

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

**FÉLIX VIETTA FILHO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APARATO PARA PRODUÇÃO DE  
MICROESFERAS VÍTREAS APLICADAS A SINALIZAÇÃO VIÁRIA  
HORIZONTAL**

**Alegrete  
2025**

**FÉLIX VIETTA FILHO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APARATO PARA PRODUÇÃO DE  
MICROESFERAS VÍTREAS APLICADAS A SINALIZAÇÃO VIÁRIA  
HORIZONTAL**

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

Orientador: Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes

**Alegrete  
2025**

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

Vietta Filho, Felix

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APARATO PARA PRODUÇÃO  
DE MICROESFERAS VÍTREAS APLICADAS A SINALIZAÇÃO VIÁRIA  
HORIZONTAL / Felix Vietta Filho. 71 p.

666V Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM  
ENGENHARIA, 2025.

"Orientação: Jacson Weber de Menezes".

1. Fabricação de microesferas de vidro. 2. Sinalização viária. 3. Microesferas de  
vidro. I. Título.

**FELIX VIETTA FILHO**

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM APARATO PARA PRODUÇÃO DE  
MICROESFERAS VÍTREAS APLICADAS A SINALIZAÇÃO VIÁRIA HORIZONTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de 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: 24/10/25.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes  
Orientador  
Unipampa

---

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich  
Unipampa

---

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt  
Unipampa



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/10/2025, às 18:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/10/2025, às 13:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/11/2025, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1864561** e o código CRC **08EA7029**.

---

## AGRADECIMENTOS

Acredito que todos são capazes de alcançar seus objetivos, mas a presença de certas pessoas torna esse caminho mais leve, significativo e possível. Por isso, é impossível afirmar que sou o único responsável pela realização deste trabalho. Ao longo dessa trajetória, encontrei pessoas que contribuíram não apenas para o desenvolvimento da minha pesquisa, mas também para meu desenvolvimento pessoal, tornando minha vida mais alegre, inspiradora e leve. Este trabalho, portanto, é fruto não apenas do meu esforço, mas também do apoio, do carinho e da dedicação de todos que estiveram ao meu lado antes e durante sua elaboração. Agradeço primeiramente à minha mãe, Daisa Moura Debus, e ao meu pai, Felix Vietta Neto, pelo amor incondicional, pela paciência e pelo exemplo de trabalho e determinação. São eles a base de todas as minhas conquistas e a inspiração constante para seguir em frente. À minha irmã, Ingrid Debus Vietta, agradeço pela cumplicidade, pelo incentivo e pela presença sempre acolhedora em todos os momentos. À minha companheira, Andressa Carvalho Sókora, dedico um agradecimento especial pelo amor, paciência e compreensão em cada etapa desta caminhada. Seu apoio constante foi essencial para que eu mantivesse o equilíbrio e a motivação, mesmo diante dos desafios. Registro minha profunda gratidão ao meu orientador, professor Jacson Weber de Menezes, pela orientação dedicada, pela confiança depositada em mim, assim como a paciência e contribuição decisiva para o desenvolvimento deste trabalho. À professora Chiara Valsecchi, agradeço sinceramente pelo incentivo e pelas discussões enriquecedoras que motivaram sempre a busca por mais conhecimento. Agradeço também ao professor Gustavo Furh pelas valiosas contribuições e pelas orientações que enriqueceram este trabalho. Os amigos são a família que escolhemos na trajetória da vida. São pessoas que, mesmo sem compartilhar o mesmo sangue, tornam-se leais, presentes e companheiras. São aqueles em quem podemos confiar de olhos fechados, certos de que estarão prontos para ajudar em qualquer situação. A essa família que escolhi, meus sinceros agradecimentos ao Thauan Littiere; Carla Morais de Menezes e Ivan Mangine Lopes, pela ajuda técnica e pelo companheirismo nas fases mais desafiadoras a Ingrid Teixeira, por toda sua ajuda, sua total disponibilidade e apoio constante; Paola da Rosa, Matheus Chim pela amizade sincera, incentivo e suporte emocional indispensável e Patrícia da Rosa, pela colaboração e pela presença amiga em momentos decisivos. Deixo um agradecimento especial ao Grupo de Pesquisa GOMNDI, pelo ambiente colaborativo, pelas discussões construtivas e pelo apoio técnico e científico que foram fundamentais para o amadurecimento desta pesquisa. Por fim, manifesto minha sincera gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) pela infraestrutura e por proporcionar um ambiente propício ao desenvolvimento científico e pessoal. A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, deixo meu mais profundo e sincero agradecimento.

“Ninguém que é curioso é idiota. As pessoas que não fazem perguntas permanecem ignorantes para o resto de suas vidas.”

*Neil de Grasse Tyson*

## RESUMO

A sinalização horizontal constitui um dos principais elementos de segurança viária, desempenhando papel fundamental na organização do tráfego, orientação dos motoristas e prevenção de acidentes. Em especial durante a noite ou em condições climáticas adversas, como chuva e neblina, a visibilidade das marcas no pavimento é essencial para uma condução mais segura. No entanto, as tintas de demarcação sozinhas apresentam limitações quanto à visibilidade, sobretudo em situações de baixa iluminação. Para superar esse desafio, microesferas de vidro são incorporadas às tintas de sinalização, desempenhando a função de potencializar a visibilidade da sinalização horizontal. Essas microesferas atuam como elementos retrorrefletores, redirecionando a luz dos faróis dos veículos de volta em direção aos olhos dos motoristas. Entretanto, para que as microesferas tenham um desempenho adequado, estas devem seguir critérios descritos em normas técnicas, como coloração das microesferas vítreas, composição química, características granulométricas e morfológicas, densidade, índice de refração, etc. No Brasil, a produção e a caracterização de microesferas vítreas são regulamentadas pela norma NBR 16184:2021, a qual estabelece, entre outros requisitos descritos acima, a utilização de vidros incolores e a classificação das microesferas em diferentes tipos. As microesferas do Tipo IIA, foco deste trabalho, são caracterizadas por apresentarem diâmetro entre 250  $\mu\text{m}$  e 850  $\mu\text{m}$  e por serem aspergidas sobre a tinta de demarcação logo após a aplicação da pintura. Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um aparato experimental, baseado no método de esferoidização por chama vertical, destinado à fabricação de microesferas vítreas do Tipo IIA a partir de vidro reciclado incolor. Para validar o processo, foram analisadas as características morfológicas das microesferas obtidas tendo os critérios estabelecidos pela NBR 16184:2021 como referência. Também, para validar o processo, microesferas comerciais de mesmo tipo foram caracterizadas e comparadas com as fabricadas neste trabalho. Paralelamente, o vidro reciclado empregado como matéria-prima foi caracterizado quanto à sua composição química, transparência no visível via espectrofotometria e densidade. Por fim, as microesferas produzidas foram avaliadas quanto à retrorrefletividade, utilizando microesferas comerciais de mesmo Tipo como referência. Os resultados obtidos demonstraram desempenho semelhante entre as amostras fabricadas e as comerciais, confirmando a viabilidade do processo de fabricação proposto.

**Palavras-chave:** Método de chama vertical; Microesferas; Vidro reciclável; Sinalização Horizontal Viária.

## ABSTRACT

Horizontal road marking is one of the main elements of traffic safety, playing a fundamental role in traffic organization, driver guidance, and accident prevention. Especially at night or under adverse weather conditions, such as rain and fog, the visibility of pavement markings is essential for safer driving. However, marking paints alone present limitations in terms of visibility, particularly in low-light situations. To overcome this challenge, glass microspheres are incorporated into road marking paints, enhancing the visibility of horizontal signaling. These microspheres act as retroreflective elements, redirecting the light from vehicle headlights back toward drivers' eyes. Nevertheless, for microspheres to perform adequately, they must comply with criteria described in technical standards, such as color of the glass microspheres, chemical composition, granulometric and morphological characteristics, density, refractive index, among others. In Brazil, the production and characterization of glass microspheres are regulated by standard NBR 16184:2021, which establishes, among the requirements mentioned above, the use of colorless glass and the classification of microspheres into different types. Type IIA microspheres, the focus of this study, are characterized by diameters ranging from 250  $\mu\text{m}$  to 850  $\mu\text{m}$  and are applied by being dropped onto the road marking paint immediately after its application. In this context, the present work aimed to develop an experimental apparatus, based on the vertical flame spheroidization method, for the production of Type IIA glass microspheres from recycled colorless glass. To validate the process, the morphological characteristics of the obtained microspheres were analyzed with reference to the criteria established by NBR 16184:2021. Additionally, to ensure validation, commercial microspheres of the same type were characterized and compared with those produced in this study. In parallel, the recycled glass used as raw material was characterized in terms of chemical composition, visible light transmittance via spectrophotometry, and density. Finally, the microspheres produced were evaluated for retroreflectivity, using commercial microspheres of the same type as reference. The results demonstrated similar performance between the manufactured and commercial samples, confirming the feasibility of the proposed manufacturing process.

**Keywords:** Vertical flame method; Microspheres; Recyclable glass; Horizontal road marking.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de sinalização horizontal viária.....	13
Figura 2: a) Rodovia com presença de sinalização horizontal. b) Rodovia sem a presença de sinalização horizontal viária.....	14
Figura 3: Representação da interação entre os feixes luminosos e as microesferas de vidro...	15
Figura 4: Classificação dos tipos de microesferas de acordo com o diâmetro.....	17
Figura 5: Deposição de microesferas sinalizações horizontais.....	18
Figura 6: Avaliação da retrorrefletividade para diferentes geometrias, a) geometria de 15m, adotada no Brasil; b) geometria de 30m.....	19
Figura 7: Representação do método de flutuação de pós.....	21
Figura 8: Representação do aparato experimental utilizado para obtenção de microesferas pelo método de esferoidização por chama.....	22
Figura 9: Representação do esquema de produção de microesfera utilizando Plasma Spray.....	23
Figura 10: Representação do aparato experimental utilizado na obtenção de microesferas vítreas.....	24
Figura 11: Fluxograma resumindo o andamento das atividades.....	25
Figura 12: Modelo esquemático dos componentes do aparato.....	26
Figura 13: Modelo esquemático do aparato.....	27
Figura 14: Modelo esquemático das abraçadeiras fabricadas.....	28
Figura 15: Sistema de deposição de microesferas no aparato.....	29
Figura 16: Vista de baixo pra cima dos quatro queimadores ligados em um plano comum....	29
Figura 17: Garrafas obtidas.....	30
Figura 18: a) Moinho de bolas b) Esferas de alumina.....	30
Figura 19: Peneiras granulométricas utilizadas.....	31
Figura 20: Equipamento FRX para avaliar a composição dos vidros.....	32
Figura 21: Espectrofotômetro de UV-VIS.....	33
Figura 22: Sequência para análise da densidade das microesferas.....	34
Figura 23: Microscópio óptico trinocular usado para avaliação morfológica e granulométrica.....	35
Figura 24: a) Amostra preparada em fita adesiva; b) Imagem via software IsCapture®.....	36
Figura 25: Retrorrefletômetro EasyLux utilizado nas medições de retrorrefletividade.....	37
Figura 26: Placa preta utilizada para análise da retrorrefletividade das microesferas.....	38
Figura 27: Espectro de Transmitância em função do comprimento de onda dos vidros utilizados.....	41
Figura 28: Geometria característica antes e após o processo de fabricação: (a) cacos e (b) microesferas.....	43
Figura 29 : Exemplos de defeitos presentes nas microesferas e vidro.....	44
Figura 30: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 212µm e 300 µm: (a) fabricada; b) comercial.....	46
Figura 31: Distribuição granulométrica para $\phi_1$ : (a) fabricada, (b) comercial.....	47
Figura 32: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 300µm e 425 µm: (a) fabricada; b) comercial.....	48

Figura 33: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 425 $\mu\text{m}$ e 500 $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial.....	50
Figura 34: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 500 $\mu\text{m}$ e 600 $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial.....	51
Figura 35: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 600 $\mu\text{m}$ e 710 $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial.....	53
Figura 36: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 710 $\mu\text{m}$ e 850 $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial.....	54
Figura 37: Características morfológicas dos elementos para as diferentes granulometrias bem como os limites descritos em norma. ....	56
Figura 38: Medidas da retrorefletividade das amostras. ....	58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Disposição das peneiras utilizadas. ....	31
Tabela 2: Faixas granulométricas avaliadas neste trabalho. ....	38
Tabela 3: Critérios da norma brasileira NBR 16184:2021 para microesferas do Tipo-IIA. ....	39
Tabela 4: Composição química dos vidros utilizados na produção das microesferas. ....	40
Tabela 5: Densidade das microesferas produzidas. ....	42
Tabela 6: Critérios descritos em norma associados a morfologia das microesferas. ....	43
Tabela 7: Distribuição granulométrica para $\varphi_1$ . ....	47
Tabela 8: Características morfológicas das microesferas para $212 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 300 \mu\text{m}$ . ....	48
Tabela 9: Distribuição granulométrica para $\varphi_2$ . ....	49
Tabela 10: Características morfológicas das microesferas para $300 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 425 \mu\text{m}$ . ....	49
Tabela 11: Distribuição granulométrica para $\varphi_3$ . ....	50
Tabela 12: Características morfológicas das microesferas para $425 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 500 \mu\text{m}$ . ....	51
Tabela 13: Distribuição granulométrica para $\varphi_4$ . ....	52
Tabela 14: Características morfológicas das microesferas para $500 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 600 \mu\text{m}$ . ....	52
Tabela 15: Distribuição granulométrica para $\varphi_5$ . ....	53
Tabela 16: Características morfológicas das microesferas para $600 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 710 \mu\text{m}$ . ....	54
Tabela 17: Distribuição granulométrica para $\varphi_6$ . ....	55
Tabela 18: Características morfológicas das microesferas para $710 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 850 \mu\text{m}$ . ....	55

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Objetivos.....	10
1.1.1	Objetivo geral.....	10
1.1.2	Objetivos específicos.....	10
1.1.3	Justificativa.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	Sinalização viária.....	12
2.1.1	Sinalização horizontal viária.....	13
2.2	Retrorefletividade.....	15
2.3	Microesfera de vidro.....	16
2.3.1	Classificação das microesferas de acordo com a norma ABNT NBR 16184:2021 16	
2.3.2	Normas para medição da retrorefletividade.....	18
2.4	Métodos de fabricação de microesferas de vidro.....	20
2.4.1	Flutuação de pós.....	20
2.4.2	Esferoidização por chama.....	21
2.5	Plasma spray.....	22
2.5.1	Queda gravitacional.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1	Desenvolvimento do aparato vertical para produção de microesferas de vidro.....	25
3.1.1	Preparação das amostras para fabricação das microesferas.....	30
3.2	Caracterização das amostras.....	32
3.2.1	Fluorescência de Raio-X (FRX).....	32
3.2.2	Espectrofotometria UV-VIS.....	33
3.2.3	Densidade.....	33
3.2.4	Análise Morfológica e granulométrica.....	34
3.2.5	Análise da Retrorefletividade.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Composição química e cor dos vidros reciclados utilizados.....	39
4.2	Densidade.....	41
4.3	Análise Morfológica.....	42

4.4	Análise da Retrorrefletividade .....	58
5	Conclusão .....	60
6	Trabalhos Futuros .....	61
6.1	Eficiência de coleta em função da granulometria .....	61
6.2	Eficiência energética do processo .....	61
7	REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## 1 INTRODUÇÃO

O vidro é um produto amplamente utilizado no mundo, devido as diversas composições químicas possíveis, podendo ser utilizado desde utensílios domésticos até produtos da indústria aeroespacial (SOUZA, 2015; BARROS FILHO, 2012). O composto principal para fabricação de vidros virgens é o óxido de silício ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) presente na areia de leitos de rios, porém sua extração é extremamente prejudicial ao meio ambiente, afetando significativamente a qualidade dos corpos d'água, a saúde dos ecossistemas e a segurança de barragens adjacentes (MCLELLAN; SHAND, 1984; DUAN, 2019; MAIA *et al.*, 2017). O vidro possui alta reciclabilidade e quando refundido pode ser produzido em proporções de um para um (1:1), ou seja, para cada 1 kg de vidro reciclado, pode ser obtido 1 kg de vidro com as mesmas propriedades do vidro original, sem limitações de quantas vezes pode ser reciclado (FEITOSA *et al.*, 2017). Além disso, o vidro feito de materiais reciclados pode reduzir em 20% a emissão de poluentes para o ar e em 50% para água, quando comparados com vidros produzidos a partir de matéria prima virgem (ASSIS, 2006). Portanto, o descarte do vidro representa a perda de um material que carrega em si um alto valor agregado.

Dentre as propriedades do vidro, pode-se destacar as suas características ópticas e físicas únicas, as quais permitem a aplicação em diversos setores industriais. Uma das aplicações deste material está na produção de microesferas de vidro, que podem ser aplicadas em vários setores. Dentre estes, pode-se destacar a utilização de microesferas na indústria aeroespacial; no setor de cosméticos e produtos de cuidado pessoal; como material de polimento e abrasivos; na indústria de petróleo e gás bem como na sinalização viária (KENT *et al.*, 2017; BURGHARDT *et al.*, 2022). Em particular, a utilização de microesferas de vidro na sinalização de estradas ocorre devido a sua capacidade de retrorrefletir a luz dos faróis dos veículos em direção aos olhos dos condutores. Mais especificamente, as microesferas atuam como minúsculas lentes que conseguem coletar os feixes de luz dos faróis e refletir a luz de volta para a fonte, amplificando a visibilidade da sinalização, efeito que é mais bem observado à noite (SCHWAB, 1999; PEREIRA *et al.*, 2022).

Entre os métodos mais comuns de fabricação de microesferas de vidro, pode-se destacar o método de esferoidização por chama. Este método consiste na deposição de partículas vítreas sobre uma ou mais chamas, que fornecem energia cinética de lançamento e térmica suficiente (reduzindo a sua viscosidade), tornando-as partículas esféricas. Como estas gotículas de vidro possuem dimensões muito pequenas, resfriam-se rapidamente, mantendo assim o formato

esférico (SCHWAB, 1999; GARNIER; ABRIOU; COQUILLON, 1987; SOUZA, 2015; BARROS FILHO, 2012).

