

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JOSÉ VINÍCIUS MARKS MACHADO**

**GERAÇÃO DE MICROESFERAS VÍTREAS A PARTIR DE GARRAFAS DE VIDRO  
DE DIFERENTES CORES E AVALIAÇÃO DA RETRORREFLETIVIDADE**

**Alegrete**

**2022**

**JOSÉ VINÍCIUS MARKS MACHADO**

**GERAÇÃO DE MICROESFERAS VÍTREAS A PARTIR DE GARRAFAS DE VIDRO  
DE DIFERENTES CORES E AVALIAÇÃO DA RETRORREFLETIVIDADE**

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

Orientador: Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes.

**Alegrete**

**2022**

**JOSE VINICIUS MARKS MACHADO**

**GERAÇÃO DE MICROESFERAS VÍTREAS A PARTIR DE GARRAFAS DE VIDRO DE DIFERENTES CORES E AVALIAÇÃO DA RETRORREFLETIVIDADE**

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 07 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

PROF. DR. JACSON WEBER DE MENEZES - UNIPAMPA - ORIENTADOR

PROFA. DRA. CHIARA VALSECCHI - UNIPAMPA

PROF. ME. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2022, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2022, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/03/2022, às 15:45, 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 **0759720** e o código CRC **A22FF9D6**.

---

Dedico a todos que amo, em especial aos meus pais que, como bons engenheiros, construíram e foram os alicerces da minha jornada. Obrigado por tanto!

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Juarez Limana Machado e Clarice Marks Machado, que estiveram comigo desde o princípio desta minha caminhada, sendo fonte de apoio, segurança e amor incondicional. De mesmo modo, estendo esse agradecimento aos meus irmãos José Tobias e Ana Luzia, meus avós, assim como demais familiares que, mesmo longe, ajudaram, oraram, incentivaram e torceram por mim. À Julia Lange pelo companheirismo, paciência, apoio e compreensão, sou imensamente grato.

Ao meu orientador Dr. Jacson Weber de Menezes pela oportunidade, confiança, disponibilidade e apoio durante o desenvolvimento de todas as atividades propostas para este trabalho. Esse agradecimento estende-se também, à professora Dr. Chiara Valsecchi que, além de proporcionar a oportunidade de ingressar no GOMNDI, deu todo o suporte para a realização das atividades, com um esforço extra diante das limitações impostas pela Pandemia.

À Universidade Federal do Pampa e aos responsáveis pelos laboratórios, pela disponibilização dos instrumentos necessários para a execução das atividades. No mesmo sentido, agradeço ao professor Dr. Deividi da Silva Pereira da Universidade Federal de Santa Maria pela colaboração e disponibilização do retrorrefletômetro, equipamento este necessário para a execução das medidas de retrorrefletividade.

Por fim, a todos os amigos e aos demais aqui não citados, que de alguma forma contribuíram para a minha formação, bem como a execução deste trabalho.

## RESUMO

A sinalização viária é um instrumento essencial das rodovias, pois permite a visualização da via mesmo em condições adversas de tempo e iluminação. Assim, para que seja possível esta alta visibilidade, as demarcações devem ser retrorreflexivas. Logo, buscando a propriedade de retrorreflexão, microesferas de vidro vêm sendo utilizadas agregadas aos materiais de sinalização viária horizontal. Dentre os diversos tipos, as microesferas do tipo I-B, de acordo com a norma NBR 16184:2021, possuem diâmetro em torno de 150  $\mu\text{m}$  e são misturadas à tinta antes de sua aplicação. Conforme a NBR 16184:2021, as microesferas devem ser limpas, claras e incolores para utilização em sinalização viária. Neste sentido, este trabalho visa analisar o efeito da coloração das microesferas no que diz respeito a retrorrefletividade. Mais especificamente, foram produzidas microesferas através do método de chama horizontal considerando vidros de garrafa reciclados nas seguintes colorações: incolor, azul, verde e marrom. As microesferas foram produzidas e otimizadas de forma independente para cada cor sendo realizadas medidas de retrorrefletividade para efeito de comparação. Os resultados mostram que a cor afeta de forma positiva a retrorrefletividade, tendo os melhores resultados as microesferas de coloração marrom.

Palavras-Chave: Microesferas. Retrorrefletividade. Sinalização viária. Vidros reciclados.

## **ABSTRACT**

Pavement marking is an essential tool for highways, as it allows the visualization of the road even in adverse weather and lighting conditions. Thus, for this high visibility to be possible, the marks must be retroreflective. Therefore, seeking the retroreflection property, glass beads (microspheres) have been used in addition to horizontal pavement markings materials. Among the several types, the I-B type, according to the norm NBR 16184:2021, has a diameter of around 150 $\mu$ m and is embedded in the ink before the application. According to NBR 16184:2021, the glass beads must be clean, clear, and colorless to use in pavement markings. In this sense, this work aims to analyze the effect of the glass beads' color concerning retroreflectivity. More specifically, glass beads were produced using the horizontal flame method and recycled bottle glasses in the following colors: colorless, blue, green, and brown. The glass beads were produced and optimized independently for each color and retroreflectivity measurements were performed for comparison purposes. The results show that color positively affects retroreflectivity, with brown-colored glass beads having the best results.

