEVICH, Anton; BARTUSIAK, Jacek; ŻAKOWSKA, Lidia; BURGHARDT, Tomasz E. Durable Waterborne Horizontal Road Markings for Improvement of Air Quality. **Transportation Research Procedia**, v. 45, p. 530-538, 2020. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.060. DOI: [10.1016/j.trpro.2020.03.060](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.060).

PEREIRA, Deividi da Silva; RENZ, Eduardo Martins; BUENO, Lucas Dotto; SPECHT, Luciano Pivoto; SALLES, Lucio Salles de. **Demarcação viária: importantes aspectos atinentes ao seu desempenho retrorrefletivo e o emprego de impressão 3-D em sua dosagem**. *Transportes*, v. 30, n. 1, 2022. DOI: 10.14295/transportes.v30i1.2517.

PIKE, Adam M.; DATTA, Songjukta. Effect of Glass Bead Refractive Index on Pavement Marking Retroreflectivity Considering Passenger Vehicle and Airplane Geometries. **Transportation Research Record**, v. 2674, n. 10, p. 438-447, 2020. DOI: 10.1177/0361198120935869

RIO GRANDE DO SUL. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Programa CREMA-RS**: Contrato de Restauração e Manutenção. Porto Alegre: DAER, [ano]. Disponível em: <http://www.daer.rs.gov.br>. Acesso em: 28 dez. 2025.

SARDESHPANDE, Vishal; GAITONDE, U. N.; BANERJEE, Rangan. Model based energy benchmarking for glass furnace. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p. 2718-2738, 2007.

SCALET, B. M. et al. **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass**: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. doi:10.2791/17065.

SCHWAB, Selma. **Materiais de Demarcação Viária**. Belo Horizonte, [2020]. 43 p. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/files/335/Trabalhos-Academicos/2348/Materiais-de-demarcacao-viaria-completa.pdf> Acesso em: 02 jan. 2026

SMADI, Omar et al. **Recommended Laboratory Test for Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Washington, D.C., n. 2440, p. 94-102, 2014. DOI: 10.3141/2440-12.

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: 23 dez. 2025.

STORSÆTER, A. D.; PITERA, K.; MCCORMACK, E. **Using ADAS to Future-Proof Roads-Comparison of Fog Line Detection from an In-Vehicle Camera and Mobile Retroreflectorometer.** Sensors, v. 21, n. 1737, 2021.. DOI: [10.3390/s21051737](https://doi.org/10.3390/s21051737).

STOUDT, M. D.; VEDAM, K. Retroreflection from spherical glass beads in highway pavement markings. 1: Specular reflection. **Applied Optics**, [s. l.], v. 17, n. 12, p. 1855-1858, 15 June 1978.

SWARCO. **Reflective glass beads made from recycled glass.** [S. l.]: SWARCO Road Marking Systems, 2023. Disponível em: <https://www.swarco.com/stories/reflective-glass-beads-made-recycled-glass>. Acesso em: 22 dez. 2025.

SYNOWICKI, Ron A.; JOHS, Blaine D.; MARTIN, Andrew C. Optical properties of sodalime 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: 24 dez. 2025

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.** 2025. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2025. Orientador: Jacson Weber de Menezes.

TEIXEIRA, Ingrid Machado *et al.* **Transforming Rice Husk Ash into Road Safety: A Sustainable Approach to Glass Microsphere Production.** *Ceramics*, [s. l.], v. 8, n. 93, p. 1-13, 24 jul. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics8030093>

TOMÁS, André Lucas. **Produção e caracterização de microesferas vítreas de diferentes cores produzidas a partir de vidros reciclados para a sinalização viária.** 2024. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2024. Orientador: Jacson Weber de Menezes

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Paris Agreement. Paris: UNFCCC Secretariat, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 05 nov. 2025.

UNITED STATES. Federal Highway Administration (FHWA). **Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways**. 11. ed. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, 2023. Disponível em: https://mutcd.fhwa.dot.gov/pdfs/11th_Edition/mutcd11thedition.pdf. Acesso em: 24 dez. 2025.

VIETTA FILHO, Félix. **Desenvolvimento e validação de um aparato para produção de microesferas vítreas aplicadas a sinalização viária horizontal**. 2025. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2025

WENZEL, Kevin M. et al. **Glass Beads for Road Markings: Surface Damage and Retroreflection Decay Study**. Applied Sciences, v. 12, n. 4, p. 2258, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12042258>.

YADAV, Piyush; LOHIYA, Priyank. Effect of Solid Glass Microsphere Content and Size of Particles on Physical Properties of Polyester-Based Composites. **International Journal of Research Publication and Reviews**, v. 2, n. 8, p. 265-268, 2021.

ZHANG, Guanghua; HUMMER, Joseph E.; RASDORF, William. **The impact of bead density on paint pavement marking retroreflectivity**. Raleigh: North Carolina State University, Department of Civil, Construction, and Environmental Engineering, 2009.