A NBR 16184:2021 especifica os requisitos e métodos de ensaios de esferas e microesferas de vidro utilizadas para sinalização horizontal viária. A norma determina que as microesferas devem ser incolores e possuir pelo menos 65% de sílica em sua composição. A especificação da coloração limita os vidros que podem ser utilizados, pois as microesferas fabricadas a partir de vidros reciclados de diferentes cores mantém a coloração dos vidros de origem. Mais do que isso, esta mesma norma classifica as microesferas em tipos. Os tipos mais utilizados são chamados de Tipo-IB e Tipo-IIA, os quais diferem basicamente em dois quesitos: diâmetro das microesferas e método de aplicação. As microesferas do Tipo-IB possuem diâmetro que varia entre 63 e 212  $\mu\text{m}$  e estas são misturadas a tinta de demarcação viária previamente a pintura, de forma que o efeito da retrorefletividade ocorre quando a tinta sofre um desgaste, tornando estas microesferas aparentes. Já as microesferas do Tipo-IIA possuem diâmetro que varia entre 250 e 850  $\mu\text{m}$ . Diferentemente das do Tipo-IB, as IIA são aspergidas após a pintura fornecendo o efeito da retrorefletividade de forma imediata. Normalmente ambos os tipos de microesferas estão presentes na sinalização, porém, caso apenas uma esteja presente, esta será a do Tipo-IIA devido a importância de fornecer o efeito da retroreflexão de forma imediata.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um aparato capaz de fabricar microesferas do Tipo II-A a partir de garrafas de vidro recicladas incolores e avaliar se as amostras produzidas atendem a NBR 16184:2021. Para fins de comparação, foram utilizadas como referência microesferas comerciais de mesmas características.

## **Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Desenvolver um aparato capaz de fabricar microesferas de vidro do Tipo II-A aplicadas na sinalização horizontal viária, utilizando vidros de garrafas recicladas incolores.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Utilizar vidros incolores de garrafas recicladas para aplicação em sinalização horizontal viária;
- Produzir microesferas de vidro com diâmetros variando entre 212  $\mu\text{m}$  e 850  $\mu\text{m}$ ;

- Validar o método de produção considerando a norma NBR-16184:2021 como referência no que diz respeito a morfologia e a densidade das microesferas;
- Avaliar a retrorefletividade das microesferas produzidas tendo como referência microesferas comerciais de mesmo tipo.

### **1.1.3 Justificativa**

O grupo GOMNDI (Grupo de óptica, micro e nanofabricação de dispositivos) da unipampa vem produzindo microesferas de vidro feitas a partir de vidros reciclados e vidros da cinza da casca de arroz; porém estas microesferas estavam limitadas a um diâmetro máximo de 250  $\mu\text{m}$ , caracterizando-as como sendo do Tipo-IB. Esta limitação ocorria principalmente devido ao método que vinha sendo utilizado, chamado de método de chama horizontal, o qual não permitia gerar microesferas de diâmetro maior. No presente trabalho, a grande contribuição está na construção de um aparato que permite gerar microesferas do tipo IIA, as quais não eram possíveis de se fabricar com os aparatos desenvolvidos até então. Com esta contribuição, o laboratório adquire uma capacidade de produzir os dois principais tipos de microesferas, permitindo ampliar o leque de estudos de microesferas aplicadas a sinalização viária horizontal.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### **Sinalização viária**

A sinalização viária constitui um elemento central do sistema de gestão do tráfego, sendo responsável pela comunicação entre a infraestrutura e os usuários da via. Trata-se de um conjunto de dispositivos visuais padronizados, cujo objetivo é organizar a circulação de veículos e pedestres, garantindo segurança e fluidez no deslocamento urbano e rodoviário (CONTRAN, 2022). No Brasil, a regulamentação da sinalização é definida pelo Código de Trânsito Brasileiro (Lei nº 9.503/1997), enquanto o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), estabelece diretrizes sobre dimensões, cores e materiais que devem ser utilizados na sinalização viária, que tradicionalmente é classificada em cinco grupos principais:

**Sinalização vertical** – composta por placas de regulamentação, advertência e indicação.

**Sinalização horizontal** – marcas no pavimento, como linhas de segregação de fluxo, faixas de pedestres e símbolos direcionais.

**Sinalização semafórica** – dispositivos luminosos que regulam a preferência de passagem, aplicados em interseções críticas, travessias urbanas e corredores de transporte coletivo.

**Sinalização de obras** – elementos temporários como cones, cavaletes e barreiras móveis, que alertam sobre restrições e intervenções no leito viário.

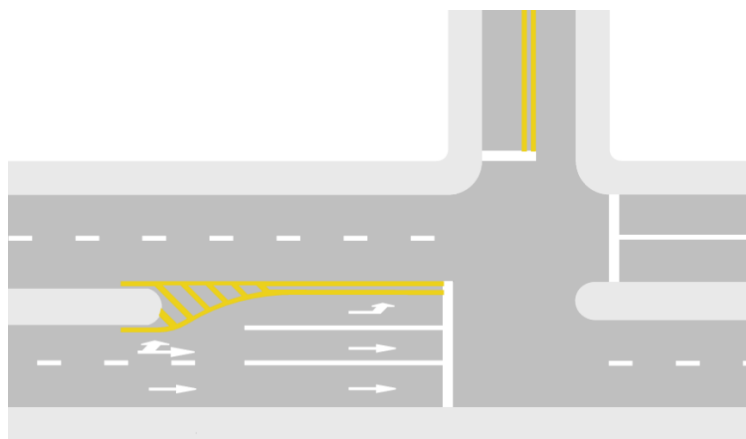
**Sinalização auxiliar** – dispositivos complementares, a exemplo de tachas refletivas, barreiras de contenção, defensas metálicas e painéis eletrônicos de mensagem variável.

A principal função das sinalizações viárias é transmitir aos condutores informações claras e oportunas sobre regras, restrições e orientações, de modo a garantir que a tomada de decisão ocorra dentro do tempo adequado. A utilização combinada dos diferentes tipos de sinalização garante uma comunicação uniforme, evitando ambiguidades e permitindo que motoristas, mesmo não familiarizados com a via, compreendam as instruções, contribuindo para a redução da probabilidade de acidentes. Portanto para que seu objetivo seja plenamente atingido, a sinalização deve apresentar boa visibilidade, legibilidade e objetividade, sendo indispensável para a segurança de seus usuários (Confederação Nacional do Transporte, 2024). Para garantir esses fatores, normas técnicas regem a implementação das sinalizações, determinando características dos materiais utilizados e os métodos de ensaios dos mesmos.

### 2.1.1 Sinalização horizontal viária

A sinalização horizontal viária, segundo o CONTRAN (2007), é composta por marcas, linhas, símbolos e legendas aplicadas diretamente no pavimento, cuja função é instruir condutores e pedestres, garantindo a fluidez e a segurança do tráfego. Além disso, transmite informações complementares ou reforça prescrições da sinalização vertical, desempenhando papel fundamental na delimitação de espaços, organização de fluxos, indicação de áreas de conflito e na promoção de maior segurança em interseções e travessias. A Figura 1 exemplifica diferentes elementos da sinalização horizontal em uma rodovia, evidenciando locais de parada obrigatória, delimitações de faixas e conversões permitidas.

Figura 1: Exemplos de sinalização horizontal viária.



Fonte: Adaptado de BRASIL (2007)

A efetividade da sinalização horizontal depende diretamente de sua clareza, visibilidade e durabilidade. Sinalizações deficientes ou a ausência de demarcações comprometem a tomada de decisão dos condutores, aumentando o risco de acidentes (Campos e Moraes, 2018). Fiolié et al. (2023) demonstraram que altos níveis de visibilidade das marcas viárias impactam positivamente a percepção dos motoristas durante a noite, reduzindo a sobrecarga cognitiva e aumentando a segurança operacional. A Figura 2 (a) ilustra uma rodovia devidamente sinalizada, enquanto a Figura 2 (b) apresenta o mesmo trecho sem sinalização horizontal, situação que evidencia as dificuldades de interpretação da via.

Figura 2: a) Rodovia com presença de sinalização horizontal. b) Rodovia sem a presença de sinalização horizontal viária.



Fonte: Adaptado de EBANATAW (2024).

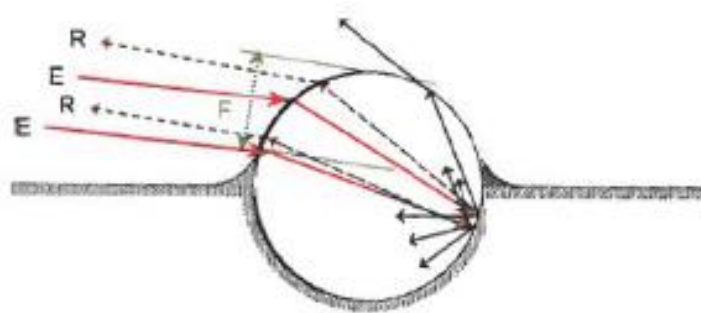
Para garantir a visibilidade mesmo em condições adversas, utiliza-se microesferas de vidro adicionadas a tinta da sinalização, as quais são responsáveis por aumentar sua visibilidade, devido ao fenômeno físico da retrorrefletividade, que redireciona a luz proveniente dos faróis dos veículos de volta aos olhos dos condutores, garantindo sua visibilidade em situações de chuvas, neblinas ou durante a noite. Lee (2008), reforça que a percepção visual das marcas refletindo os faróis constitui referência indispensável em ambientes de baixa iluminação. Diamandouros e Gatscha (2016), evidenciam que marcas retrorrefletivas aumentam a confiança do motorista em condições noturnas e chuvosas, especialmente em faixas etárias mais elevadas.

Para garantir a segurança nas rodovias, as microesferas devem seguir um padrão de qualidade na sua fabricação, assim como uma aplicação correta para garantir as características desejadas. Portanto, normas técnicas brasileiras regulamentam a avaliação da retrorrefletividade em sinalizações horizontais, considerando as geometrias de 15 m e 30 m, sendo elas, respectivamente, a NBR 14723:2020 e a NBR 16307, enquanto a norma NBR 16184:2021 padroniza as microesferas utilizadas na sinalização horizontal, determinando as características e os métodos de ensaios das microesferas utilizadas. Dessa forma, a sinalização horizontal, quando planejada, aplicada e mantida conforme padrões técnicos e científicos, constitui um instrumento indispensável para a organização do tráfego e a redução de acidentes.

## Retrorrefletividade

A retrorrefletividade ocorre devido a junção dos fenômenos físicos reflexão e refração em partículas esféricas, que fazem com que a luz que incide na microesfera retorne praticamente à direção da fonte emissora (Priewe e Frej,1990). Quando o feixe luminoso (E) interage com a microesfera transparente, parte da energia penetra na partícula (refrata), onde sua direção sofre uma angulação conforme a lei de Snell, o feixe luminoso (E) reflete na superfície de trás da microesfera e reflete de volta, sendo então redirecionado no sentido do ponto de origem (R). A Figura 3 exemplifica essa interação entre os feixes luminosos e as microesferas de vidro.

Figura 3: Representação da interação entre os feixes luminosos e as microesferas de vidro.



Fonte: Adaptado de VASILIAUSKAS; VAITKUS (2020).

Na sinalização viária a retrorrefletividade é quantificada por meio do coeficiente de retrorreflexão (RL), cuja unidade é expressa em milicandela por lux por metro quadrado ( $\text{mcd/lux/m}^2$ ). A retrorrefletividade é afetada por diversos fatores, como a qualidade do material utilizado, a incorporação das microesferas nas marcações, e densidade das esferas de vidro utilizadas, o material das marcações viárias, o tipo de microesfera utilizado, a manutenção das sinalizações entre outros (BABIC et al., 2022; MAZZONI et al., 2022). Entretanto, a legislação brasileira vigente não estabelece de forma normativa valores específicos de retrorrefletividade para a sinalização horizontal em rodovias. Na prática, tais parâmetros mínimos são geralmente definidos por órgãos gestores da malha rodoviária, os quais detêm competência para regulamentar e fiscalizar os trechos sob sua jurisdição (Parcianello, 2016).

O valor mínimo para retrorrefletividade varia conforme a cor da tinta assim, alguns autores bem como o órgão responsável. Segundo BABIC et al. (2020), a retrorrefletividade mínima (RL) da sinalização viária para motoristas de todas as idades deve ser de pelo menos  $100 \text{ mcd/lux/m}^2$ . Entretanto, para o Burghardt (2025), a retrorrefletividade mínima deveria ser  $150 \text{ mcd/lux/m}^2$ , no entanto os mesmos autores afirmam que a maioria dos administradores de

estradas estabelecem o valor de 100 mcd/lux/m<sup>2</sup>, ou menos. No Brasil a sinalização horizontal no Brasil é regulamentada por órgãos como o DNIT, pela Norma 100/2018, a qual diferencia os requisitos conforme a natureza da sinalização: nas provisórias, os limites são de 150 mcd/lux/m<sup>2</sup> (branca) e 100 mcd/lux/m<sup>2</sup> (amarela), enquanto nas definitivas os valores exigidos são mais altos, chegando a 250 mcd/lux/m<sup>2</sup> e 150 mcd/lux/m<sup>2</sup>, respectivamente. Além disso, após 15 dias de aplicação, a retrorefletividade não deve ser inferior a 100 mcd/lux/m<sup>2</sup> (branca) e 80 mcd/lux/m<sup>2</sup> (amarela). Tais critérios demonstram a preocupação normativa em assegurar que a sinalização mantenha desempenho adequado e confiável ao longo do tempo, mesmo diante do desgaste natural do tráfego e das condições ambientais.

### **Microesfera de vidro**

Como descrito anteriormente, a retrorefletividade num contexto de sinalização horizontal, ocorre quando microesferas de vidro sólidas são incorporadas a sinalização. As microesferas de vidro são partículas esféricas com diâmetro variando entre 1  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$  (NBR 16184, 2021; MAHMOUD *et al.*, 2023). De acordo com Schwab (1999), estas normalmente são produzidas a partir de vidros compostos por soda-cal-sílica (Na<sub>2</sub>O-CaO-SiO<sub>2</sub>), com um teor de sílica superior a 65%. A esferolização das partículas de vidro resulta do aumento da temperatura, que reduz a viscosidade do vidro, permitindo que as partículas sejam moldadas para a configuração esférica. Para que tal transformação seja possível, Souza (2015) afirma que as partículas devem passar por uma área aquecida a uma temperatura específica, que pode ser alcançada tanto em fornos quanto por meio de chamas.

Estas microesferas sólidas são amplamente utilizadas na sinalização viária onde as microesferas de vidro fornecem a retrorefletividade nas marcações da sinalização horizontal, melhorando a visibilidade das demarcações, mesmo em condições adversas, como chuva, neblina ou durante a noite.

#### **2.1.2 Classificação das microesferas de acordo com a norma ABNT NBR 16184:2021**

A NBR 16184:2021 especifica os requisitos e métodos de ensaio para as esferas e microesferas de vidro usadas na sinalização horizontal viária. Seu objetivo é garantir que os produtos gerados atendam aos padrões de qualidade e desempenho necessários para uma

aplicação eficiente e duradoura nas sinalizações viárias. Esta mesma norma classifica as microesferas de acordo com seus diâmetros, conforme a Figura 4.

Figura 4: Classificação dos tipos de microesferas de acordo com o diâmetro.

Peneiras (conforme as ABNT NBR NM-ISO 2395, ABNT NBR NM-ISO 3310-1 e ABNT NBR NM-ISO 3310-2)		% passando											
Número	Abertura μm	Tipo I		Tipo II					Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo VI	Tipo VII
		A	B	A	B	C	D	E					
6	3 350											100	
8	2 360										100	95-100	
10	2 000									100	95-100	80-95	
12	1 700								100	95-100	80-95	10 a 40	
14	1 400								95-100	80-95	10 a 40	0-5	
16	1 180								80-95	10 a 40	0-5	0-2	100
18	1 000			100		100	100	100	10 a 40	0-5	0-2		
20	850	100		98-100	100	90-100	95-100	95-100	0-5	0-2			95-100
25	710								0-2				
30	600	90-100		75-95		10 a 30	85-100	50-75					55-75
40	425				90-100			15-45					15-35
50	300	18-35	100	9 a 35		0-5	0-10	0-10					0-5
70	212		85-100		0-10		0						
80	180			0-5				0-2					
100	150	0-10	15-55		0-5								
140	106												
200	75	0-2											
230	63		0-10										

Fonte: NBR16184, 2021

Como pode ser observado, as microesferas do Tipo-IB possuem um diâmetro localizado em uma faixa granulométrica que vai de 63 a 250 μm. Já as microesferas do Tipo-IIA possuem um diâmetro principalmente localizado em uma faixa que vai de 300 a 600 μm. A Figura 5 mostra estes dois diferentes tipos de microesferas já presentes na tinta de demarcação viária. As microesferas mais utilizadas na sinalização viária são as classificadas como sendo do tipo II-A, também chamadas de *Drop-on*, pois são depositadas na superfície da tinta apresentando a retrorrefletividade de forma imediata. Por outro lado, as microesferas do tipo I-B são também chamadas de *Premix*, pois são misturadas a tinta e só apresentam o fenômeno de retrorrefletividade após o desgaste da tinta.

Figura 5: Deposição de microesferas sinalizações horizontais.



Fonte: Adaptado de BURGHARDT (2025).