**Keywords:** Glass beads. Retroreflectivity. Pavement markings. Recycled glass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de refletores capazes de retrorefletirem a luz.....	22
Figura 2 - Exemplificação da reflexão de acordo com a esfericidade.....	26
Figura 3 - Ancoragem de microesferas na pintura. ....	27
Figura 4 - Edificação com reflexão difusa (a); Edificação com retroreflexão (b). ....	28
Figura 5 - Esquema do método por queda gravitacional. ....	29
Figura 6 - Aparato para produção microesferas pelo método da chama horizontal.....	30
Figura 7 - Esquema do aparato utilizado por Silva (2020).....	31
Figura 8 - Aparato desenvolvido e utilizado por Silva (2020). ....	31
Figura 9 - Etapas do procedimento experimental. ....	35
Figura 10 - Fluxograma esquemático do processo experimental. ....	36
Figura 11 - Garrafas utilizadas na produção das microesferas.....	37
Figura 12 - Pistilo e almofariz. ....	38
Figura 13 - Peneiras.....	38
Figura 14 - Garrafas de vidro limpas.....	39
Figura 15 - Vidro moído da garrafa azul. ....	39
Figura 16 - Cacos de vidro verde durante o peneiramento.....	40
Figura 17 - Aparato utilizado pelo GOMNDI. ....	41
Figura 18 - Novo setup utilizado na produção das microesferas de vidro. ....	42
Figura 19 - Maçarico do tipo chuveirinho de latão e suporte de fixação. ....	42
Figura 20 - Cilindro de gás oxigênio (a); Botijão de GLP (b).....	43
Figura 21 - Chama do maçarico. ....	43
Figura 22 - Microesferas produzidas a partir do método da chama horizontal. ....	44
Figura 23 - Microesferas azuis (a); Microesferas incolores (b); Microesferas âmbar (c); Microesferas verdes (d). ....	45
Figura 24 - Microscópio óptico trinocular.....	45
Figura 25 - Microscópio durante a análise das microesferas.....	46
Figura 26 - Análise das microesferas no software ISCapture. ....	47
Figura 27 - Espectrofotômetro Bel Engineering UV-M5.....	49
Figura 28 - Paquímetro universal. ....	50
Figura 29 - Amostra vidro azul (a); Amostra vidro âmbar (b); Amostra vidro incolor (c); Amostra vidro verde (d). ....	50

Figura 30 - Balança analítica Marte (a); Pipeta graduada, pipetador de três vias e proveta (b).....	52
Figura 31 - Vidro azul (a); Vidro marrom (b); Vidro incolor (c); Vidro verde (d). .....	52
Figura 32 - Retrorrefletômetro horizontal clássico easylux. ....	53
Figura 33 - Medidas da placa de medida. ....	54
Figura 34 - Placa de fórmica com a abertura da área de medida. ....	54
Figura 35 - Retrorrefletômetro e placa de medição. ....	54
Figura 36 - Microesferas comerciais Dragonlux. ....	55
Figura 37 - Retrorrefletômetro e placa de medição durante a avaliação da retrorrefletividade. ....	56
Figura 38 - Resposta do retrorrefletômetro no visor do aparelho. ....	56
Figura 39 - Gráfico de transmitância por comprimento de onda. ....	60
Figura 40 - Espectro de transmitância considerando a espessura de 425 $\mu$ m. ....	61
Figura 41 - Iluminantes padrão CIE. ....	62
Figura 42 - Distribuição dos espectros de diferentes lâmpadas. ....	62
Figura 43 - Microesferas durante a microscopia óptica. ....	63
Figura 44 - Microesferas incolores durante o processo de microscopia óptica. ....	64
Figura 45 - Microesferas marrons durante o processo de microscopia óptica. ....	64
Figura 46 - Microesferas azuis durante o processo de microscopia óptica. ....	65
Figura 47 - Microesferas verdes durante o processo de microscopia óptica. ....	65
Figura 48 - Microesferas comerciais durante o processo de microscopia óptica. ....	65
Figura 49 - Gráfico comparativo de rendimento em termos de microesferas esféricas. ....	67
Figura 50 - Gráfico comparativo de percentual de microesferas ovoides, geminadas ou bolhas. ....	67
Figura 51 - Gráfico comparativo de rendimento em termos de cacos e elementos estranhos. ....	68
Figura 52 - Comportamento das microesferas incolores durante a contagem. ....	68
Figura 53 - Comportamento das microesferas marrom durante a contagem. ....	69
Figura 54 - Comportamento das microesferas verdes durante a contagem. ....	69
Figura 55 - Comportamento das microesferas azuis durante a contagem. ....	70
Figura 56 - Comportamento das microesferas comerciais durante a contagem. ....	70
Figura 57 - Histograma e curva de distribuição microesferas incolores. ....	71
Figura 58 - Granulometria das microesferas incolores. ....	72
Figura 59 - Histograma e curva de distribuição das microesferas comerciais. ....	73
Figura 60 - Granulometria das microesferas comerciais. ....	73

Figura 61 - Gráfico comparativo das curvas de distribuição normal das microesferas ao longo dos diâmetros.....	74
Figura 62 - Gráfico da retrorrefletividade média das diferentes microesferas geometria 15m.....	75
Figura 63 - Gráfico da retrorrefletividade média das diferentes microesferas geometria 30m.....	76
Figura 64 - Vista superior do aparato utilizado.....	85
Figura 65 - Corte 1 do aparato.....	85
Figura 66 - Corte 2 do aparato.....	86
Figura 67 - Detalhe isométrico do aparato.....	86
Figura 68 - Detalhes isométrico da chapa de aço galvanizada.....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria microesferas tipo I-B.....	25
Tabela 2 - Fator de calibração. ....	47
Tabela 3 - Valores limites de densidade. ....	57
Tabela 4 - Valores medidos para o vidro azul. ....	57
Tabela 5 - Valores medidas para o vidro incolor.....	58
Tabela 6 - Valores medidos para o vidro verde.....	58
Tabela 7 - Valores medidos para o vidro marrom. ....	58
Tabela 8 - Valores médios de densidade e verificação dos limites NBR 16184:2021.....	59
Tabela 9 - Espessuras das amostras de cada vidro. ....	59
Tabela 10 – Resultados percentuais de microesferas esféricas, ovoides e cacos. ....	66
Tabela 11 – Valores de diâmetro mínimo, máximo, médio e desvio padrão das microesferas.....	71
Tabela 12 - Retrorrefletividade em função de cor para uma densidade de 100g/m <sup>2</sup> para 15m. ....	75
Tabela 13 - Retrorrefletividade em função de cor para uma densidade de 100g/m <sup>2</sup> para 30m. ....	76

## **LISTA DE SIGLAS**

ABIVIDRO – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos.

ANM – Agência Nacional de Mineração

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CIE – Commission International De L'eclairage

CTB – Código de Trânsito Brasileiro

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

GLP – Gás liquefeito de petróleo

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

TxDOT – Texas Department of Transportation

UV – Ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo Geral .....	16
1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.3	Justificativa .....	17
1.4	Organização do Trabalho .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	Sinalização Viária.....	19
2.2	Retrorefletividade .....	21
2.3	Microesferas de vidro na sinalização viária.....	23
2.3.1	Microesferas tipo I-B e suas especificações .....	24
2.4	Outras aplicações de microesferas na construção civil.....	27
2.5	Produção de microesferas.....	28
2.6	Produção e reciclagem do vidro .....	32
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1	Vidros.....	37
3.1.1	Materiais e equipamentos .....	37
3.1.2	Métodos.....	39
3.2	Produção das microesferas .....	41
3.2.1	Materiais e equipamentos .....	41
3.2.2	Métodos.....	43
3.3	Avaliação da microscopia óptica.....	45
3.3.1	Materiais e equipamentos .....	45
3.3.2	Métodos.....	46
3.3.3	Distribuição granulométrica das microesferas .....	48
3.4	Avaliação da espectrofotometria UV-Vis .....	49
3.4.1	Materiais e equipamentos .....	49

3.4.2	Métodos.....	50
3.5	Avaliação da densidade.....	51
3.5.1	Materiais e equipamentos .....	51
3.5.2	Métodos.....	52
3.6	Avaliação da retrorrefletividade.....	53
3.6.1	Materiais e equipamentos .....	53
3.6.2	Métodos.....	55
4	RESULTADOS.....	57
4.1	Vidros.....	57
4.1.1	Avaliação da densidade .....	57
4.1.2	Avaliação dos espectros Uv-Vis .....	59
4.2	Microesferas .....	63
4.2.1	Rendimento em termos de microesferas .....	63
4.2.2	Distribuição granulométrica .....	68
4.2.3	Avaliação da retrorrefletividade .....	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
5.1	Sugestões de trabalhos futuros .....	79
	REFERÊNCIAS .....	80
	APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL .....	85

## 1 INTRODUÇÃO

A sinalização viária horizontal é um importante instrumento de segurança que abrange elementos como marcas, símbolos e legendas que são aplicadas diretamente na pista de rolamento de uma rodovia (DNIT, 2010). Além de tornar a via mais segura, uma sinalização adequada propicia um melhor conforto aos usuários que transitam sobre ela. Segundo o DNIT (2010), para efetuar tal sinalização pode-se utilizar diversos materiais como tintas, massas termoplásticas e películas pré-fabricadas. Entretanto, ainda de acordo com o DNIT (2010), independentemente do material escolhido este deve ser retrorrefletivo, ou seja, deve permitir ao motorista a informação visual da sinalização, mesmo em condições adversas de tempo e iluminação. Desse modo, visando proporcionar uma alta visibilidade da via, de acordo com Schwab (1999, p.18) pode-se “[..] agregar aos materiais de demarcação viária, microesferas de vidro que atuam como lentes que coletam e concentram a luz emitida pelos faróis dos veículos e devolvem-na aos olhos do motorista [...]”. Assim, para que a rodovia tenha uma sinalização horizontal adequada, é necessária a incorporação de microesferas de vidro junto a tinta.

Segundo o Panorama da ABRAVIDRO 2021, o Brasil possui uma capacidade de produção de 7530 toneladas de vidro por dia, o qual é produzido majoritariamente de matéria prima virgem, ou seja, a partir da sílica proveniente da areia de quartzo, sendo esta extraída de reservas naturais (SILVA, 2020). Apesar do Brasil possuir grandes reservas de areia quartzítica, segundo Tibiriça (2018), a sua extração causa diversos impactos ambientais ao longo dos cursos d’água promovendo implicações como riscos de assoreamento, erosão, degradação dos solos, alterações das margens dos rios, do fluxo, da qualidade hídrica, entre outros.

Assim, os impactos ambientais aliados a preocupação acerca do esgotamento das matérias primas finitas e não renováveis têm, de certa forma, pressionado as indústrias a buscarem materiais alternativos, visando a proteção do meio ambiente por meio de um desenvolvimento sustentável (GUIMARÃES, 2006). Neste sentido, a produção de vidros utilizando materiais como a cinza da casca de arroz como substituta da sílica proveniente da areia, pode ser uma boa solução, conforme o estudo de Silva (2020).

Uma outra solução para evitar o uso permanente de areia, visando diminuir os impactos já citados, é reutilizar os vidros já produzidos, processo este conhecido como reciclagem. Segundo a ABIVIDRO (2020), o vidro é 100% reciclável, podendo passar por esse processo infinitas vezes. Entretanto, em contraste do que acontece na Europa onde a taxa média de reciclagem é de 76% (FEVE, 2020), atualmente apenas 47% do vidro produzido no Brasil é reciclado (CEMPRE, s.d.).

Por outro lado, de acordo com a aplicação, diversas cores de vidros são produzidas, como por exemplo podemos citar as garrafas de cerveja, as quais tem coloração de todos os tipos, desde incolor até âmbar. Esta diversidade de colorações acaba limitando a utilização de vidros recicláveis, sobretudo para as soluções em que as normas exigem certa transparência e claridade. Para o caso específico da produção de microesferas, os vidros reciclados de diferentes cores podem resultar em um material não completamente incolor, variando a sua coloração dentro da faixa óptica do espectro visível.