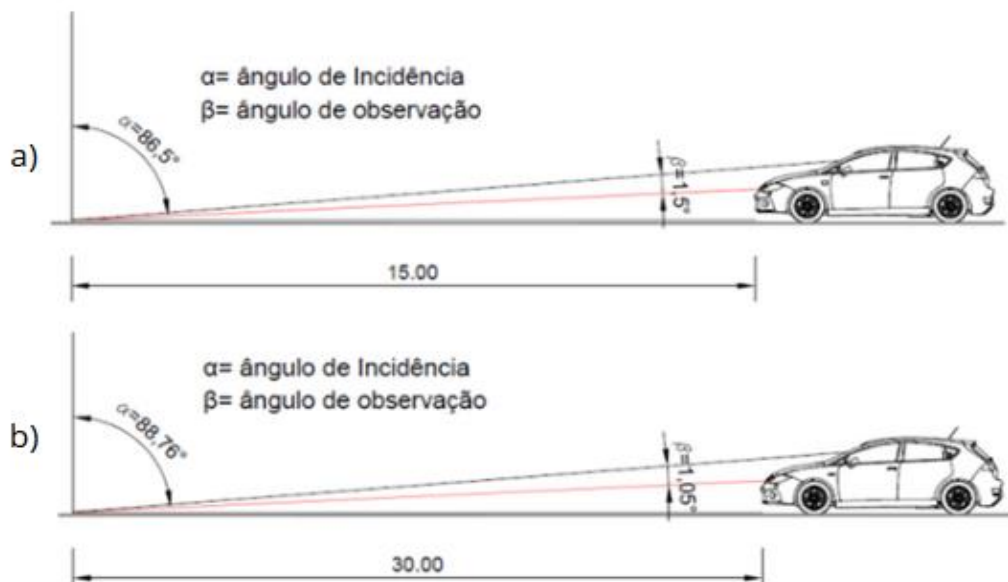
Além da granulometria que define basicamente o tipo de microesfera, a norma especifica outras características físicas e químicas importantes. As características físicas que a norma determina são a porcentagem de esferas, partículas defeituosas (ovoides e geminadas) e partículas angulares (cacos), assim como a densidade de massa do vidro que cada tipo de microesfera deve conter. Quanto a sua composição química, a norma determina que o vidro deva possuir no mínimo 65% de sílica em sua composição e no máximo 200 mg/kg de elementos tóxicos como o arsênio, chumbo e antimônio. Para o caso da morfologia, a norma determina que nos tipos I-A; I-B; II-A; II-B; V, VI e VII, no máximo 3% das partículas podem ser angulares (cacos) ou esferas quebradas, e que até 20% podem ser fragmentos ovoides deformados, geminados ou bolhas gasosas. Para as tipos II-C, II-D, no máximo 1 % podem ser esferas quebradas ou partículas angulares (cacos) e até 10% podem ser fragmentos ovoides, deformados, geminados ou conter bolhas gasosas. Por fim, para os tipos II-E, III e IV no máximo 1% podem ser esferas quebradas partículas angulares (cacos) e até 15% podem ser fragmentos ovoides, deformados, geminados ou bolhas gasosas. Já para o caso da densidade, a norma determina que as microesferas dos tipos I-A, I-B, II-A, II-B, II-C, II-D, II-E III, IV, V, VI, devem possuir densidade variando entre 2,4 g/cm<sup>3</sup> a 2,6 g/cm<sup>3</sup>, já para o tipo VII a densidade deve variar entre 4 g/cm<sup>3</sup> a 4,5 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.1.3 Normas para medição da retrorrefletividade

Atualmente existem duas normas que determinam os métodos de avaliação da retrorrefletividade inicial e residual para as sinalizações horizontais viárias, sendo elas a ABNT

NBR 14723:2020 que estabelece os procedimentos para a avaliação da retrorrefletividade inicial e residual em sinalização horizontal viária para a geometrias de 15 m e a ABNT NBR 16307:2020, que estabelece os procedimentos para a avaliação da retrorrefletividade inicial e residual em sinalização horizontal viária para a geometria de 30 m. Ambas são determinadas utilizando um equipamento chamado de retrorrefletômetro, o qual deve ser configurado de acordo com a geometria analisada por cada norma. A norma ABNT NBR 14723:2020 determina que para o equipamento ser configurado para a geometria de 15m, o ângulo de observação deve ser de  $1,5^\circ$  e ângulo de incidência de  $86,5^\circ$ . Já a norma ABNT NBR 16307:2020 determina que para o equipamento ser configurado para a geometria de 30 m, o ângulo de observação deve ser de  $1,05^\circ$  e ângulo de incidência de  $88,76^\circ$ . A Figura 6 exemplifica a relação entre as distâncias e o ângulo de retorno aos olhos do motorista para cada norma. Os retrorrefletômetros comerciais atuais são configurados para realizar as medidas de retrorrefletividade considerando estes parâmetros.

Figura 6: Avaliação da retrorrefletividade para diferentes geometrias, a) geometria de 15m, adotada no Brasil; b) geometria de 30m.



Fonte: Adaptado da ANTT, 2017

Para a correta avaliação da retrorrefletividade das sinalizações horizontais viária, ambas as normas determinam que o equipamento deve ser posicionado sobre a superfície da demarcação a ser avaliada, seguindo a orientação indicada pelo aparelho de acordo com o sentido do tráfego veicular. Para garantir a correta avaliação da retrorrefletividade, a superfície deve estar seca e livre de pedras ou quaisquer resíduos que possam comprometer a estabilidade do equipamento ou a vedação adequada do compartimento óptico, evitando a entrada de luz externa ou solar durante a medição. (NBR 14723, 2020; 16307, 2020).

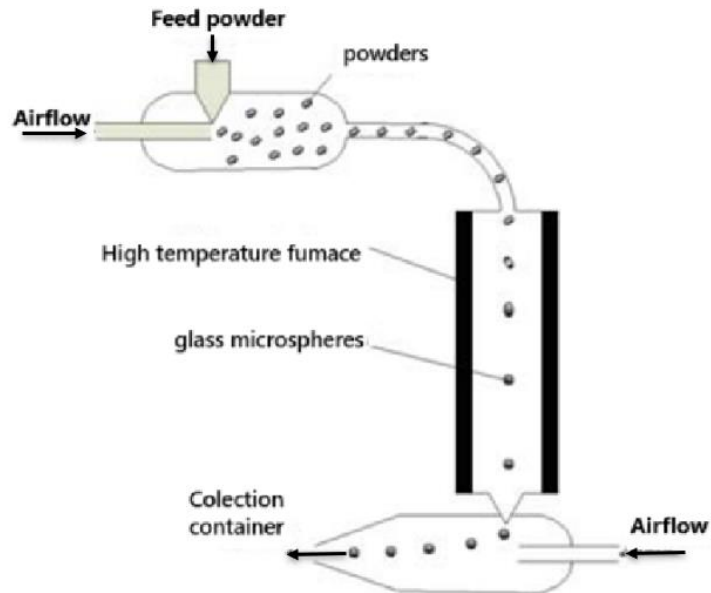
### **Métodos de fabricação de microesferas de vidro**

Existem diferentes métodos de fabricação de microesferas de vidro sólidas, como: Flutuação de pós, esferoidização por chama, plasma spray e queda gravitacional. Abaixo estão descritos estes métodos um pouco mais em detalhes.

#### **2.1.4 Flutuação de pós**

No método de flutuação de pós, partículas vítreas são adicionadas com o auxílio de uma espátula vibratória em um fluxo de ar de alta pressão para o interior do forno de alta temperatura, em que o vidro flutua e reduz sua viscosidade permitindo que as tensões superficiais o tornem esférico, antes de atingir o fundo do forno, onde são insufladas por outro fluxo de ar que conduz as partículas até o recipiente de coleta. A Figura 7 ilustra, esquematicamente, o processo de flutuação dos pós utilizado por Tong *et al.* (2009), que produziu microesferas de vidro com diâmetro entre 1 e 30  $\mu m$ , utilizando um forno de alta temperatura à 1600°C e o fluxo de ar de alta pressão no fundo do forno.

Figura 7: Representação do método de flutuação de pós.

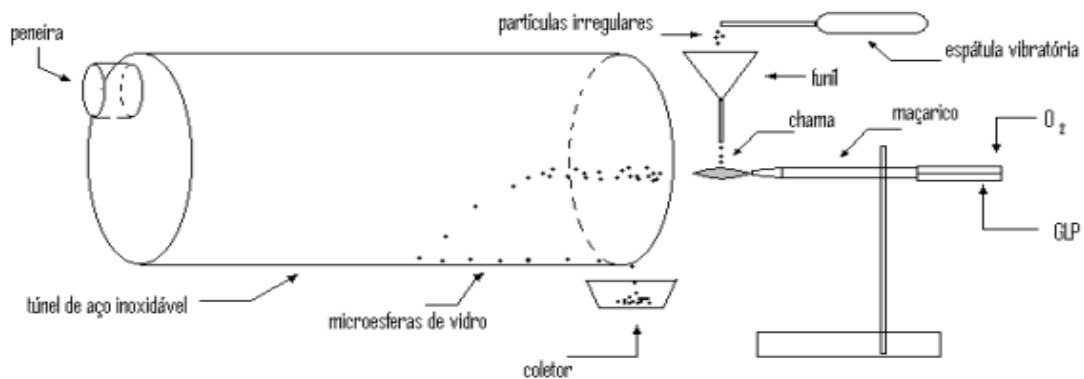


Fonte: Adaptado de Tong *et al.* (2009).

### 2.1.5 Esferoidização por chama

A esferoidização por chama ocorre quando partículas vítreas irregulares são depositadas no centro de uma chama com pressão suficiente para lançar essas partículas e temperatura o suficiente para reduzir a viscosidade do vidro, permitindo que as tensões superficiais as tornem esféricas. Barros Filho (2012) produziu microesferas de vidro com diâmetro médio de  $116 \mu\text{m}$ , depositando as partículas de vidro com auxílio de uma espátula vibratória e um funil sobre a chama de um maçarico utilizando uma mistura de  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$  de combustível (gás GLP) e  $2,5 \text{ kgf/cm}^2$  comburente ( $\text{O}_2$ ). As partículas foram coletadas em um tubo de aço inoxidável conforme representação dada na Figura 8.

Figura 8: Representação do aparato experimental utilizado para obtenção de microesferas pelo método de esferoidização por chama.

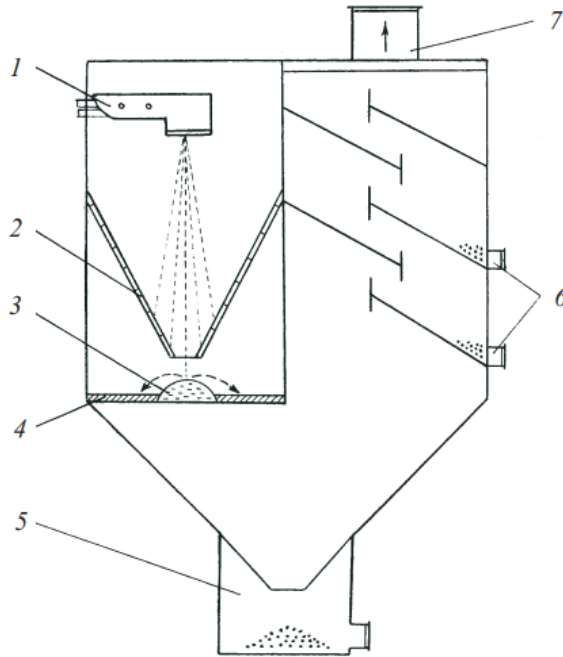


Fonte: Barros Filho, 2012

### Plasma spray

No método de Plasma spray, descrito por *Bessmertnyi et al.* (2001), a produção de microesferas de vidro é feita por meio da dispersão do vidro fundido através de um jato de gás. Após expelir as gotículas de vidro fundido, as mesmas tornam-se esféricas, devido a tensão superficial. O método proposto consiste em sete etapas, a Figura 9 apresenta o esquema do equipamento utilizado e suas etapas. As partículas irregulares de vidro são inseridas automaticamente no queimador de plasma e são submetidas à alta temperatura. Após sua fusão, é injetado o gás formador de plasma e as microesferas se formam quando expelidas. Durante a queda, elas esfriam parcialmente enquanto se deslocam ao longo do cone refratário e terminam de resfriar ao entrar em contato com um hemisfério metálico resfriado por água. Após resfriar, as partículas passam por uma peneira vibratória, que separa as microesferas das partículas irregulares. As microesferas de diâmetro superior a 630  $\mu\text{m}$  são coletadas em um recipiente no fundo do aparato, enquanto as microesferas com diâmetro inferior a 630  $\mu\text{m}$  são insufladas por uma tubulação e coletadas em recipientes distintos. No processo, o gás formador de plasma é removido por meio de ventilação forçada. Com esse método, os autores fabricaram microesferas de vidro com diâmetros variando entre 320  $\mu\text{m}$  e 1250  $\mu\text{m}$ .

Figura 9: Representação do esquema de produção de microesfera utilizando Plasma Spray.

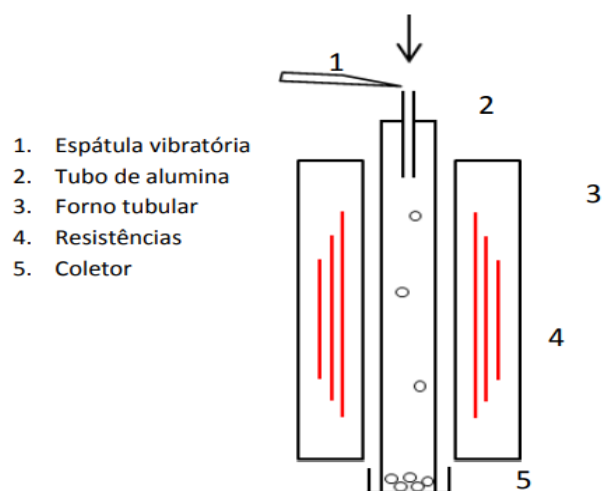


Fonte: Bessmertnyi *et al.*, 2001

### 2.1.6 Queda gravitacional

O método de queda gravitacional consiste na deposição de partículas vítreas com o auxílio de uma espátula vibratória e um colimador em um tubo de alumina por dentro de um forno tubular. Devido à alta temperatura, a viscosidade do vidro diminui e as tensões superficiais o tornam esférico durante a queda livre. A coleta é realizada na parte inferior do forno. Souza (2015) foi capaz de produzir microesferas com diâmetro médio de 93  $\mu\text{m}$  a uma temperatura de 1420°C utilizando o método esquematizado na Figura 10.

Figura 10: Representação do aparato experimental utilizado na obtenção de microesferas vítreas.

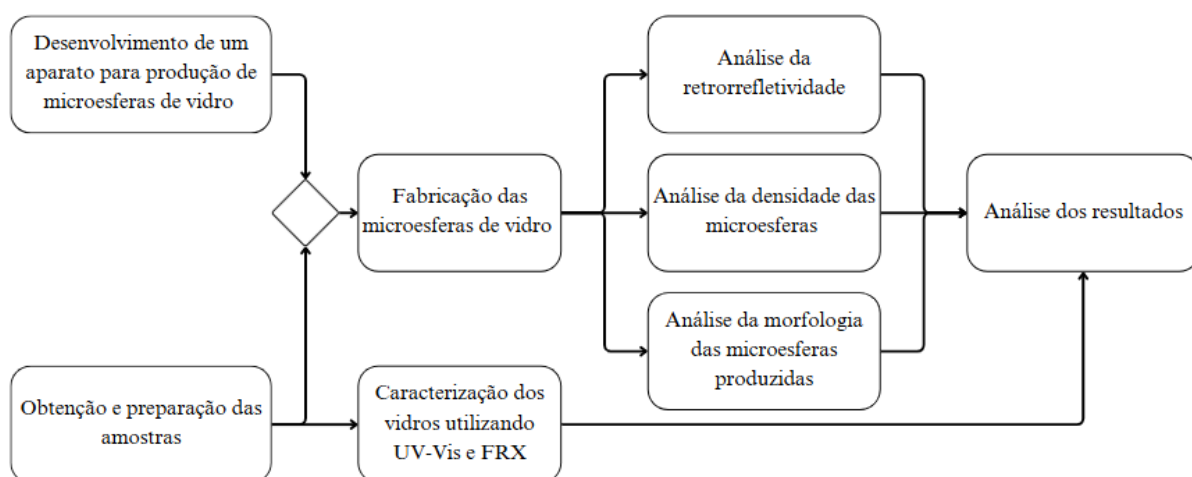


Fonte: Souza, 2015

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A sequência metodológica do presente trabalho encontra-se no fluxograma da Figura 11 onde cada etapa está descrita em detalhes a seguir. De forma resumida, paralelamente ao desenvolvimento do aparato, foram usados vidros de garrafas recicladas incolores, os quais foram caracterizados do ponto de vista de composição e transparência óptica visando satisfazer a norma NBR 16184-2021. Após, as microesferas foram fabricadas com o aparato desenvolvido e estas foram caracterizadas do ponto de vista granulométrico e morfológico. Além disso, as microesferas foram caracterizadas quanto a densidade e retrorrefletividade. Os detalhes de cada etapa estão melhor descritos abaixo.