Desse modo, o presente trabalho tem como foco a produção de microesferas de vidro a partir de garrafas comerciais de distintas colorações, utilizando um aparato de chama horizontal. Com a produção de microesferas de diferentes cores, pretende-se avaliar o impacto da coloração nas medidas de retrorefletividade. Busca-se, ainda, comparar os resultados das demais propriedades das microesferas produzidas, com microesferas comerciais de mesma dimensão, mais especificamente microesferas tipo I-B, de acordo com a norma NBR 16184:2021.

## **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo otimizar a produção e avaliar o desempenho óptico de microesferas vítreas produzidas a partir de vidros de garrafas comerciais de diferentes cores. O objetivo da produção de microesferas com diferentes colorações é avaliar a influência da cor do vidro em medidas de retrorefletividade, quando comparadas à microesferas comerciais de dimensões semelhantes. As microesferas produzidas foram otimizadas em termos de diâmetro médio para serem aplicadas em sinalização viária horizontal, mais especificamente, microesferas do tipo I-B, de acordo com a norma NBR 16184:2021.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Otimizar um sistema de produção de microesferas a partir do método de chama horizontal;
- Avaliar o rendimento das microesferas em termos morfológicos (formato esférico);
- Avaliar a transmitância na região visível do espectro eletromagnético dos diferentes vidros para estudar o efeito da coloração;

- Produzir microesferas retrorrefletoras do tipo I-B pelo método de chama horizontal a partir de vidros de garrafa coloridos;
- Avaliar a retrorrefletividade das microesferas produzidas com os vidros de diferentes cores e comparar com as microesferas comerciais de mesmo tipo

### 1.3 Justificativa

Recentemente, o Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI) da Unipampa *campus* Alegrete vem produzindo vidros a partir da casca de arroz, uma vez que este material, quando calcinado, apresenta alto teor de dióxido de silício, que é o principal elemento na produção de vidros comuns. Tratamentos químicos e/ou adição de óxidos permitiram gerar vidros incolores, entretanto, sem o tratamento ou a adição de um óxido específico, o vidro produzido apresenta uma coloração avermelhada, quando fabricado em temperaturas em torno de 1200° C. Esta coloração é característica da presença de óxido de manganês, presente na casca de arroz. Considerando que tais vidros feitos com a cinza da casca de arroz podem ser aplicados para a sinalização viária, este trabalho visa avaliar se a coloração do vidro de fato afeta a retrorrefletividade de microesferas aplicadas a sinalização viária horizontal, mais especificamente, microesferas do tipo I-B, conforme a norma NBR 16184:2021. Além disso, este trabalho permite avaliar a possibilidade de produção das microesferas utilizando vidros reciclados, de forma a avaliar se a cor das garrafas é um fator limitante em termos de retrorrefletividade.

### 1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

1. **Introdução:** neste capítulo é apresentado uma elucidação do tema que o trabalho abordará, o assunto estudado, seus objetivos, assim como, a sua justificativa;
2. **Revisão bibliográfica:** neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica da literatura existente em termos dos conceitos pertinentes ao tema do trabalho, abordando ainda a produção de vidros, a geração de microesferas e a aplicação destas no ramo da engenharia civil;

- 3. Materiais e métodos:** este capítulo é composto pelos procedimentos, processos, materiais e equipamentos utilizados na execução da proposta do trabalho, descrevendo os experimentos para produção e análise das microesferas;
- 4. Resultados:** neste capítulo serão apresentados os resultados referentes aos procedimentos experimentais descritos no capítulo 3;
- 5. Considerações finais:** este último capítulo refere-se à análise e considerações finais do trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Conforme os objetivos apresentados no capítulo 1, buscou-se as definições existentes, a matéria prima usual de vidros, os métodos usuais de produção de microesferas, conceitos relacionados a sinalização viária, a utilização das microesferas na área da engenharia civil e pesquisas relacionadas ao tema.

### **2.1 Sinalização Viária**

Os primeiros registros acerca da utilização de sinalização de caminhos e vias, ainda que rudimentares, datam do período pré-histórico, em que os homens utilizavam de pegadas deixadas no solo ou marcas em tronco de árvores ou rochas indicando os caminhos percorridos por estes povos de característica nômade (MORAES, 2002).

Com o posterior desenvolvimento da humanidade e o advento e popularização dos automóveis, segundo Moraes (2002), tornou-se necessária uma maior organização dos usuários das vias. Assim, buscando uma ordenação consistente e segura do sistema de trânsito, surgiu o primeiro manual de sinalização de tráfego, em 1903 na Inglaterra (MORAES, 2002). A partir de então, inúmeras convenções, manuais e leis buscaram universalizar as simbologias, resultando no Sistema Uniforme de Sinais de Trânsito, utilizado até hoje nos países agregados da Convenção de Viena de 1968 (CASTILHO, 2009).

No Brasil, o Código de Trânsito Brasileiro, instaurado pela lei nº 9.503 de 23 de setembro de 1997, é a diretriz que rege o trânsito das vias terrestres abertas à circulação de todo o território nacional, apresentando as normas e padrões a serem seguidos, mais especificamente acerca da sinalização viária no seu Anexo II (CTB, 1997).

De acordo com o Código de Trânsito Brasileiro, a sinalização pode ser definida, basicamente, como:

Conjunto de sinais de trânsito e dispositivos de segurança colocados na via pública com o objetivo de garantir sua utilização adequada, possibilitando melhor fluidez no trânsito e maior segurança dos veículos e pedestres que nela circulam (CTB, 1997, Anexo I).

Logo, de acordo com a definição do Código de Trânsito Brasileiro, a sinalização viária é uma importante ferramenta que auxilia na organização e bom funcionamento do sistema da via, buscando a segurança e o fluxo, não apenas dos veículos como também dos pedestres. Além

disso, segundo o DNIT (2010), a sinalização implementada em uma rodovia atua ordenando acerca das obrigações, limites e proibições de seus usuários, advertindo sobre situações de perigo e, orientando no tocante a direções e posicionamentos a serem seguidos. Tais pontos visam conquistar a atenção e a confiança dos usuários da via, permitindo-lhes um tempo de reação adequado, com a devida segurança e conforto.

Buscando atender todos os preceitos e objetivos anteriormente citados, o artigo 87 do Código de Trânsito Brasileiro (1997) classifica os sinais de trânsito em seis categorias, de acordo com suas características, sendo eles:

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

Ainda assim, independentemente do modo de sinalização, os sinais de trânsito devem atender a alguns requisitos fundamentais como, por exemplo: serem necessários à via ou trecho da via; estarem em local adequado permitindo tanto a visibilidade quanto o tempo de reação apropriado; transmitirem uma mensagem explícita e de fácil entendimento; e chamarem a atenção dos usuários (FONTANA, 2005).

Se tratando especificamente da sinalização viária horizontal, segundo o DNIT (2010, p. 219) esta pode ser definida como: “Conjunto de marcas, símbolos e legendas aplicados sobre o revestimento de uma rodovia, de acordo com um projeto desenvolvido, para propiciar condições adequadas de segurança e conforto aos usuários.”

Assim, embasado pela definição acima pode-se interpretar que a sinalização viária horizontal tem como finalidade, basicamente, transmitir a mensagem aos usuários por meio de marcas e sinais aplicados sobre a própria pista de rolamento. Em vista disso, segundo Branco (1999), as principais informações que o condutor recebe durante o trânsito são de natureza visual. Logo, ainda segundo o autor, devido ao fato de os motoristas concentrarem a sua atenção na pista de rolamento, as marcas presentes no próprio pavimento são as informações que mais rapidamente são captadas e assimiladas.

Dessa forma, além dos princípios pertinentes a todos os sinais de trânsito apresentados na anteriormente, este tipo de sinalização também atua auxiliando no sentido que o fluxo deve seguir, na orientação dos deslocamentos de acordo com a geometria da via, na complementação

da sinalização vertical ou até mesmo regulamentação dos casos previstos na ausência desta (DNIT, 2010).

No mesmo sentido, para Robertson *et. al.* (2012), as marcações no pavimento podem ser consideradas um dispositivo essencial no controle de tráfego, atuando como delimitador das pistas, canalizando o fluxo de sentidos opostos e identificando pontos onde a ultrapassagem é permitida. Entretanto, segundo o DNIT (2010), apesar deste tipo de sinalização apresentar grandes vantagens, a sua durabilidade é comprometida pela ação das condições climáticas e do desgaste oriundo do tráfego, sendo, dessa forma, fundamental mantê-la com a devida manutenção, conseqüentemente, em bom estado de conservação.

Além de sua manutenção periódica, Fontana (2005) ressalta que, dada a sua importância, deve-se utilizar os materiais apropriados com as características e propriedades necessárias, visando assegurar as condições de visibilidade e durabilidade da sinalização, de acordo com as normativas técnicas específicas. Para que seja possível proporcionar tal visibilidade mesmo em condições adversas, a demarcação com tinta comum não é suficiente, dessa forma, de acordo com Branco (1999, p.36) “para que as exigências de visibilidade sejam cumpridas, durante o dia, é fundamental haver um bom contraste, entre a sinalização e o pavimento; para a boa visibilidade noturna, é necessária a retrorefletividade”.

No mesmo sentido, conforme Mazzoni *et. al.* (2019), durante a noite, a importância da sinalização viária horizontal é potencializada, visto que a orientação do condutor se baseará, basicamente, pela iluminação, advinda dos faróis do carro, sobre a pista de rolamento. Assim, ainda segundo a autora, para proporcionar a visibilidade noturna da demarcação horizontal, faz-se necessário que a luz emitida pelos faróis do veículo incida na sinalização e retorne a fonte emissora. Tal característica pode ser amplificada se a sinalização proporcionar uma boa retrorefletividade.

## **2.2 Retrorefletividade**

A reflexão pode ser definida do seguinte modo:

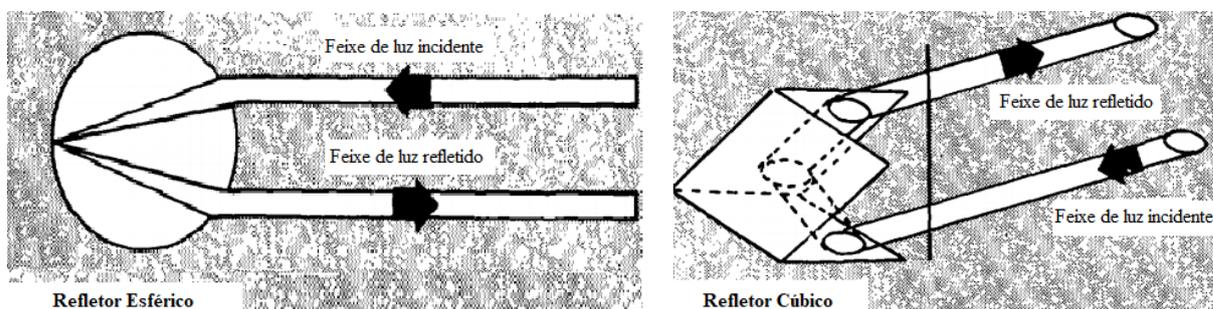
A reflexão é o efeito da radiação retornando da interface em seu meio de origem, sendo que a frequência de seus componentes monocromáticos permanece as mesmas. É um fenômeno natural da luz e acontece quando um corpo se aproveita da luz gerada por outro. (SCHWAB, 1999, p. 46)

Assim, em outras palavras, a reflexão nada mais é do que um dos efeitos da incidência de iluminação em um meio, ou seja, a partir de uma fonte emissora de luz, as superfícies dos corpos presentes no meio onde a luz incidiu, desviam os feixes de seu sentido e direção originais. Assim, de acordo com a forma com que estes feixes são desviados, pode-se distingui-las em três categorias: reflexão difusa; reflexão especular; e retrorreflexão (SCHWAB, 1999).