Figura 11: Fluxograma resumindo o andamento das atividades



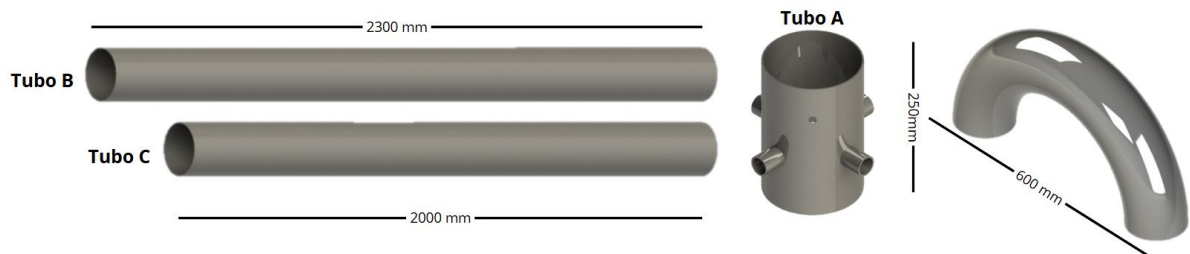
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

#### **Desenvolvimento do aparato vertical para produção de microesferas de vidro**

Para produzir as microesferas do Tipo-IIA, foram desenvolvidos diversos protótipos de aparato, sendo que aquele que se mostrou mais eficiente foi o chamado método de chama vertical. Como descrito na revisão bibliográfica, de forma geral, o método de chama vertical consiste em uma chama orientada perpendicularmente ao solo, no qual, quando colocados os cacos de vidro de dimensões apropriadas sobre a chama, estes são acelerados verticalmente, sendo posteriormente coletadas as partículas de alguma forma. Este método se mostrou mais apropriado que outros uma vez que o tempo de permanência das partículas na chama é

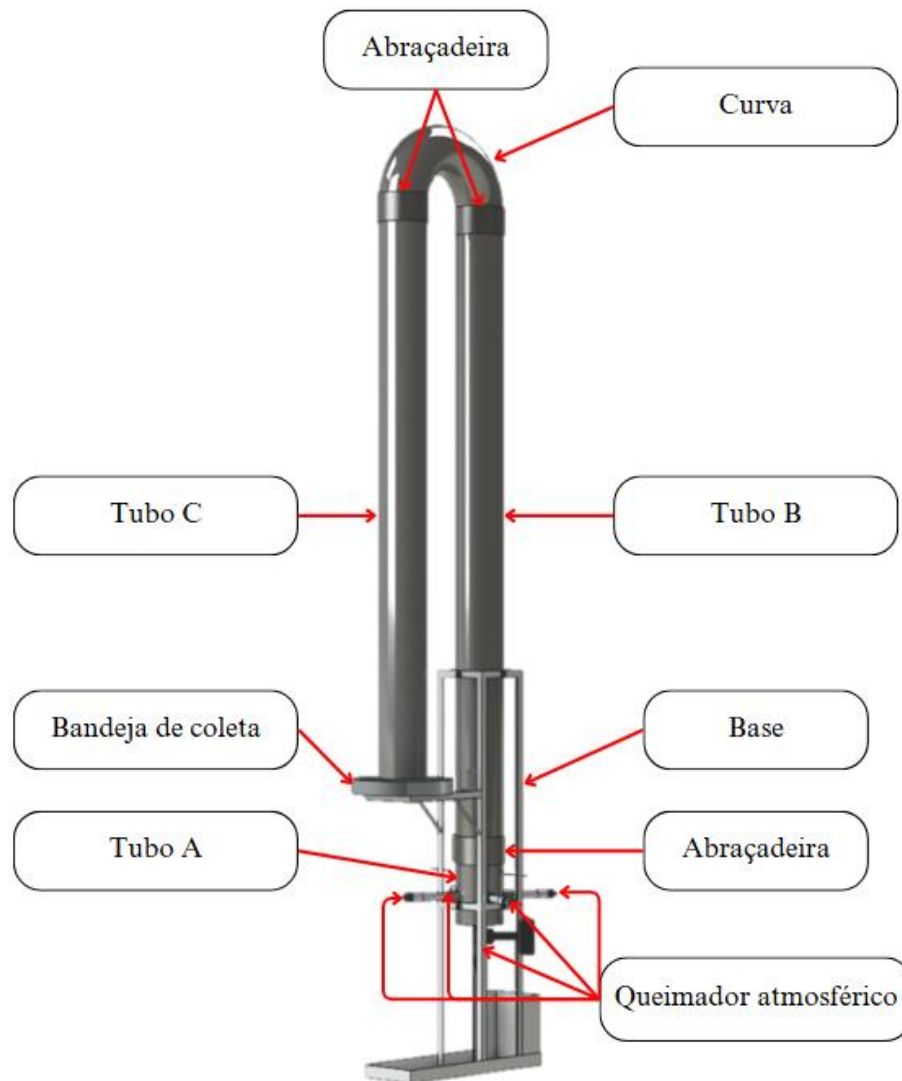
aumentado, propiciando a formação de microesferas de vidro de diâmetro maior, como por exemplo, microesferas de 500  $\mu\text{m}$ . De forma mais específica, para o desenvolvimento deste método, foram utilizados três tubos de aço inoxidável com paredes de 3 mm de espessura e diâmetro interno de 162 mm, assim como uma curva de 180° (em U) de aço inoxidável feita com um tubo com as mesmas especificações, conforme pode ser observado na figura 12. No Tubo A, que possui 250 mm de comprimento, foram soldados os bocais de fixação para adicionar quatro queimadores atmosféricos; o Tubo B, com 2300 mm de comprimento, e o Tubo C, com 2000 mm de comprimento, complementam o aparato formando um equipamento final em um formato de U invertido. Um esquema do aparato final está mostrado na Figura 13.

Figura 12: Modelo esquemático dos componentes do aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Figura 13: Modelo esquemático do aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Para união das seções foram utilizadas três abraçadeiras, as quais foram confeccionadas soldando duas barras chatas de 50 mm, conformando as mesmas no formato desejado (Figura 14). Para a fixação das abraçadeiras foram utilizadas duas partes de barra roscada com diâmetro de 12,7 mm e quatro porcas sextavadas compatíveis. Para suportar o equipamento, foi desenvolvido uma estrutura de cantoneiras metálicas de 25,4 mm.

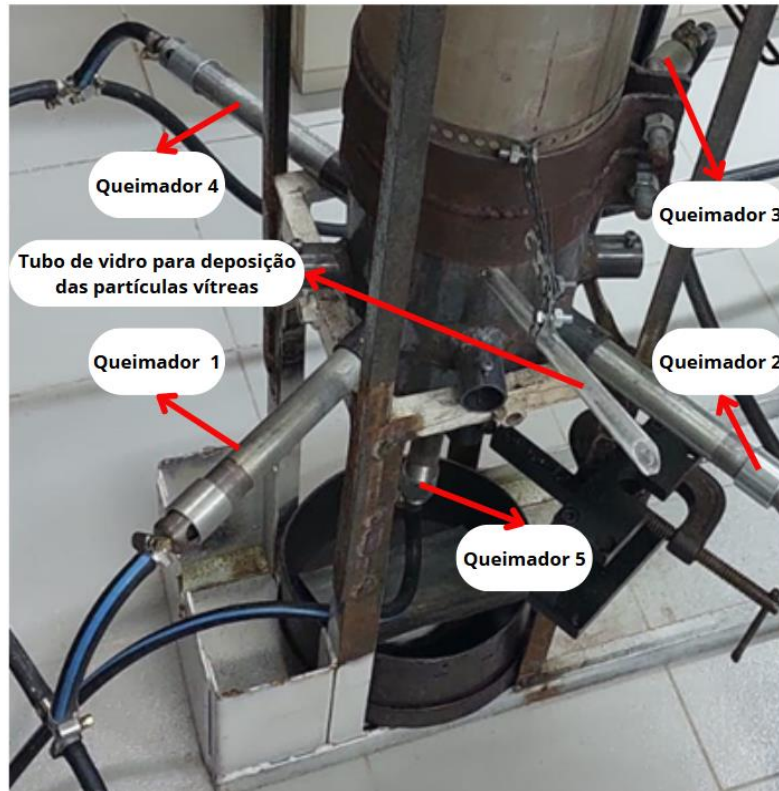
Figura 14: Modelo esquemático das abraçadeiras fabricadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Para finalizar o aparato, foi adicionado um quinto queimador atmosférico, de baixo pra cima, alinhado ao eixo central do tubo vertical. Os quatro queimadores dispostos horizontalmente foram conectados a um único manômetro e abastecidos com  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  de GLP, enquanto o queimador vertical foi abastecido com  $0,5 \text{ kgf/cm}^2$  de GLP por um segundo manômetro. Para inserir as partículas vítreas no equipamento, foi feito um furo com 13 mm de diâmetro na parede do Tubo A, posicionado a 70 mm da face superior. Através de um suporte, um tubo de vidro foi acoplado ao furo, servindo como alimentador das partículas vítreas ao equipamento. A Figura 15 mostra detalhes do aparato, onde pode ser observado os cinco queimadores, bem como o alimentador para deposição dos cacos de vidro. Nesta configuração, as partículas quando em contato com a chama vertical gerada pelos 5 queimadores, são aquecidas a uma temperatura da ordem de  $1000^\circ \text{C}$  e são projetadas para cima, contornando o tubo em U, sendo armazenadas em um coletor posicionado ao final do caminho em U. O tempo de permanência e a temperatura permitem gerar microesferas com diâmetros que podem ser classificados como sendo microesferas dos Tipos IB e IIA.

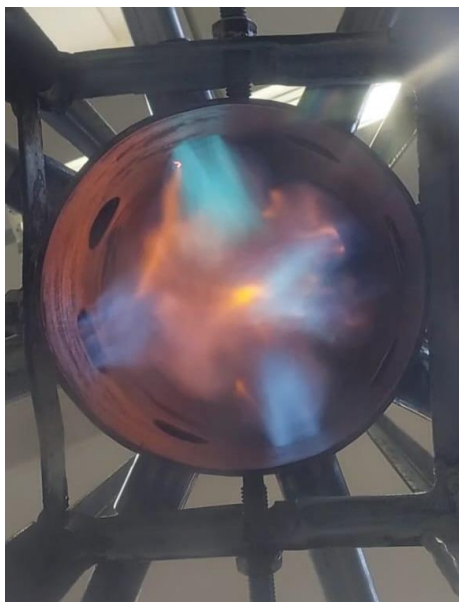
Figura 15: Sistema de deposição de microesferas no aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

A Figura 16 mostra o aparato com quatro queimadores (1, 2, 3 e 4) ligados (em um mesmo plano). O queimador 5 foi retirado para facilitar a visualização.

Figura 16: Vista de baixo pra cima dos quatro queimadores ligados em um plano comum



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

### 3.1.1 Preparação das amostras para fabricação das microesferas

Para a produção das microesferas de vidro a partir de vidro reciclado, foram coletadas garrafas de cerveja incolores (Figura 17). A escolha de abordar os vidros incolores se dá pelo fato de a norma NBR 16184:2021 determinar que microesferas utilizadas na sinalização horizontal viária devem ser incolores. Buscando uma maior homogeneidade nas amostras, optou-se por utilizar garrafas de mesma marca e quando possível de mesmo lote. As garrafas coletadas foram então limpas com água corrente e sabão neutro e posteriormente secas em estufa a 105°C por 24 horas. Após a limpeza as garrafas passaram pelo processo de moagem.

Figura 17: Garrafas obtidas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Para realizar a moagem, foi utilizado uma massa de aproximadamente 3 kg de vidro incolor, o qual foi moído durante 5 horas. O processo foi realizado utilizando o moinho de bolas de fabricação caseira, configurado com uma velocidade de rotação de 0,18 m/s e utilizando 15 esferas de alumina de diâmetros variando entre 46,6 mm e 50,5 mm. A Figura 18 apresenta o moinho de bolas e esferas de alumina utilizadas.

Figura 18: a) Moinho de bolas b) Esferas de alumina



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Após a moagem, as partículas foram separadas com o auxílio de peneiras granulométricas da marca Bronzinox (Figura 19), sendo separadas para a produção das microesferas aquelas partículas com granulometria entre 212  $\mu\text{m}$  e 850  $\mu\text{m}$ , faixa esta correspondente a granulometria das microesferas classificadas como sendo do Tipo-IIA.

Figura 19: Peneiras granulométricas utilizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

A Tabela 1 apresenta as faixas granulométricas analisadas, visando a produção de microesferas do tipo II-A. Esta separação foi importante para poder avaliar a qualidade das microesferas por faixa granulométrica, permitindo estimar as limitações do aparato desenvolvido. Após a separação granulométrica, as partículas de vidro foram armazenadas em recipientes adequados, facilitando a separação das amostras conforme a necessidade de fabricação.

Tabela 1: Disposição das peneiras utilizadas.

<b>Peneira Retida (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Peneira Passante (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
212	300
300	425
425	500
500	600
600	710
710	850

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

### **Caracterização das amostras.**

Foram realizadas as seguintes caracterizações das amostras:

- Fluorescência de Raio-X;
- Densidade (ABNT NBR 16184: 2021);
- UV-VIS (ABNT NBR 14910: 2002).

#### **3.1.2 Fluorescência de Raio-X (FRX)**

Para caracterizar a composição dos vidros reciclados estudados, foi seccionado um pedaço de garrafa de aproximadamente 20 mm por 20 mm. A análise por fluorescência de raio-X foi realizada na Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete, através do equipamento *PANalytical Epsilon 1*®. A Figura 20 mostra uma imagem do equipamento utilizado. Este equipamento permite identificar os elementos químicos presentes nos vidros, com número atômico superior a 11. Para a aplicação desenvolvida neste trabalho, o FRX permite avaliar se a quantidade de sílica presente nas garrafas recicladas, bem como a presença de elementos tóxicos como o arsênio, antimônio e chumbo, estão em conformidade com os requisitos descritos na norma que regulamenta as microesferas (norma NBR 16184:2021).

Figura 20: Equipamento FRX para avaliar a composição dos vidros



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

### 3.1.3 Espectrofotometria UV-VIS

Embora o vidro usado seja incolor de origem, este foi avaliado por espectrofotometria visando observar quão transparente o vidro é no espectro visível, entre 400 e 700 nm. Para isso, foi utilizado o espectrofotômetro da marca Bel Engineering®, modelo UV-M51, apresentado na Figura 21. A espectrofotometria permite entender a interação da luz com os diferentes materiais, sendo possível analisar a absorção e transmitância dos mesmos para comprimentos de onda que vão do UV (190 nm) ao infravermelho (1100 nm) conforme especificação para este equipamento.

Figura 21: Espectrofotômetro de UV-VIS.



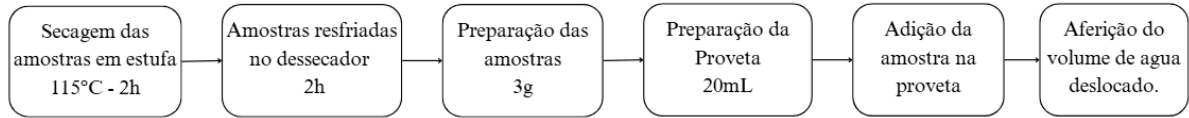
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

A análise por espectroscopia na região visível (VIS) foi realizada utilizando uma seção quadrada de garrafa de 15 mm x 15 mm; a transmitância foi aferida variando o comprimento de onda em 1nm na faixa visível do espectro eletromagnético, partindo de 400 nm até 700 nm.

### 3.1.4 Densidade

A determinação da densidade de massa das microesferas foi realizada utilizando o método de deslocamento de volume, seguindo os passos representados na Figura 22.

Figura 22: Sequência para análise da densidade das microesferas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

As amostras ficaram em estufa a 115 °C durante 2 horas, a fim de retirar toda umidade; após foram resfriadas em dessecador à temperatura ambiente durante 2 h. Após, foram separadas amostras com 3g de massa, medida em balança analítica. Para a realização das medidas, foram utilizadas provetas de 25 ml, sendo adicionadas a estas provetas 20 mL de água. Logo após, cuidadosamente foi adicionada a massa de 3 g de microesferas na proveta. Realizando uma agitação lenta da proveta, foram retiradas as bolhas de ar entre as microesferas, para que não houvesse influência no volume de água deslocada. Com o auxílio de uma pipeta graduada de 0,01 mL, retirou-se a água (volume deslocado pelas microesferas) até a marca dos 20 mL iniciais. Tendo a massa das microesferas (3g) e o volume de líquido deslocado (retirados pela pipeta até os 20 ml), a densidade (D) foi avaliada através da seguinte equação:

$$D = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde:

$D$  – É a densidade da massa, expressa em gramas por mililitros (g/mL) ou gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  – É a massa da amostra, expressa em gramas (g);

$V$  – É o volume da amostra, expresso em mililitros (mL).

As medidas foram realizadas em triplicata, tomando o valor médio e o desvio padrão.

### 3.1.5 Análise Morfológica e granulométrica

Para caracterizar a morfologia (aparência) das microesferas produzidas, visando a validação do método desenvolvido, e também a distribuição granulométrica (dimensões), foi utilizado o microscópio óptico da marca Laborana, modelo MTM-3030, considerando o modo transmissão, o qual mostrou-se mais adequado devido ao melhor contraste. Na Figura 23 pode ser observado o microscópio utilizado, o qual possui uma câmera CCD acoplada. Com o auxílio

do software IScapture®, as imagens podem ser capturadas pela CCD e analisadas. De forma mais específica, com a captura de imagens é possível quantificar a forma dos elementos gerados (esferas, cacos, geminadas e ovoides) bem como determinar o diâmetro das microesferas.

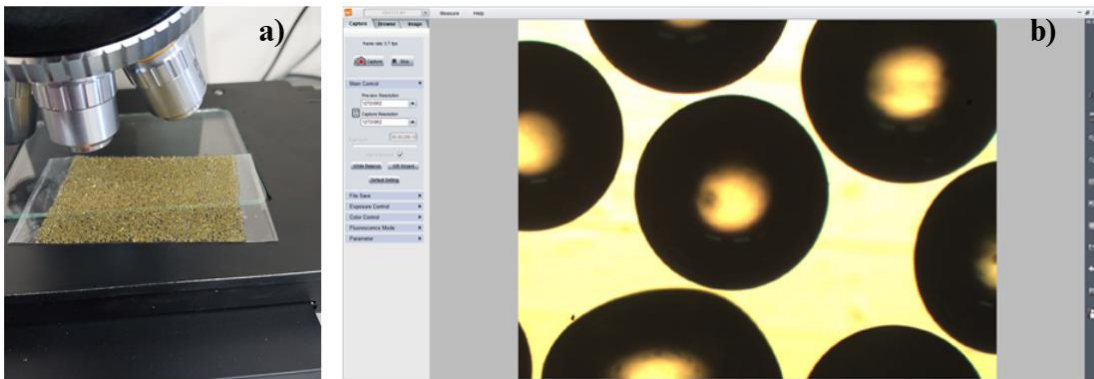
Figura 23: Microscópio óptico trinocular usado para avaliação morfológica e granulométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para as análises, pequenas quantidades de microesferas foram distribuídas sobre uma fita adesiva transparente e colocada sobre a platina do microscópio, evitando sobreposição entre as partículas, o que facilitou a observação individualizada. A análise classificou os elementos quanto à forma (esférica, ovoide, geminada ou fragmentada) e registrou-se seus diâmetros em planilhas Excel. Para o cálculo do diâmetro médio, foram considerados apenas os elementos perfeitamente esféricos. As medições de diâmetro permitiram determinar os valores médios, desvio padrão, mediana e percentis, fornecendo dados essenciais para a caracterização das microesferas e validação do processo de fabricação adotado. A figura 24 mostra detalhes das microesferas na fita adesiva, posicionadas na platina do microscópio, bem como uma imagem dos elementos gerados no processo de produção via software IScapture®.

Figura 24: a) Amostra preparada em fita adesiva; b) Imagem via software IsCapture®.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para avaliar o comportamento morfológico e granulométrico das partículas geradas, foi utilizado o conceito de tamanho de amostra ((VERMA; VERMA, 2020), (VIETTA FILHO et al., 2025)). Neste sentido, para que a quantificação seja confiável no que se refere a representatividade da amostra em relação a população estudada, de acordo com este conceito, a contagem de aproximadamente 400 partículas por faixa granulométrica representa estatisticamente o comportamento morfológico das microesferas geradas, com um nível de confiança de 95% e margem de erro de 5%.

### 3.1.6 Análise da Retrorrefletividade

A principal resposta no que diz respeito a qualidade das microesferas produzidas se dá através de medidas de retrorrefletividade, já que de fato, esta medida representa o efeito da luz dos faróis dos veículos interagindo com as microesferas e retornando para os olhos do motorista, amplificando a sinalização. Neste sentido, visando avaliar esta resposta, foi utilizado o equipamento retrorrefletômetro, modelo *Easylux* Clássico Horizontal©, representado na Figura 25. Este dispositivo permite a avaliação da retrorrefletividade (RL) noturna e da visibilidade diurna (Qd) nas geometrias de 15 e 30 metros.

Figura 25: Retrorrefletômetro Easylux utilizado nas medições de retrorrefletividade.

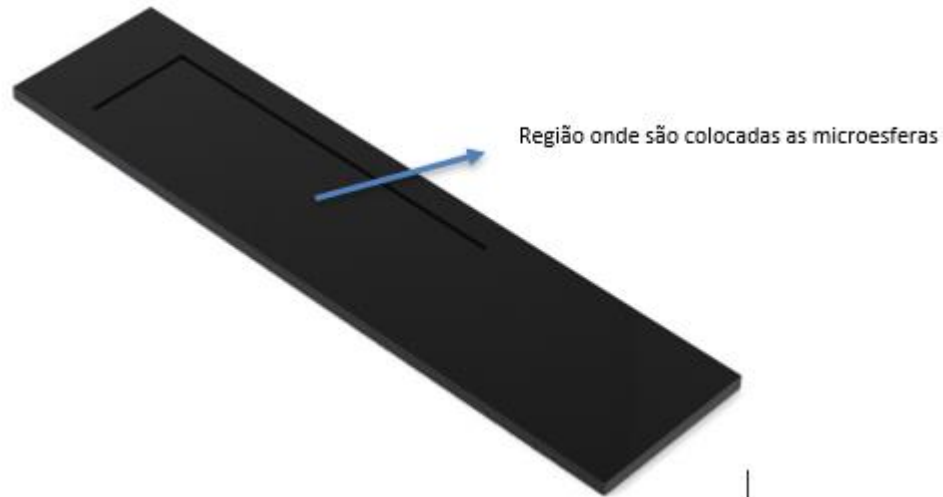


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

O retrorrefletômetro está em conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 14723:2020, assegurando a aderência aos padrões internacionais de sinalização rodoviária. No presente estudo, foram coletados exclusivamente os resultados obtidos para a geometria de 15 metros, uma vez que esta geometria é a adotada para a determinação do padrão mínimo de retrorrefletividade das microesferas pelos órgãos responsáveis pela normatização da sinalização viária no Brasil. Também, visando avaliar a qualidade das microesferas geradas, as medidas de retrorrefletividade para a geometria de 15m foram feitas no modo intrínseco, ou seja, sem considerar o efeito da tinta de sinalização. Mais em detalhes, para a realização das medidas, foi utilizada uma placa em fibras de média densidade (MDF) de fundo preto (sem tinta) com as dimensões adequadas ao retrorrefletômetro, com o objetivo de avaliar somente a retrorrefletividade devido a microesfera em si. A placa utilizada, onde foram posicionadas as microesferas, possui dimensões de 60,0 cm por 15,3 cm, corresponde à área total de contato do dispositivo de medição com o solo. Nesta placa existe uma área rebaixada (2mm) correspondente a área de medição do retrorrefletômetro (34 cm x 10 cm). Como já mencionado, toda a placa foi pintada de preto fosco com o objetivo de realizar medições das microesferas de forma isolada, ou seja, sem estar em contato com a tinta, com o intuito de avaliar exclusivamente a influência das microesferas nas medidas de retrorrefletividade. Esta escolha foi tomada com o intuito de evitar a interferência da tinta e de outros fatores nos resultados das medições, como o grau de ancoragem das microesferas na tinta. Para este estudo foi utilizado uma densidade de microesferas equivalente a  $100 \text{ g/m}^2$  (3,4 g) para cada granulometria. Foram realizadas cinco medidas de retrorrefletividade (para cada granulometria), variando a

distribuição das microesferas na área delimitada para análise por meio de pequenos movimentos, tomando assim o valor médio da retrorrefletividade com o seu respectivo desvio padrão. Um esquema desta placa utilizada está mostrado na Figura 26.

Figura 26: Placa preta utilizada para análise da retrorrefletividade das microesferas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Para qualificar os resultados obtidos através das medidas de retrorrefletividade das microesferas produzidas, foram também realizadas medidas em microesferas comerciais com granulometria semelhante, visando uma comparação entre ambas. Foram avaliadas 6 faixas granulométricas, descritas na tabela 2, para ambas as microesferas (comerciais e produzidas), considerando a densidade de microesferas constante e igual a 100 g/m<sup>2</sup>.

Tabela 2: Faixas granulométricas avaliadas neste trabalho.

<b>Faixa granulométrica (µm)</b>	
φ <sub>1</sub>	212 ≤ φ ≤ 300
φ <sub>2</sub>	300 ≤ φ ≤ 425
φ <sub>3</sub>	425 ≤ φ ≤ 500
φ <sub>4</sub>	500 ≤ φ ≤ 600
φ <sub>5</sub>	600 ≤ φ ≤ 710
φ <sub>6</sub>	710 ≤ φ ≤ 850

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são mostrados os resultados deste trabalho, visando principalmente a validação do método desenvolvido para a fabricação das microesferas e tendo como referência os critérios descritos na norma NBR 16184:2021. A tabela 3 mostra os principais critérios estabelecidos pela norma para as microesferas do Tipo-IIA.

Tabela 3: Critérios da norma brasileira NBR 16184:2021 para microesferas do Tipo-IIA.

<b>Microesferas do Tipo-IIA</b>			
Porcentagem em massa de SiO <sub>2</sub>	≥ 65%		
Elementos tóxicos (As, Pb, Sb)	Máximo 200 mg/kg		
Cor	Incolor		
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,4 ≤ d ≤ 2,6		
Morfologia	<b>Ovoides/geminadas</b> Máximo 20%	<b>cacos</b> Máximo 3%	<b>esféricas</b> ≥ 77%
Granulometria (φ)	250 μm ≤ φ ≤ 850 μm		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Também, para validar as microesferas do ponto de vista de retrorrefletividade, as microesferas produzidas foram comparadas com microesferas comerciais de mesmo tipo.

#### **Composição química e cor dos vidros reciclados utilizados**

Para avaliar a composição química no que se refere a porcentagem em massa de sílica presente nas garrafas recicladas bem como a quantidade de elementos tóxicos, foi utilizado a técnica de Fluorescência de raios X, conforme descrito na metodologia. Foram avaliados três vidros, de diferentes garrafas incolores, e foram tomados o valor médio e o desvio padrão. Os resultados estão mostrados na tabela 4.

Tabela 4: Composição química dos vidros utilizados na produção das microesferas.

<b>Composição</b>	<b>Incolor</b>
SiO <sub>2</sub>	73,1 ± 0,7
Na <sub>2</sub> O	5,3 ± 0,3
CaO	18,9 ± 0,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5 ± 0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25 ± 0,03
K <sub>2</sub> O	0,25 ± 0,04
Óxidos tóxicos	ND
Outros < 0,1%	0,8 ± 0,1
Total	100,00

ND = Não detectado

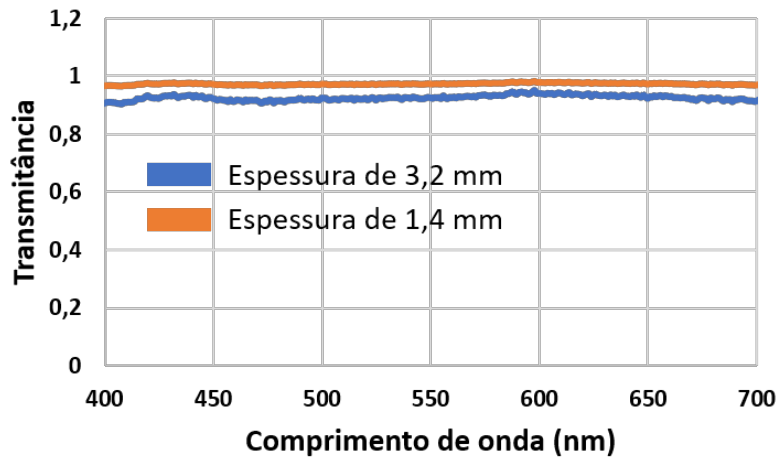
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os resultados mostram que os vidros utilizados são do tipo sódico-cálcicos e possuem um teor de sílica médio de 73,1%, que é maior que o teor mínimo especificado pela norma (65%). Com relação a presença de elementos tóxicos, não foram detectados qualquer óxido baseado nos elementos As, Pb e Sb. Desta forma, os vidros reciclados escolhidos neste trabalho podem ser utilizados como matéria prima na produção de microesferas vítreas utilizados na sinalização horizontal no que diz respeito a composição química.

Além da composição, um parâmetro descrito na norma diz respeito a coloração dos vidros. Este parâmetro é muito importante uma vez que vidros coloridos, em princípio, possuem absorção em faixas específicas da região visível do espectro, afetando desta forma a retrorrefletividade quando a luz dos faróis interagir com as microesferas. Para microesferas de diâmetro muito pequeno, como as caracterizadas por serem do Tipo-IB (VIETTA FILHO et al., 2025), foi mostrado que a coloração dos vidros não tem muita relevância, porém, microesferas do Tipo-IIA ainda estão sujeitas a esta avaliação. Neste sentido, embora tenha sido escolhido vidros reciclados incolores, para quantificar a coloração, foram avaliados os espectros de transmitância dos vidros reciclados na região visível do espectro eletromagnético, entre 400 e 700 nm, para duas espessuras de vidro diferentes: 3,2 mm e 1,4 mm. A espessura de 3,2 mm corresponde a espessura real do vidro utilizado. Já o espectro correspondente a espessura de 1,4 mm foi calculada visando aproximar o caminho máximo feito pela luz dentro de uma microesfera. A figura 27 mostra os resultados de um típico espectro dos vidros correspondentes. Como pode ser observado, o vidro pode ser considerado incolor, já que a transmitância se aproxima de 1 (100%) em todo o espectro visível. Mesmo para espessuras

maiores, como a de 3,2 mm, ainda assim o vidro possui transmitância superior a 90%, em todo o espectro visível.

Figura 27: Espectro de Transmitância em função do comprimento de onda dos vidros utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

### Densidade

A NBR 16184:2021 estabelece que a densidade das microesferas do tipo IIA utilizadas na sinalização horizontal seja entre  $2,4\text{g/cm}^3$  e  $2,6\text{g/cm}^3$ . Em geral, vidros sódico cálcicos, como os que são encontrados em garrafas recicladas, possuem densidades na faixa determinada pela norma. Por outro lado, uma vez produzida as microesferas e visando quantificar este parâmetro, que pode dar indícios de defeitos ocasionados por bolhas gasosas - diminuindo o valor da densidade -, foram realizadas medidas de densidade pelo método de deslocamento de volume, conforme descrito na metodologia. Foram realizadas seis medidas, considerando as faixas granulométricas compreendidas entre  $212\ \mu\text{m}$  e  $850\ \mu\text{m}$ . A tabela 5 mostra os resultados de densidade encontrados por faixa granulométrica.

Tabela 5: Densidade das microesferas produzidas.

Faixa granulométrica ( $\mu\text{m}$ )	Massa de microesferas (g)	Volume de Água (mL)	Volume do Conjunto (mL)	Volume Deslocado (mL)	Densidade (g/mL)
$710 \leq \varphi \leq 850$	3,0005	20,00	21,20	1,20	2,50
$600 \leq \varphi \leq 710$	3,0009	20,00	21,18	1,18	2,55
$500 \leq \varphi \leq 600$	3,0010	20,00	21,19	1,19	2,53
$425 \leq \varphi \leq 500$	3,0009	20,00	21,15	1,15	2,60
$300 \leq \varphi \leq 425$	3,0010	20,00	21,15	1,15	2,60
$212 \leq \varphi \leq 300$	3,0002	20,00	21,16	1,16	2,59

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Primeiramente pode-se observar que todas as densidades estão em conformidade com a norma, mostrando que os vidros estão aptos a serem utilizados na fabricação de microesferas. O valor médio encontrado foi de  $2,56 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ . O limite superior do valor encontrado está no limite máximo estabelecido em norma. Porém, a literatura mostra que valores altos de densidade (superiores a  $2,6 \text{ g/cm}^3$ ) estão associados a índices de refração do vidro mais altos (superiores a 1,5), valores estes que se refletem em uma maior retrorefletividade das microesferas (VIETTA FILHO et al., 2025; VASILIAUSKAS, VAITKUS 2020). Também pode ser observado na tabela 5 que o menor valor de densidade, ainda dentro do limite, ocorreu para microesferas de maior diâmetro. Esta pequena diminuição pode sugerir que microbolhas estejam presentes nas microesferas para este diâmetro. Tais microbolhas podem afetar a retrorefletividade, diminuindo a quantidade de luz que volta para os olhos dos motoristas já que as microbolhas alteram o caminho da luz dentro da microesfera.

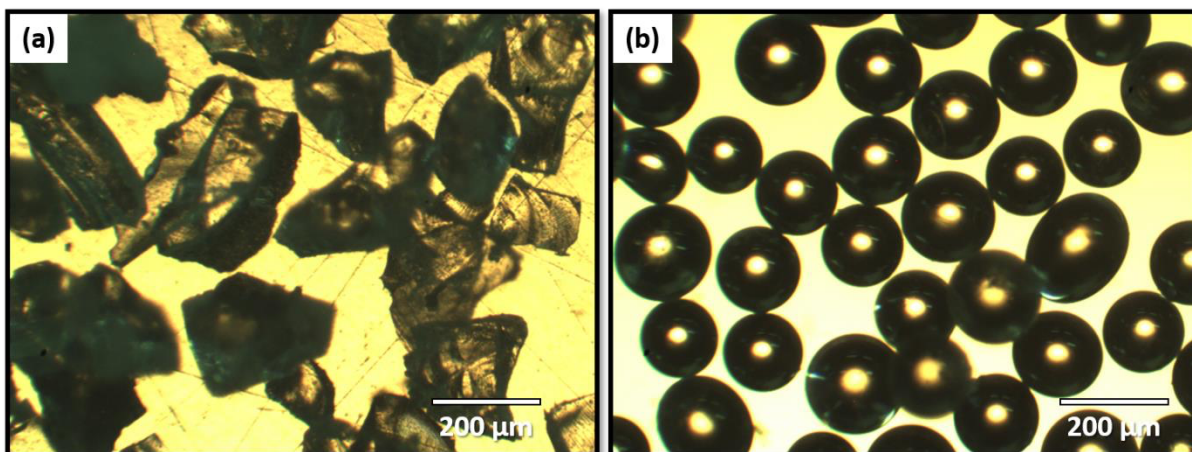
### **Análise Morfológica**

A morfologia, baseada numa determinada granulometria (que determinará o tipo de microesfera), junto com as medidas de retrorefletividade, é um dos dois parâmetros mais importantes no que se refere às microesferas. Enquanto o primeiro qualifica se o processo de produção de microesferas utilizado é consistente, identificando diferentes tipos de imperfeições nas microesferas produzidas, como microbolhas internas, partículas ovoides, geminadas e fragmentadas; o segundo, que depende do primeiro, fornece a resposta óptica da interação da luz dos faróis com as microesferas. Se a morfologia não é adequada, devido a presença de outros elementos que não são esféricos, o sinal de retroreflexão diminuirá uma vez que a retroreflexão ocorre exatamente pelo fato de a luz interagir com elementos esféricos. Então,

na análise morfológica, foi avaliada a eficiência de esferoidização das partículas de acordo com o aparato utilizado bem como as dimensões das amostras produzidas, buscando determinar a viabilidade de produção de microesferas que atendam as especificações da NBR-16184:2021. Nesta etapa, para que a comparação entre as retrorrefletividades das microesferas produzidas e comerciais seja adequada, as características morfológicas das microesferas comerciais também foram avaliadas.

A figura 28 mostra imagens de microscopia óptica da morfologia característica dos vidros antes e após o processo de esferoidização. Antes do processo, os vidros são considerados cacos, com características de elementos com forma laminada e pontiaguda. Após o processo de esferoidização, devido a temperatura e pressão da chama, se o processo é adequado, os cacos tomam a forma de esferas.

Figura 28: Geometria característica antes e após o processo de fabricação: (a) cacos e (b) microesferas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Conforme descrito na Tabela 3, no início deste capítulo, a norma NBR 16184:2021 estabelece critérios mínimos e máximos no que se refere a morfologia das partículas geradas no processo de produção de microesferas. A tabela 06 resume estes critérios.

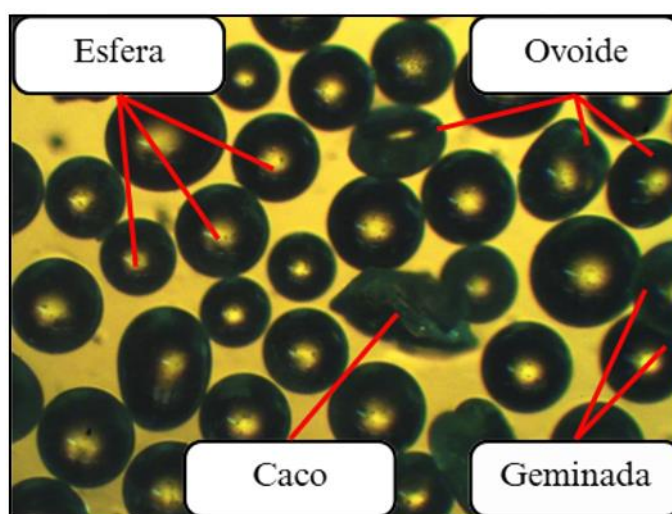
Tabela 6: Critérios descritos em norma associados a morfologia das microesferas.