Desse modo, resumidamente, Schwab (1999) explica que a reflexão difusa é uma característica intrínseca das superfícies rugosas, o que faz com que raios de luz sejam refletidos em várias direções. Em contrapartida, na reflexão especular, a luz incidida em superfícies lisas é refletida em uma única direção, com o ângulo de reflexão em relação a normal da superfície igual ao ângulo de incidência da luz emitida pela fonte em relação a mesma normal.

Por outro lado, segundo McGee e Piatini (2002), a retrorreflexão é definida como o fenômeno em que a luz advinda de uma fonte é refletida na direção de sua própria origem, sendo que este tipo de reflexão só é possível através de refletores esféricos e cúbicos de canto, como é possível observar na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de refletores capazes de retrorrefletirem a luz.



Fonte: Adaptado de McGee e Paniati (1998, p.3).

No mesmo sentido, como citado na seção anterior, a retrorrefletividade é uma característica necessária das demarcações viárias, visto que somente por meio dela a porção da luz incidente dos faróis do veículo retrorrefletem na sinalização horizontal, retornando em direção aos olhos do motorista, possibilitando dessa forma, a visibilidade mesmo a noite ou em condições adversas. Logo, para a sinalização viária, necessita-se de materiais que possibilitem esse tipo de reflexão.

A retrorreflexão pode ser medida e expressará a capacidade de um material refletir a luz ao seu elemento de origem (fonte), na unidade milicandela/lux/m<sup>2</sup>, chamado de coeficiente de retrorreflexão (RL). Este pode ser medido em diferentes distâncias de visualização, normalmente a 15 m ou 30 m do referencial.

Desse modo, de acordo com Schwab (1999, p.34), “para as esferas retrorrefletirem luz, duas propriedades são necessárias: transmitância e esfericidade. Esferas feitas de vidro transparentes têm ambas as propriedades[...]”. Em vista disso, uma opção possível e eficaz a agregar aos materiais de demarcação viárias horizontais são as microesferas de vidro transparentes.

### **2.3 Microesferas de vidro na sinalização viária**

A norma brasileira que especifica e regula os parâmetros técnicos de qualidade das esferas e microesferas de vidro utilizadas para sinalização horizontal viária é a NBR 16184:2021. Assim, de acordo com a definição da norma, as microesferas de vidro são definidas como as esferas vítreas com diâmetro igual ou inferior a 1000  $\mu\text{m}$ , sendo que tanto as esferas, quanto as microesferas, podem ser classificadas quanto ao seu uso e aplicação em:

- Tipo I-A, V e VI: neste grupo as microesferas e esferas são agregadas às massas termoplásticas antes de sua aplicação, permanecendo imersas nas pinturas até que ocorra o desgaste da película aplicada, promovendo, conseqüentemente, a retrorreflexão. O tipo I-A é constituído de microesferas variando seu diâmetro entre 710 e 75  $\mu\text{m}$ . Por outro lado, os tipos V e VI, em especial, são destinadas à locais com condições adversas de clima, sendo constituídas de esferas (diâmetro superior a 1000  $\mu\text{m}$ );

- Tipo I-B: da mesma forma que no tipo I-A, neste grupo as microesferas são agregadas antes da aplicação do material na via, permanecendo internas à película aplicada até que ocorra o seu desgaste. Todavia, as microesferas desse tipo são indicadas para a utilização com tintas ou plástico a frio, sendo que seu diâmetro deve variar de 212 a 63  $\mu\text{m}$ .

- Tipos II-A, II-B, II-C, II-D, II-E, III e IV: neste grupo as esferas e microesferas são aplicadas por aspersão, simultaneamente a aplicação da tinta ou termoplástico, permanecendo na superfície da película aplicada e, conseqüentemente, gerando a retrorreflexão imediata. Os tipos III e IV, em especial, destinam-se à locais com condições adversas de clima;

- Tipo VII: neste grupo as microesferas são aplicadas também por aspersão, sendo especificada, porém, para pistas de aeroportos ou locais onde a visibilidade da sinalização deva ser máxima.

Ainda de acordo com a norma, as esferas e microsferas devem atender requisitos e especificações quanto a natureza do vidro, ao teor de sílica, aparência e defeitos, índice de refração, densidade de massa, entre outras propriedades físico-químicas (NBR 16184, 2021).

No mesmo sentido, de acordo com Smadi *et. al.* (2014), a habilidade de uma demarcação viária com microsferas em refletir a luz depende de muitos fatores, os quais são função não apenas das propriedades do vidro, mas do conjunto da demarcação como um todo, após a aplicação na via. Assim, conforme o mesmo autor, a retrorrefletividade dependerá do tamanho das microsferas, do seu índice de refração, da sua esfericidade, claridade, revestimento, material aglutinante, condições da superfície do pavimento, quantidade e incorporação na marcação viária.

Dessa maneira, apresentados os tipos existentes de microsferas classificadas de acordo com a NBR 16184:2021, é válido salientar que o presente trabalho se aterá as microsferas do tipo I-B, visto que o aparato disponível para a produção das microsferas limita a produção a este diâmetro.

### **2.3.1 Microesferas tipo I-B e suas especificações**

Como apresentado anteriormente, as microsferas destinadas a sinalização viária são classificadas de acordo com o diâmetro, a forma de aplicação, bem como as condições do local onde será empregada. Logo, as do tipo I-B, também sendo denominadas de “premix”, se diferenciam por serem aplicadas a tinta ou plástico antes mesmo de que ocorra o processo de demarcação da via, fazendo com que as microsferas permaneçam inertes no interior da sinalização até que ocorra o desgaste da superfície e tornem-se expostas (DNER-373, 2000).