Morfologia	Ovoides/geminadas	cacos	esféricas
	Máximo 20%	Máximo 3%	≥ 77%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

De fato, embora o ideal seria que todas as partículas fossem esféricas após o processo de produção, por mais que o processo esteja otimizado, algumas partículas sofrem colisões mudando a forma esférica para ovoide, algumas se fundem entre elas formando partículas geminadas e algumas não mudam a sua forma original, sendo caracterizadas como cacos. Por outro lado, um mínimo de 77% de microesferas deve ser considerado para que o processo esteja de acordo com a norma. A Figura 29 mostra uma imagem dessas típicas morfologias geradas no processo de fabricação, onde estão destacados cada um dos formatos encontrados.

Figura 29 : Exemplos de defeitos presentes nas microesferas e vidro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Visando quantificar os elementos gerados no processo de produção descritos neste trabalho, bem como comparar com microesferas comercialmente disponíveis no mercado, a avaliação morfológica foi realizada por imagens de microscopia óptica, por faixa granulométrica. Esta avaliação visou buscar os limites, principalmente superiores, dos diâmetros capazes de serem fabricados, dentro de um contexto das microesferas classificadas como sendo do Tipo IIA.

#### 4.3.1- Faixas granulométricas e suas características morfológicas

Como descrito anteriormente, a morfologia das microesferas foi avaliada por faixa granulométrica ( $\phi$ ), para ambas as microesferas: fabricadas e comerciais. Neste sentido, a qualidade das microesferas se baseou no que a norma estipula do ponto de vista de esferas, cacos, ovoides e geminadas. Para cada faixa granulométrica descrita na metodologia, foram

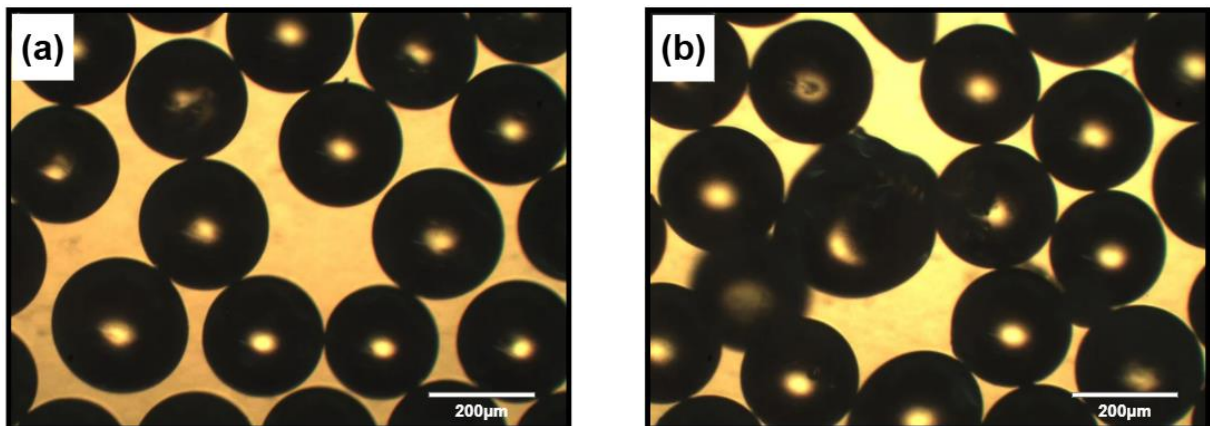
avaliadas em torno de 400 elementos, por imagem de microscopia óptica. Nos próximos subitens são mostradas, para ambas as microesferas, imagens características de microscopia óptica, as características granulométricas e morfológicas. Em particular, a avaliação das características granulométricas foi realizada a partir da frequência de partículas como função do diâmetro em um gráfico de colunas. Tradicionalmente, quando se assume que os dados seguem uma distribuição aproximadamente normal (gaussiana), utiliza-se a média aritmética como medida de tendência central e o desvio padrão ( $\sigma$ ) como medida de dispersão (VERMA; VERMA, 2020). Essa escolha é justificada pela simetria da distribuição gaussiana, na qual a média, a mediana e a moda coincidem, e, pela propriedade de que aproximadamente 68% dos valores encontram-se no intervalo definido por  $média \pm 1\sigma$ , 95% em  $média \pm 2\sigma$  e 99,7% em  $média \pm 3\sigma$ . Assim, o par média-desvio padrão fornece uma descrição compacta e interpretável da variabilidade dos dados em distribuições simétricas. Entretanto, em distribuições que não apresentam simetria ou que apresentam caudas longas (distribuições assimétricas ou com outliers (valores atípicos)), como as verificadas neste trabalho, a média pode ser fortemente influenciada por valores extremos, deixando de representar adequadamente o “centro” dos dados. Nesses casos, o uso do desvio padrão como medida de dispersão não é adequado, pois a suposição de simetria em torno da média deixa de ser válida. Uma alternativa mais robusta consiste no uso da mediana como medida de tendência central, em conjunto com os percentis como medida de dispersão. A mediana, definida como o valor que divide o conjunto ordenado em duas metades iguais, é menos sensível a valores extremos e fornece uma estimativa mais estável do centro em distribuições assimétricas (VERMA; VERMA, 2020). Já os percentis delimitam a posição relativa dos dados na distribuição: o percentil P é o valor abaixo do qual se encontram P% das observações. Em particular, os percentis 16% (P16) e 84% (P84) são comumente utilizados em análises estatísticas por sua correspondência aproximada ao intervalo de  $\pm 1\sigma$  em distribuições gaussianas. Esse intervalo contém cerca de 68% (84% - 16%) dos dados e, ao contrário do desvio padrão, não depende da hipótese de normalidade, ou seja, os percentis são não paramétricos - descrevem os dados como eles são, sem assumir modelo. Assim, enquanto em distribuições simétricas a representação  $média \pm$  desvio padrão é adequada e intuitiva, em distribuições não simétricas recomenda-se a utilização da mediana acompanhada dos percentis 16% e 84%. Essa escolha permite uma descrição estatística mais fiel, capaz de representar corretamente tanto o valor central quanto a dispersão real dos dados, sem introduzir vieses decorrentes da assimetria ou da presença de outliers. Sendo assim, neste trabalho, as medidas de granulometria são dadas pela mediana com incertezas assimétricas dadas pela

relação entre a mediana e os percentis P84 e P16. Como exemplo, se uma distribuição é não gaussiana, a mediana é 150  $\mu\text{m}$ , P84 é 160  $\mu\text{m}$  e P16 é 135  $\mu\text{m}$ , a representação para esta distribuição pode ser escrita como:  $(150 \pm_{15}^{10})\mu\text{m}$ .

#### 4.3.1.1- $\varphi_1 \rightarrow 212 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 300 \mu\text{m}$

A Figura 30 mostra típicos elementos observados por microscopia óptica das microesferas fabricadas e comerciais para a faixa granulométrica  $212 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 300 \mu\text{m}$ .

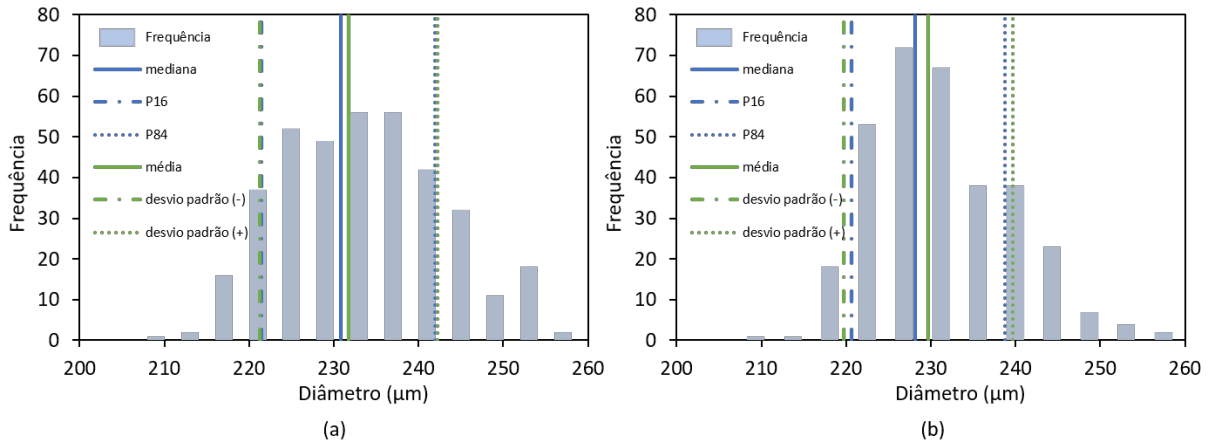
Figura 30: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 212 $\mu\text{m}$  e 300  $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

As imagens mostram uma boa homogeneidade no que se refere ao diâmetro das microesferas, tanto para as comerciais quanto para as fabricadas. Ainda, pode ser observado que, embora a imagem represente apenas algumas microesferas, a maioria dos elementos são de fato esféricos. A figura 31 mostra a distribuição granulométrica – frequência de ocorrência de partículas esféricas para  $\varphi_1$  - para ambos os casos, fabricada e comercial. Os valores de diâmetro são definidos pelo corte, após um incremento a partir do valor mínimo de diâmetro encontrado. Neste gráfico são mostrados os valores médios, desvios padrão, mediana e percentis 16% e 84%. Para este caso, como a distribuição tende a ser mais simétrica, os valores médio e mediana são semelhantes, bem como os desvios padrão e os percentis, principalmente para o caso das microesferas fabricadas.

Figura 31: Distribuição granulométrica para  $\phi_1$ : (a) fabricada, (b) comercial



Para facilitar a visualização quanto a quantificação destes dados, a tabela 7 mostra os valores de média, desvio padrão, mediana e percentis 16% e 84%, bem como a representação final, para as microesferas fabricadas e comerciais.

Tabela 7: Distribuição granulométrica para  $\phi_1$

	Média ( $\mu\text{m}$ )	desvio padrão ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	P16 ( $\mu\text{m}$ )	P84 ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )
Fabricada	232	$\pm 11$	$232 \pm 11$	231	222	233	$231 \pm_9^{11}$
Comercial	231	$\pm 9$	$231 \pm 9$	228	221	239	$228 \pm_7^{11}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Como pode ser observado, tanto as microesferas comerciais quanto as fabricadas se encontram com um valor médio semelhante, em torno de 230  $\mu\text{m}$ , e dentro da faixa granulométrica definida pelas peneiras. Esta semelhança é muito importante quando for realizada a avaliação da retrorefletividade do ponto de vista comparativo uma vez que a dispersão entre elas é muito baixa. A mesma semelhança pode ser vista para ambas as microesferas no que diz respeito às medianas e aos intervalos interpercentílicos centrais, dado pelos 68% das partículas compreendidas entre P16 e P84. Para as próximas granulometrias, será representado apenas a tabela das distribuições granulométricas para os casos das microesferas fabricadas e comerciais considerando os dados mais representativos para este trabalho, que são as medianas com as suas incertezas assimétricas, relacionadas a P16 e P84.

Por outro lado, a tabela 8 mostra uma quantificação das características morfológicas dentro desta faixa granulométrica, para ambas as microesferas: fabricadas e comerciais. Como descrito na metodologia, foi usado uma margem de erro de 5% conforme os critérios utilizados para o tamanho de amostra. Como pode ser observado, ambas as microesferas atendem aos

critérios mínimos estabelecidos em norma, critérios estes colocados na coluna NBR 16184:2021 da tabela. Mais do que isso, as características morfológicas das microesferas fabricadas estão bem superiores aos mínimos valores descritos na norma, o que demonstra que o processo de produção é excelente para esta faixa granulométrica.

Tabela 8: Características morfológicas das microesferas para  $212 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 300 \mu\text{m}$ .

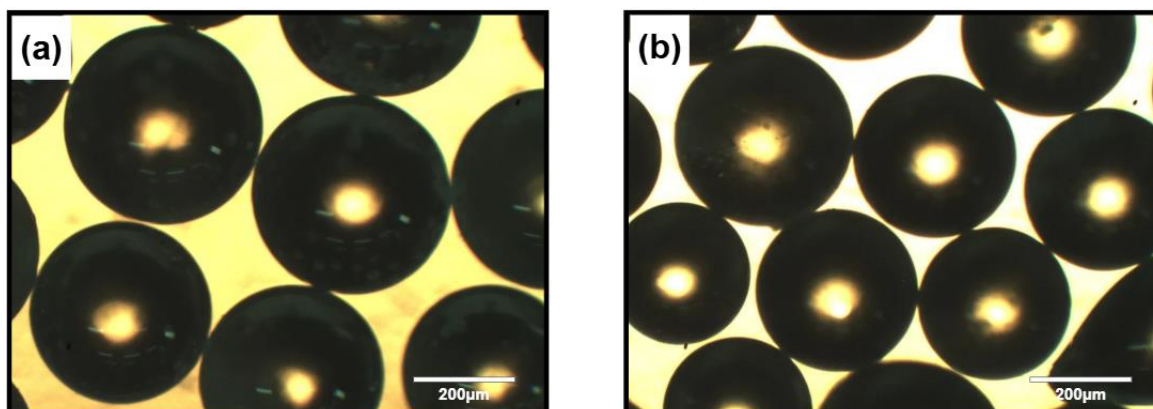
		$\varphi_1$		
		Fabricada	Comercial	NBR 16184:2021
<b>Morfologia (em %)</b>	Esferas	$93 \pm 5$	$81 \pm 4$	$\geq 77\%$
	Ovoides	$4,0 \pm 0,2$	$11,1 \pm 0,4$	Até 20%
	Geminadas	$1,5 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,2$	
	Cacos	$0,9 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$	Até 3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 4.3.1.2- $\varphi_2 \rightarrow 300 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 425 \mu\text{m}$

A Figura 32 mostra os típicos elementos observados por microscopia óptica das microesferas fabricadas e comerciais para a faixa granulométrica entre  $300 \mu\text{m}$  e  $425 \mu\text{m}$ . Para este caso, também as imagens mostram uma boa homogeneidade no que se refere ao diâmetro das microesferas, para ambas as microesferas, bem como uma alta taxa de elementos esféricos.

Figura 32: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre  $300\mu\text{m}$  e  $425 \mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 9 mostra a quantificação da distribuição granulométrica ( $\varphi_2$ ) para ambos os casos, fabricada e comercial. Como pode ser observado, embora exista uma pequena diferença

na mediana entre elas (em torno de 8%), ambas estão dentro da faixa granulométrica definida pelas peneiras.

Tabela 9: Distribuição granulométrica para  $\varphi_2$

	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	P16 ( $\mu\text{m}$ )	P84 ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )
Fabricada	372	339	391	$372 \pm_{33}^{19}$
Comercial	344	312	391	$344 \pm_{32}^{47}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 10 mostra a quantificação das características morfológicas da faixa granulométrica  $\varphi_2$ , para ambas as microesferas. Como pode ser observado, as microesferas fabricadas neste trabalho atendem aos critérios mínimos estabelecidos em norma. Por outro lado, para o caso das microesferas comerciais, foi observado uma quantidade de cacos superior ao estabelecido em norma, o que pode influenciar nas medidas de retrorrefletividade.

Tabela 10: Características morfológicas das microesferas para  $300 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 425 \mu\text{m}$ .

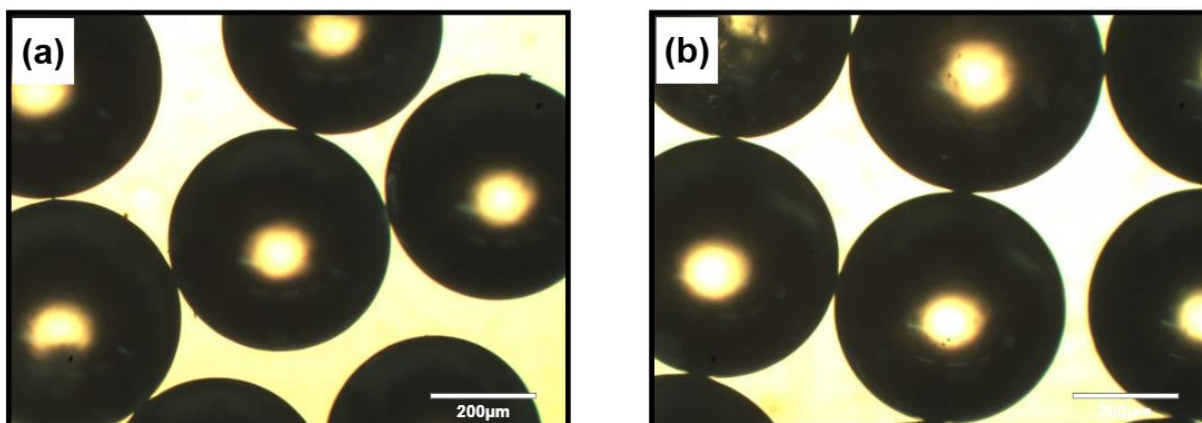
	$\varphi_2$			NBR 16184:2021
		Fabricada	Comercial	
<b>Morfologia (em %)</b>	Esferas	$94 \pm 5$	$80 \pm 4$	$\geq 77\%$
	Ovoides	$5,0 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,4$	Até 20%
	Geminadas	$0,8 \pm 0,1$	$7,6 \pm 0,4$	
	Cacos	$0,9 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,2$	Até 3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 4.3.1.3- $\varphi_3 \rightarrow 425 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 500 \mu\text{m}$

A Figura 33 mostra os típicos elementos observados por microscopia óptica das microesferas fabricadas e comerciais para a faixa granulométrica entre  $425 \mu\text{m}$  e  $500 \mu\text{m}$ . Para este caso, também as imagens mostram uma boa homogeneidade no que se refere ao diâmetro das microesferas, para ambas as microesferas, bem como uma alta taxa de elementos esféricos.

Figura 33: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 425 $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 11 mostra a quantificação da distribuição granulométrica ( $\phi_3$ ) para ambos os casos, fabricada e comercial. Para este caso, as faixas granulométricas são muito semelhantes e dentro da faixa definida pelas peneiras granulométricas.

Tabela 11: Distribuição granulométrica para  $\phi_3$

	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	P16 ( $\mu\text{m}$ )	P84 ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )
Fabricada	454	431	483	$454 \pm_{23}^{29}$
Comercial	446	430	467	$446 \pm_{16}^{21}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 12 mostra a quantificação das características morfológicas da faixa granulométrica  $\phi_3$ , para ambas as microesferas. As microesferas fabricadas novamente atendem aos critérios mínimos estabelecidos em norma. Por outro lado, para o caso das microesferas comerciais, para esta faixa granulométrica, foi observado uma quantidade de ovoides/geminadas bem como a quantidade de microesferas no limite estabelecido em norma, considerando a margem de erro.

Tabela 12: Características morfológicas das microesferas para  $425 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 500 \mu\text{m}$ .

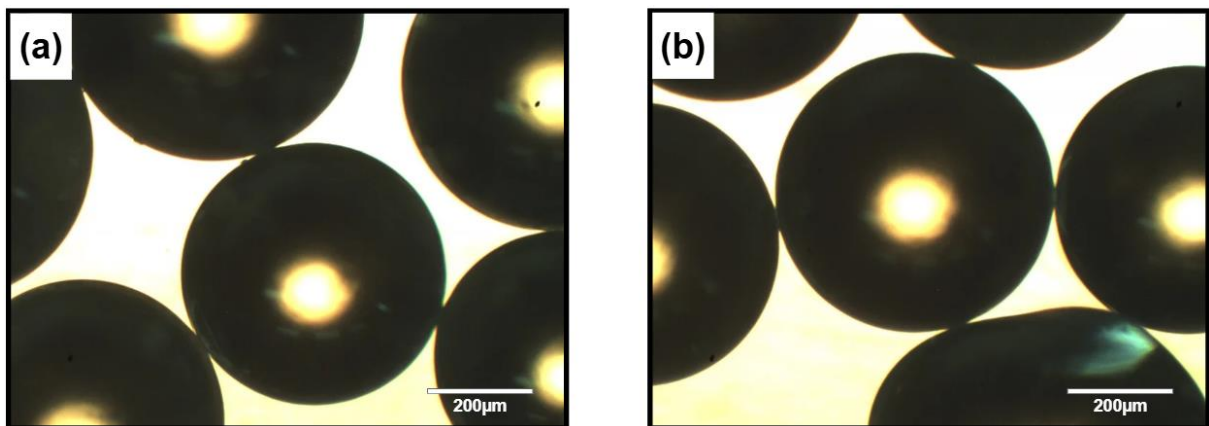
	$\varphi_3$			
		Fabricada	Comercial	NBR 16184:2021
<b>Morfologia (em %)</b>	Esferas	$90 \pm 5$	$78 \pm 4$	$\geq 77\%$
	Ovoides	$4,0 \pm 0,2$	$10,1 \pm 0,5$	Até 20%
	Geminadas	$4,9 \pm 0,1$	$10,6 \pm 0,5$	
	Cacos	$1,0 \pm 0,1$	$1,7 \pm 0,1$	Até 3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 4.3.1.4- $\varphi_4 \rightarrow 500 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 600 \mu\text{m}$

A Figura 34 mostra os típicos elementos observados por microscopia óptica das microesferas fabricadas e comerciais para a faixa granulométrica entre  $500 \mu\text{m}$  e  $625 \mu\text{m}$ . Para este caso, também as imagens mostram uma boa homogeneidade no que se refere ao diâmetro das microesferas, para ambas as microesferas.

Figura 34: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre  $500\mu\text{m}$  e  $600\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Tabela 13 mostra a quantificação da distribuição granulométrica ( $\varphi_4$ ) para ambos os casos, fabricada e comercial. Para este caso, também as microesferas comerciais e as fabricadas se encontram com uma granulometria semelhante, em torno de  $535 \mu\text{m}$ , e dentro da faixa granulométrica definida pelas peneiras.

Tabela 13: Distribuição granulométrica para  $\varphi_4$

	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	P16 ( $\mu\text{m}$ )	P84 ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )
Fabricada	540	513	568	$540 \pm_{27}^{28}$
Comercial	533	513	551	$533 \pm_{20}^{18}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 14 mostra a quantificação das características morfológicas da faixa granulométrica  $\varphi_4$ , para ambas as microesferas. As microesferas fabricadas neste trabalho novamente atendem aos critérios mínimos estabelecidos em norma. Por outro lado, para o caso das microesferas comerciais, para esta faixa granulométrica, foi observado uma quantidade de ovoides/geminadas superior aos limites estabelecidos em norma. Já a quantidade de microesferas está no limite estabelecido em norma, considerando a margem de erro.

Tabela 14: Características morfológicas das microesferas para  $500 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 600 \mu\text{m}$ .

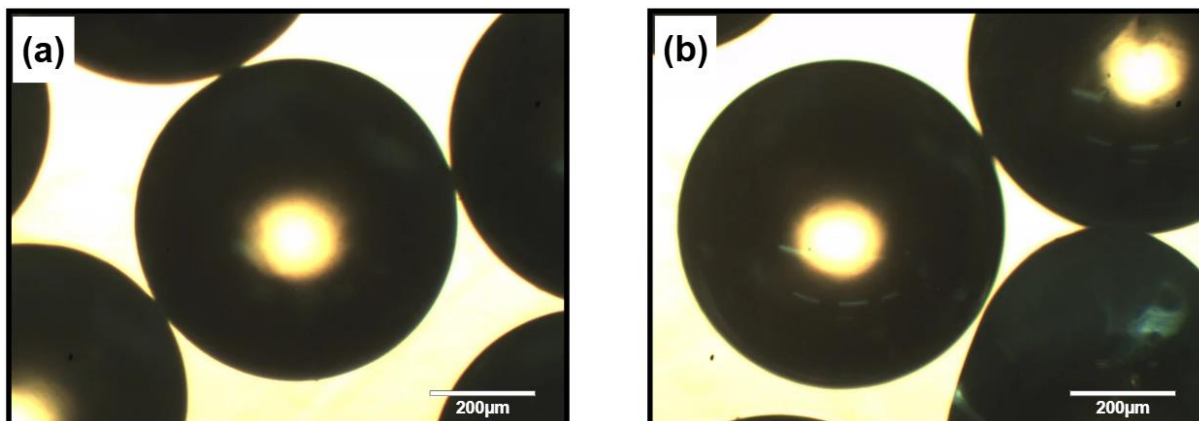
		$\varphi_4$		
		Fabricada	Comercial	NBR 16184:2021
<b>Morfologia (em %)</b>	Esferas	$94 \pm 5$	$75 \pm 4$	$\geq 77\%$
	Ovoides	$3,7 \pm 0,2$	$12,2 \pm 0,6$	Até 20%
	Geminadas	$1,5 \pm 0,1$	$11,4 \pm 0,6$	
	Cacos	$0,5 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	Até 3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 4.3.1.5- $\varphi_5 \rightarrow 600 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 710 \mu\text{m}$

A Figura 35 mostra os típicos elementos observados por microscopia óptica das microesferas fabricadas e comerciais para a faixa granulométrica entre  $600 \mu\text{m}$  e  $710 \mu\text{m}$ . Para este caso, também as imagens mostram uma boa homogeneidade no que se refere ao diâmetro das microesferas, para ambas as microesferas.

Figura 35: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre 600 $\mu\text{m}$  e 710  $\mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Tabela 15 mostra a quantificação da distribuição granulométrica ( $\varphi_5$ ) para ambos os casos, fabricada e comercial. Para este caso, assim como para os casos anteriores, a distribuição granulométrica de ambas é muito semelhante, com a mediana em torno de 645  $\mu\text{m}$ , e estão dentro dos limites das peneiras.

Tabela 15: Distribuição granulométrica para  $\varphi_5$

	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	P16 ( $\mu\text{m}$ )	P84 ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )
Fabricada	648	609	681	$648 \pm_{39}^{33}$
Comercial	643	617	676	$643 \pm_{26}^{33}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 16 mostra a quantificação das características morfológicas da faixa granulométrica  $\varphi_5$ , para ambas as microesferas. Novamente as microesferas fabricadas produzem atendem aos critérios mínimos estabelecidos em norma. Por outro lado, para o caso das microesferas comerciais, para esta faixa granulométrica, assim como na faixa granulométrica  $\varphi_4$ , a quantidade de ovoides/geminadas é superior aos limites estabelecidos em norma. Já a quantidade de microesferas está no limite estabelecido em norma, considerando a margem de erro.

Tabela 16: Características morfológicas das microesferas para  $600 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 710 \mu\text{m}$ .

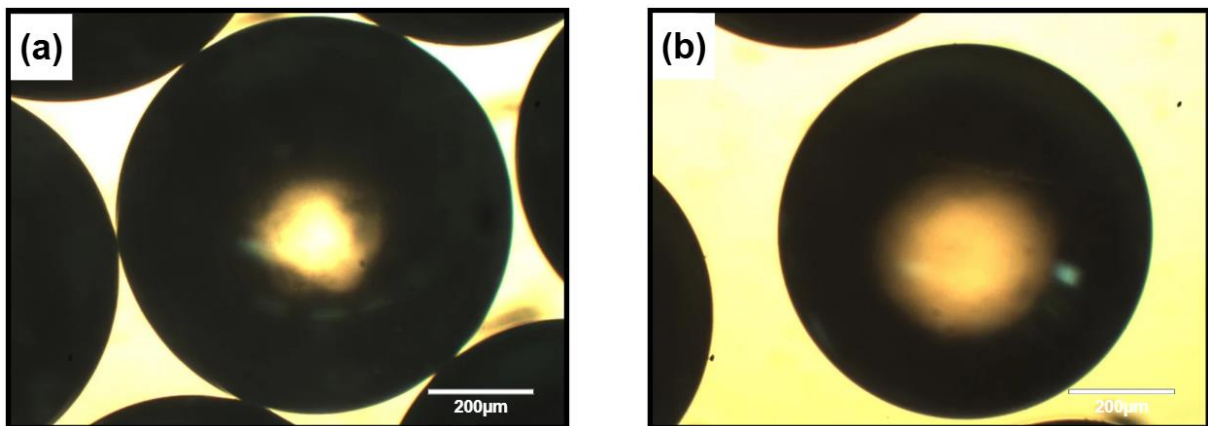
		$\varphi_5$		
		Fabricada	Comercial	NBR 16184:2021
Morfologia (em %)	Esferas	$93 \pm 5$	$77 \pm 4$	$\geq 77\%$
	Ovoides	$4,2 \pm 0,2$	$9,5 \pm 0,5$	Até 20%
	Geminadas	$1,2 \pm 0,1$	$12,5 \pm 0,6$	
	Cacos	$1,2 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,1$	Até 3%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

#### 4.3.1.6- $\varphi_6 \rightarrow 710 \mu\text{m} \leq \varphi \leq 850 \mu\text{m}$

A Figura 36 mostra os típicos elementos observados por microscopia óptica das microesferas fabricadas e comerciais para a faixa granulométrica entre  $710 \mu\text{m}$  e  $850 \mu\text{m}$ . Para este caso, também as imagens mostram uma boa homogeneidade no que se refere ao diâmetro das microesferas, para ambas as microesferas.

Figura 36: Imagens típicas das microesferas para a faixa granulométrica compreendida entre  $710\mu\text{m}$  e  $850 \mu\text{m}$ : (a) fabricada; b) comercial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Tabela 17 mostra a quantificação da distribuição granulométrica ( $\varphi_6$ ) para ambos os casos, fabricada e comercial. Para este caso específico, embora tenha uma diferença em torno de 5% nas medianas das duas distribuições granulométricas, ambas se encontram delimitadas pelas peneiras granulométricas.

Tabela 17: Distribuição granulométrica para  $\phi_6$ 

	Mediana ( $\mu\text{m}$ )	P16 ( $\mu\text{m}$ )	P84 ( $\mu\text{m}$ )	Representação ( $\mu\text{m}$ )
Fabricada	733	715	763	$733 \pm_{18}^{30}$
Comercial	770	733	802	$770 \pm_{37}^{32}$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A tabela 18 mostra a quantificação das características morfológicas da faixa granulométrica  $\phi_6$ , para ambas as microesferas. Assim como para as outras granulometrias anteriores, as microesferas fabricadas atendem aos critérios mínimos estabelecidos em norma. Por outro lado, para o caso das microesferas comerciais, para esta faixa granulométrica, assim como na faixa granulométrica  $\phi_4$  e  $\phi_5$ , foi observado uma quantidade de ovoides/geminadas superior aos limites estabelecidos em norma. Já a quantidade de microesferas está no limite estabelecido em norma, considerando a margem de erro.

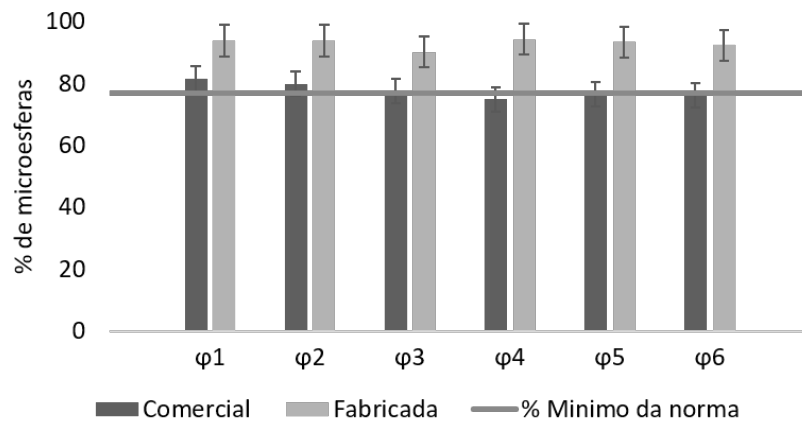
Tabela 18: Características morfológicas das microesferas para  $710 \mu\text{m} \leq \phi \leq 850 \mu\text{m}$ .

		$\phi_6$		
		Fabricada	Comercial	NBR 16184:2021
<b>Morfologia (em %)</b>	Esferas	$92 \pm 5$	$76 \pm 4$	$\geq 77\%$
	Ovoides	$5,9 \pm 0,3$	$13,9 \pm 0,7$	Até 20%
	Geminadas	$0,3 \pm 0,1$	$8,7 \pm 0,4$	
	Cacos	$1,5 \pm 0,1$	$1,2 \pm 0,1$	Até 3%

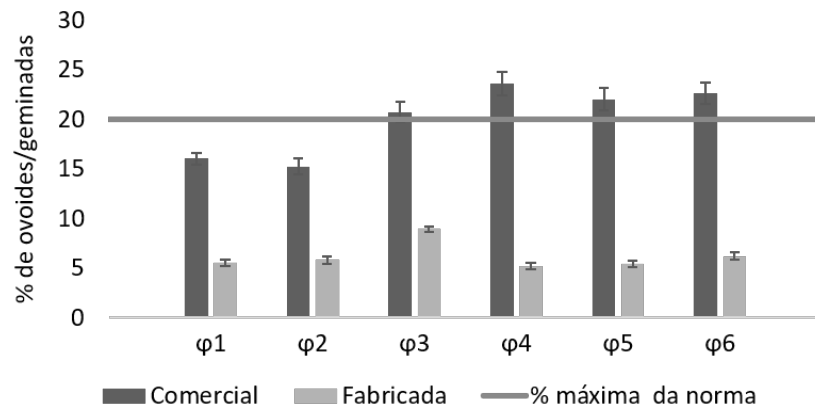
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

De forma geral, os resultados das granulometrias são semelhantes para os casos de amostras fabricadas e comerciais, o que é justificado pelo fato de que ambas passaram pelas mesmas peneiras granulométricas. Para as faixas granulométricas escolhidas, as microesferas se encaixam na classificação do Tipo IIA. Por outro lado, os resultados do ponto de vista de morfologia são bem diferentes quando se compara as microesferas fabricadas e comerciais nas diferentes faixas granulométricas. Para facilitar a visualização, a Figura 37 mostra os gráficos onde pode ser visto uma comparação das morfologias para todas as granulometrias avaliadas.

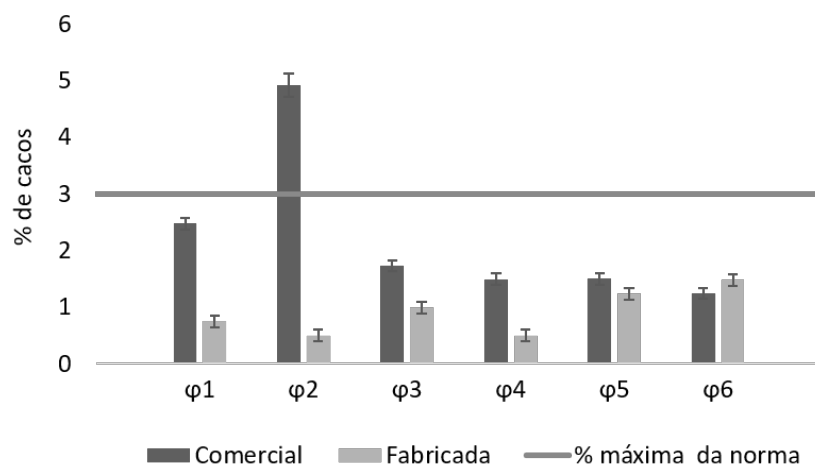
Figura 37: Características morfológicas dos elementos para as diferentes granulometrias bem como os limites descritos em norma.