As microsferas do tipo I-B devem possuir, de acordo com a NBR 16184:2021, diâmetros menores que 300 µm, possuindo uma granulometria que se estende basicamente de 212 a 63 µm em concordância com a Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria microesferas tipo I-B

<b>Peneira</b>	<b>Abertura <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>% Passante Tipo I-B</b>
<b>50</b>	<b>300</b>	100
<b>70</b>	<b>212</b>	85 – 100
<b>80</b>	<b>180</b>	
<b>100</b>	<b>150</b>	15 – 55
<b>200</b>	<b>75</b>	
<b>230</b>	<b>63</b>	0 - 10

Fonte: Elaboração própria (NBR 16184:2021).

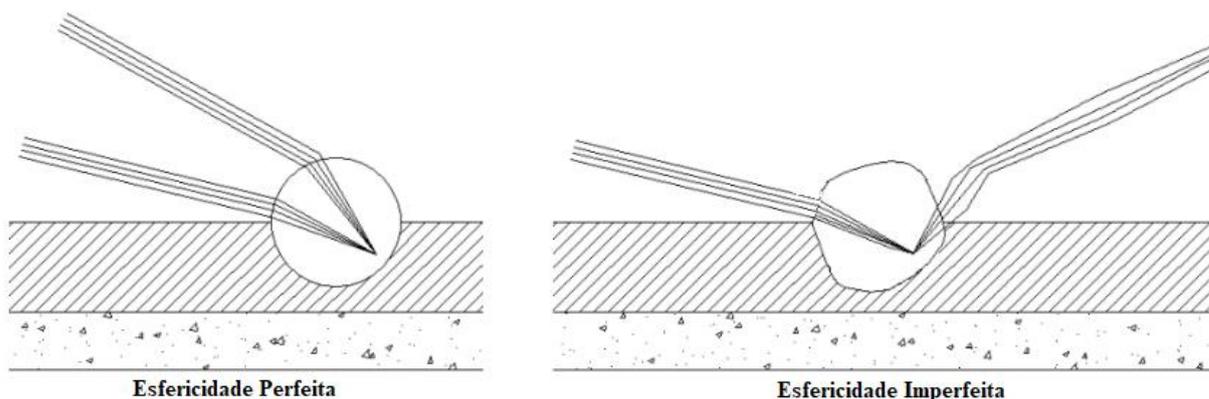
Da mesma forma, Schwab (1999) apresenta mais alguns preceitos necessários para que ocorra a adequada retrorreflexão de microesferas. Segundo a autora, além da necessidade de o diâmetro estar de acordo com o material utilizado para a demarcação, é imprescindível, para um bom desempenho, que as microesferas sejam perfeitamente esféricas, transparentes, não geminadas e sem quebras. Em relação a este tema, a NBR 16184:2021 apresenta que, para o tipo I-B, as amostras de microesferas devem:

- Serem limpas, claras, redondas e incolores;
- Possuírem um percentual máximo de 3% de microesferas quebradas, partículas de vidro não fundido e elementos estranhos;
- Possuírem um percentual máximo de 20% de microesferas ovoides, geminadas ou bolhas gasosas.

No mesmo sentido, o Texas Department of Transportation (TxDOT, 2004), defende a importância da claridade e esfericidade das microesferas para que seja possível ocorrer a retrorreflexão da luz. Ainda segundo o autor, a transparência e claridade são características necessárias para que ocorra a passagem da luz através da esfera, apontando que microesferas menos transparentes, de certa forma, bloqueiam uma parte da luz de entrar.

Em consonância, Schwab (1999, p.34) afirma que “a esfericidade é necessária pois as esferas atuam como lentes côncavas concentrando os raios de luz num único ponto focal, localizada na parte posterior da esfera e perto do seu plano médio”. Dessa forma, se as microesferas não forem devidamente esféricas, os feixes de luz serão dispersos, acarretando a reflexão difusa ou especular, como é possível observar na Figura 2.

Figura 2 - Exemplificação da reflexão de acordo com a esfericidade.



Fonte: Adaptado Machado (2019, p. 46).

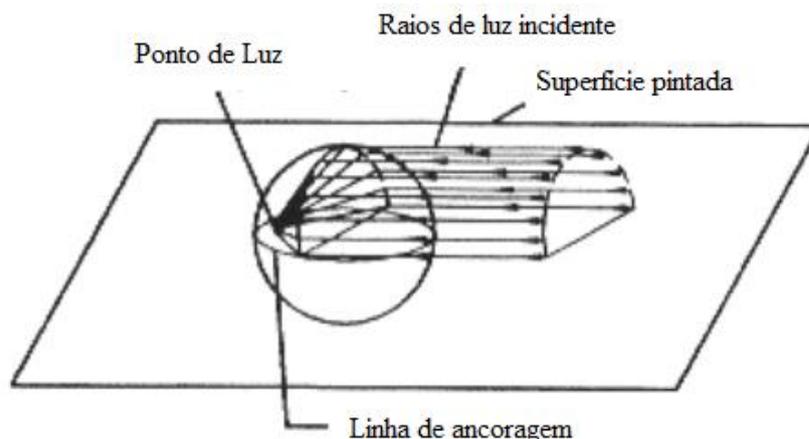
A NBR 16184: 2021 ressalta, que além de todos esses fatores pertinentes à aparência das microesferas, estas devem resistir aos agentes externos sem que ocorra o embaçamento de sua superfície, assim, a norma apresenta os ensaios de resistência ao cloreto de cálcio, ao ácido clorídrico, a água e ao sulfeto de sódio. Ainda de acordo com a norma, para o tipo I-B, algumas propriedades devem ser atendidas como índice de refração mínimo de 1,5 e densidade entre 2,4 e 2,6 g/cm<sup>3</sup>.

Voltando-se para o conjunto tinta e microesferas que compõem as demarcações, deve-se atentar a fatores como o número de microesferas, visto que tanto a baixa quanto a alta quantidade são prejudiciais ao efeito de retrorefletividade, causando, respectivamente, a sua insuficiência ou a transferência da luz incidente para as esferas vizinhas desviando o feixe de luz (SCHWAB, 1999).