(a)



(b)



(c)

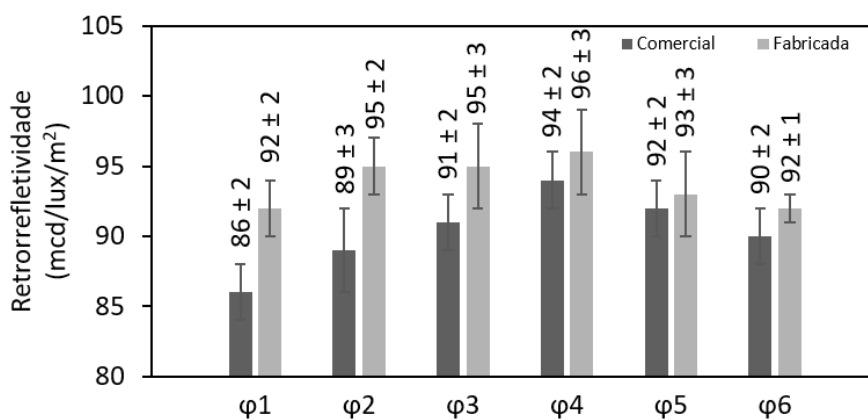
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Primeiramente, pode-se destacar a qualidade das microesferas produzidas neste trabalho, uma vez que a quantidade de microesferas é bem superior (média acima de 90%) ao mínimo estabelecido em norma (77%). O mesmo se observa para o caso dos elementos não esféricos, como elementos ovóides, geminadas e cacos, os quais estão bem abaixo dos limites estabelecidos em norma. Estes resultados demonstram que o processo de produção é excelente para a faixa granulométrica correspondente às microesferas do Tipo-IIA. Também, o processo se mostra muito bom quando se avalia de forma conjunta a geração de microesferas para toda a faixa granulométrica (212 $\mu$ m a 850  $\mu$ m), já que, considerando a incerteza das medidas, os resultados são semelhantes. O mesmo pode ser observado para o caso de ovóides e geminadas, com a exceção da granulometria  $\phi_3$ , que teve um percentual em torno de 9%, mas ainda muito abaixo do limite de 20% descrito na norma. Já no que se refere aos cacos, existe uma tendência de aumento percentual quando o diâmetro é aumentado. Isso pode ser melhor observado comparando os casos  $\phi_4$ ,  $\phi_5$  e  $\phi_6$ . Esse resultado pode ser explicado pelo fato que quanto maior o diâmetro, maior a dificuldade em atingir a condição ideal de temperatura e pressão para a geração das microesferas. De qualquer forma, novamente, a quantidade de cacos para toda a faixa granulométrica é bem inferior (média de 1,5%) ao máximo descrito em norma (até 3%). Já para as microesferas comerciais, observa-se que os percentuais para cada morfologia estão sempre próximos dos limites da norma, considerando a margem de erro, e para algumas situações, excedem os limites. Para o caso de microesferas, para todas as granulometrias, o percentual está adequado dentro da margem de erro. Já para o caso de elementos ovóides/geminados, as granulometrias  $\phi_4$ ,  $\phi_5$  e  $\phi_6$  excedem o limite (24% quando o máximo é 20%). No que se refere aos cacos, as microesferas estão dentro dos limites com exceção da granulometria  $\phi_2$  que atingiu praticamente 5% quando o máximo seria 3%. Os resultados superiores encontrados para o processo desenvolvido neste trabalho, quando comparados com as microesferas comerciais podem ser explicados pela produção em pequena escala e em ambiente controlado de laboratório. Porém é importante destacar que o processo de fabricação desenvolvido permite a geração de microesferas com excelente qualidade para toda a faixa correspondente à Tipo-IIA, podendo ser uma técnica complementar para testes de melhoramento de qualidade de microesferas para posterior fabricação com métodos convencionais em escala industrial.

## Análise da Retrorefletividade

A validação mais importante no que se refere as microesferas está na realização das medidas de retrorefletividade, as quais revelam a qualidade das microesferas baseado na amplificação da sinalização para os condutores. Um dos principais fatores que alteram a retrorefletividade é a morfologia. Qualquer imperfeição das microesferas fará com que a luz se espalhe de forma indesejada, não retornando para os olhos dos motoristas. Neste sentido, as medidas de retrorefletividade foram realizadas para as microesferas fabricadas, considerando todas as faixas granulométricas ( $\phi_1$  a  $\phi_6$ ), e as microesferas comerciais foram utilizadas como referência. A figura 38 mostra os resultados das medidas de retrorefletividade para ambas as microesferas na faixa granulométrica que as classificam como Tipo-IIA. Conforme descrito na metodologia, as amostras foram avaliadas em uma placa preta visando verificar a qualidade intrínseca das microesferas, desconsiderando fatores externos como grau de ancoragem na tinta e a própria tinta em si.

Figura 38: Medidas da retrorefletividade das amostras.



Fonte: Autor, 2025.

De forma geral a retrorefletividade para ambas as microesferas - considerando toda a faixa granulométrica - está em torno de 90 mcd/lux/m<sup>2</sup>. As variações percentuais médias, entre o melhor e o pior caso, são de 4% para as fabricadas e 9% para as comerciais. Por outro lado, observa-se que a retrorefletividade média das microesferas fabricadas é maior que para o caso das comerciais, embora exista uma superposição dos valores medidos para os casos  $\phi_3$  a  $\phi_6$ , considerando a margem de erro. Este resultado pode ser um reflexo da qualidade morfológica das microesferas produzidas, as quais se mostraram superiores às comerciais, como mostrado anteriormente. Também, observa-se um comportamento semelhante para a retrorefletividade

de ambas as microesferas em função do diâmetro; na qual existe uma tendência de aumento até  $\varphi_4$  e depois uma queda. Para o caso das microesferas fabricadas, este comportamento pode estar associado a um aumento da presença de cacos para as granulometrias superiores ( $\varphi_5$  a  $\varphi_6$ ), cacos estes que não retrorefletem a luz, e também a menor densidade das microesferas nesta faixa granulométrica, que poder estar associado a presença de bolhas (não avaliado neste trabalho) no interior do vidro. Também a diminuição da retrorefletividade com o diâmetro pode ser justificado pela própria quantidade de microesferas, que diminui muito quando se aumenta o diâmetro (mantendo a massa constante), o que faz com que a luz interaja com uma quantidade menor de microesferas quando comparado com microesferas de diâmetros menores. Já a queda para as mesmas granulometrias no caso das comerciais também pode estar associada a presença de bolhas, que espalham a luz de forma a diminuir a retroreflexão. As maiores diferenças de retrorefletividade entre as microesferas fabricadas e comerciais são observadas para as granulometrias  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$ , onde de fato os valores para as fabricadas são superiores as comerciais mesmo considerando a margem de erro. A justificativa para estes melhores resultados pode novamente ser dada considerando a morfologia. Para estas granulometrias, as microesferas fabricadas são muito superiores em qualidade, principalmente no que diz respeito ao percentual de elementos ovoides/geminados e percentual de cacos, como pode ser visto na figura 37. Estes resultados reforçam a qualidade das microesferas produzidas neste trabalho, validando assim o processo de fabricação desenvolvido.

## 5 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um aparato capaz de fabricar microesferas vítreas do tipo IIA. De acordo com os resultados obtidos pode-se considerar o dispositivo apto a fabricar microesferas vítreas com diâmetros variando entre 212 $\mu\text{m}$  e 850 $\mu\text{m}$ . Mais especificamente, o aparato desenvolvido aumentou o tempo de permanência das partículas na região aquecida, permitindo uma fusão mais completa e a formação de microesferas de maiores diâmetros. A configuração final, composta por quatro queimadores laterais e um queimador central inferior, associada ao tubo em formato de “U” invertido, possibilitou um controle mais eficiente da trajetória das partículas, garantindo o tempo adequado na zona aquecida, e direcionando as partículas até o sistema de coleta.

Nesta configuração, como descrito, o aparato foi capaz de produzir microesferas com diâmetros variando de 212  $\mu\text{m}$  a 850  $\mu\text{m}$ , abrangendo a faixa especificada para microesferas do tipo II-A, com baixa incidência de defeitos morfológicos, indicando que o aparato fornece as condições necessárias para a esferoidização. A eficiência de fabricação foi corroborada pela comparação com microesferas comerciais, as quais apresentaram maior presença de partículas defeituosas. Portanto o aparato desenvolvido atingiu os objetivos propostos, apresentando-se como uma solução viável para a produção de microesferas vítreas do tipo II-A a partir de vidros reciclados.

A análise por fluorescência de raios X confirmou que os vidros reciclados utilizados atendem as exigências de composição química da NBR 16184:2021, pois possui teor de sílica maior que 70%, o que é superior ao mínimo de 65% exigido, sendo o mesmo isento de elementos tóxicos, como arsênio, chumbo e antimônio. Esses resultados garantem a adequação do material na fabricação de microesferas vítreas para aplicação em sinalização horizontal viária.

A análise de densidade demonstrou que todas as microesferas produzidas apresentaram valores que atendem as especificações da norma, com densidades entre 2,4  $\text{g}/\text{cm}^3$  e 2,6  $\text{g}/\text{cm}^3$ , faixa estabelecida pela norma para microesferas do tipo II-A. Além disso, não foram observadas variações significativas entre as diferentes granulometrias, indicando que o processo de fabricação é estável e reprodutível.

A análise da morfologia das microesferas fabricadas, revelaram elevada esfericidade e reduzida presença de partículas defeituosas, atendendo plenamente às exigências normativas.

Os ensaios de retrorefletividade confirmaram que as microesferas produzidas a partir de vidro reciclado apresentam desempenho equivalente ou até mesmo superior às amostras

comerciais, garantindo sua aplicabilidade na sinalização horizontal viária e evidenciando a eficiência do aparato desenvolvido.

## **6 Trabalhos Futuros**

Para o aperfeiçoamento do aparato desenvolvido, algumas linhas de estudo podem ser exploradas, com o objetivo de aumentar sua eficiência em relação à massa de partículas coletadas, à eficiência de esferoidização e ao desempenho térmico. Por meio da modelagem computacional via dinâmica dos fluidos (CFD), é possível investigar o escoamento interno, analisando a velocidade das partículas no interior do tubo e verificando de que forma o regime de escoamento afeta o tempo de permanência na zona de aquecimento, conseqüentemente, a eficiência do processo de esferoidização.

### **Eficiência de coleta em função da granulometria**

Para o aperfeiçoamento do processo de coleta, torna-se necessário realizar estudos mais aprofundados sobre a massa das partículas e o escoamento interno no dispositivo. Dessa forma, é possível definir uma curva de velocidade adequada para cada diâmetro desejado, garantindo que as partículas permaneçam na zona aquecida pelo tempo necessário antes de serem conduzidas ao recipiente de coleta. Além disso, faz-se relevante avaliar o rendimento do processo para cada faixa granulométrica (212  $\mu\text{m}$  a 1250  $\mu\text{m}$ ), identificando eventuais perdas ao longo da trajetória das microesferas, propondo melhorias no sistema de coleta.

### **Eficiência energética do processo**

Realizar estudos a fim de quantificar e reduzir o consumo de GLP durante a operação, avaliando melhorias que consigam reduzir as perdas de calor para o meio, assim como e determinar uma curva de temperatura para o dispositivo, permitindo que seja possível estimar a zona termicamente produtiva do aparato, para melhores controles da permanência das partículas nessas regiões. Relacionando o gradiente térmico com a formação de defeitos morfológicos, esfericidade e qualidade final das microesferas, através de simulações computacionais de transferência de calor, permitindo prever o comportamento térmico do sistema em diferentes condições operacionais.

### **Efeito da coloração dos vidros na retrorrefletividade das microesferas do tipo II-A**

Desenvolver microesferas vítreas com diferentes colorações e com diâmetros controlados entre 150  $\mu\text{m}$  e 850  $\mu\text{m}$ , de modo a investigar a influência do diâmetro sobre a retrorrefletividade. Com isso, busca-se estabelecer critérios técnicos que permitam avaliar a viabilidade e a eficácia do emprego de microesferas coloridas na sinalização horizontal viária.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14723: Sinalização horizontal viária — Determinação do coeficiente de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 15 m** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16307: Sinalização horizontal viária — Determinação do coeficiente de retrorrefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 30 m** – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

\_\_\_\_\_. **Sinalização horizontal viária — Esferas e microesferas de vidro: Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2021. 32 p.

ASSIS, O. B.G. O uso de vidro reciclado na confecção de membranas para microfiltração. *Cerâmica*, v. 52, p. 105-113, 2006. Disponível em: . Acesso em: 07 dez. 2024.

BABIĆ, Darko; BABIĆ, Dario; FIOLIC, Mario; FERKO, Marija. **Road Markings and Signs in Road Safety**. Encyclopedia, v. 2, n. 4, p. 1738–1752, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2040119>. Acesso em: 3 ago. 2025.

BABIĆ, D.; FIOLIC, M.; BABIĆ, D.; GATES, T. **Road markings and their impact on driver behaviour and road safety: a systematic review of current findings**. Journal of Advanced Transportation, v. 2020, p. 1-19, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/7843743>.

BARROS FILHO, E. C. **Estudo do processo de esferolização de partículas vítreas visando a aplicação em radioterapia interna seletiva**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, São Carlos/SP, 2012.

BARRY. N. **Handbook of Practical X-ray Fluorescence Analysis**. Springer, Berlin, 2006.

BESSMERTNYI, V. S.; KROKHIN, V. P.; LYASHKO, A. A.; DRIZHD, N. A.; SHEKHOVTSOVA, Zh. E. **Production of glass microspheres using the plasma-spraying method**. Glass and Ceramics, v. 58, n. 7-8, p. 268–269, 2001.

BURGHARDT, T. E.; ETTINGER, K.; KÖCK, B.; HAUZENBERGER, C. **Glass beads for road markings and other industrial usage: Crystallinity and hazardous elements**, CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS, v. 17, 2022. [doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01213](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01213).

BRASIL. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume IV – Sinalização Horizontal**. 1. ed. Brasília: DENATRAN, Ministério das Cidades, 2007. 128 p. (Série Manuais de Sinalização de Trânsito). Aprovado pela Resolução CONTRAN nº 236, de 11 de maio de 2007.

BURGHARDT, T. E. **Road markings for reliable visual guidance and sustainability**. In: INTECHOPEN. *Advanced Road Engineering – Design, Materials, and Sustainable Practices*. London: IntechOpen, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1010211>.

CAMPOS, L. A.; MORAES, J. C. **Impacto da sinalização horizontal na redução de acidentes em rodovias**. Revista Transporte e Mobilidade, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). *Pesquisa CNT de Rodovias 2024*. Brasília, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/11/Pesquisa-CNT-de-Rodovias-2024.pdf>. Acesso em: 3 out. 2025.

CONTRAN. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito – **Volume 4: Sinalização Horizontal**. Brasília, 2022.

DIAMANDOUROS, Konstandinos; GATSCHA, Michael. **Rainvision: The impact of road markings on driver behaviour – wet night visibility**. *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 4344–4353, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.356>

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

EBANATAW. **Marcação viária: importância e aplicações**. Disponível em: <https://www.ebanataw.com.br/trafegando/marcacaoviaria.htm>. Acesso em: 4 abril 2025.

FEITOSA, B. de B.; SAITO, D. K.; J. P. de S.; SOARES, V. F. **Relatório 01 - Água na Indústria (Vidro)**. 2017. Disponível em: Acesso em: 03 de dez. 2024

FIOLIC, M.; BABIĆ, D.; BABIĆ, D.; GATES, T. **The quality of road markings and traffic signs and their impact on driver behavior under simulated night-time driving conditions**. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 102, p. 77-92, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.10.025>.

GARNIER, P.; ABRIOU, D.; COQUILLON, M. **Process for producing glass microspheres Depositante: Saint Gibson Vitrage SA**. US nº 4661137A. Depósito: 20 ago. 1985. Concessão: 28 abr. 1987.

KENT, J. A.; BOMMARAJU, T.V.; BARNICKI, S.D. **Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology**. 13. ed. [S.I]: Springer, 2017.

LEE, J. D. **Fifty years of driving safety research**. *Human Factors*, v. 50, n. 3, p. 521-528, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1518/001872008X288376>.

MAHMOUD, Mokhtar; GALUSEK, Dušan. **Fabrication and environmental applications of glass microspheres: A review**. *Ceramics International*, v. 49, p. 39745–39759, 2023.

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

MCLELLAN, G. W.; SHAND, E. B. **Glass Engineering Handbook**. 1. ed. Reino Unido: McGraw-Hill, 1984.

PARCIANELLO, F. P. Avaliação da influência textura do pavimento no desempenho da retrorrefletividade em demarcações viárias: estudo de caso em um trecho monitorado em Santa

Maria/RS. Orientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira. 2016. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Curso de Engenharia Civil, Santa Maria/RS, 2016.

PEREIRA D. S.; RENZ E.M.; BUENO L.; SPECHT L.P.; SALLES L.S. **Road markings: important aspects related to retroreflectivity performance and the use of 3-D printing for dosage.** TRANSPORTES. v. 30, n. 1, p. 1-17. 2022.

PRIEVE, D. C.; FREJ, N. A. **Total internal reflection microscopy: a quantitative tool for the measurement of colloidal forces.** *Langmuir*, v. 6, n. 2, p. 396-403, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1021/la00091a013>.

SANTOS, J. M.; ALMEIDA, P. L. **Avanços tecnológicos na sinalização horizontal e seus impactos na segurança viária.** Cadernos de Infraestrutura Urbana, 2020.

SCHOON, C. C.; van MINNEN, J. **The effect of road markings on speed and lateral position of vehicles.** *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 2048-2057, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.356>.

SCHWAB, M. **Estudo de desempenho dos materiais de demarcação viária retrorrefletivos.** Dissertação (Mestrado em Análise e seleção dos materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP, CETEC, UEMG), Belo Horizonte, 1999.

Smadi, O., Souleyrette, R. R., Ormand, D. J., & Hawkins, N. (2008). **Pavement Marking Retroreflectivity: Analysis of Safety Effectiveness.** *Transportation Research Record*, 2056(1), 17-24. Relação entre retrorrefletividade e segurança)

SOUZA, J. P. Estudo da sinterização de vidros alumino silicatos por calorimetria exploratória diferencial. Dissertação (Mestrado em Ciências de Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2015.

TOMÁS, A. L. **Produção e caracterização de microesferas vítreas de diferentes cores produzidas a partir de vidros reciclados para a sinalização viária.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Alegrete/RS, 2024.

VASILIAUSKAS, R.; VAITKUS, A. **Assessment of road marking retroreflectivity and durability under real traffic conditions.** *Modern Road Materials and Technologies (MLA)*, v. 1, p. 27-35, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3846/mla.2020.13069>.

VIETTA FILHO, F.; TOMAS, A. L.; GOMEZ ARMAS, L. E.; VALSECCHI, C.; MENEZES, J. W. **Optical, physical and chemical properties of microbeads manufactured from recycled glass of different colors for road signage.** *Materials Research*, v. 28, supl. 1, p. e20250109, 2025.