De acordo com a especificação técnica de sinalização estatigráfica horizontal, para microesferas do tipo I-B utilizadas com tinta à base de resina acrílica retrorefletorizada, deve-se utilizar a proporção de 200 a 250 g de microesferas para cada litro de tinta de demarcação viária (BHTRANS, 2014). Por outro lado, de acordo com o Detran/PR (s.d.), a tinta, estando úmida, deve ser aplicada em uma espessura variando entre 0,4 e 0,9 mm.

Outro fator determinante na retrorefletividade de uma sinalização viária composta de microesferas é a ancoragem destas na superfície pintada. De acordo com Schwab (1999), devido ao fato da luz incidente tomar a forma de um semicírculo luminoso na parte posterior da esfera a uma altura de aproximadamente 60% de seu diâmetro, como é possível observar na Figura 3, valores de ancoragem próximos desta relação produzem melhores resultados em termos de retrorefletividade.

Figura 3 - Ancoragem de microesferas na pintura.



Fonte: Adaptado de Migletz; Fish; Graham (1994, p. 28).

Em relação a valores de retrorrefletividade, o DNIT 409/2017 (2017, p.3) define retrorrefletividade inicial como o “valor de retrorrefletividade da sinalização viária avaliada até 15 dias após a aplicação na via”. Por outro lado, a retrorrefletividade residual é definida pelo valor de retrorrefletividade passado o tempo de avaliação da retrorrefletividade inicial.

Dessa forma, de acordo com a Norma DNIT 100/2018, os valores mínimos de retrorrefletividade inicial e residual que devem ser respeitados variam de acordo com a coloração e característica da sinalização (provisórias ou definitivas), sendo avaliados na demarcação após a aplicação desta na via.

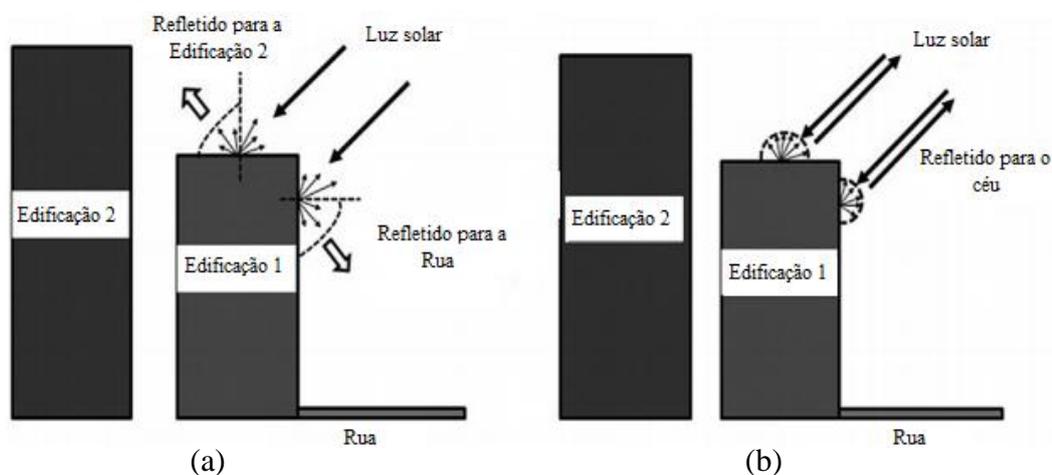
## 2.4 Outras aplicações de microesferas na construção civil

Além da sinalização viária, alguns estudos vêm avaliando a utilização de microesferas na pintura de edificações a fim de diminuir os impactos causados pelo fenômeno das ilhas de calor. Assim, Pérez *et. al.* (2017) cita que o uso de materiais refletivos em telhados tem diminuído a temperatura das edificações atuando no conforto térmico das residências. Por outro lado, durante o inverno o calor advindo da fonte solar será dissipado, impedindo que a edificação aqueça. Entretanto, ainda de acordo com o autor, os benefícios promovidos pelo uso de materiais refletivos no verão são maiores que as desvantagens da reflexão durante o inverno, principalmente em locais com condições climáticas quentes e temperadas.

Todavia, os materiais refletivos convencionais produzem a reflexão difusa ou especular, o que de fato diminui a temperatura interna da edificação, porém acarreta a reflexão da radiação solar para as residências vizinhas, promovendo o fenômeno das ilhas de calor (PÉREZ *et. al.*, 2017).

No mesmo sentido, de acordo com Yuan (2018), o calor emitido pelas paredes externas de um edifício é responsável por uma grande parcela do calor residual das ilhas de calor, devido ao fato dos prédios possuírem alta reflexão, sobretudo difusa e especular em sua superfície. Ainda segundo o autor, uma possibilidade para o melhoramento desta característica das edificações é a utilização de microesferas de vidro agregadas a pintura externa das construções, buscando retrorreflexão da luz solar (YUAN, 2018). Assim, com o uso de materiais retrorreflexivos este problema é resolvido, visto que a energia incidente é lançada na direção de incidência como é possível observar na Figura 4.

Figura 4 - Edificação com reflexão difusa (a); Edificação com retrorreflexão (b).



Fonte: Adaptado Yuan, J.; Farnham, C.; Emura, K (2015, p. 108).

Segundo o estudo de Meng *et. al.* (2015), o uso de materiais retrorreflexivos em telhados de casas diminuiu a temperatura interna em média 7° quando comparado ao sistema convencional. No mesmo sentido, Rossi *et. al.* (2015) analisou o potencial de materiais retrorreflexivos em centros urbanos, chegando à conclusão de que o uso destes materiais reduz a temperatura do ar e da rua, melhorando as condições climáticas urbanas e mitigando os efeitos das ilhas de calor. Todavia, o autor cita ainda que esta tecnologia ainda está em desenvolvimento, sendo necessário mais estudos acerca da temática.

## 2.5 Produção de microesferas

De acordo com Silva (2020), pode-se produzir microesferas de vidro por meio de quatro métodos distintos:

I – Por queda gravitacional;

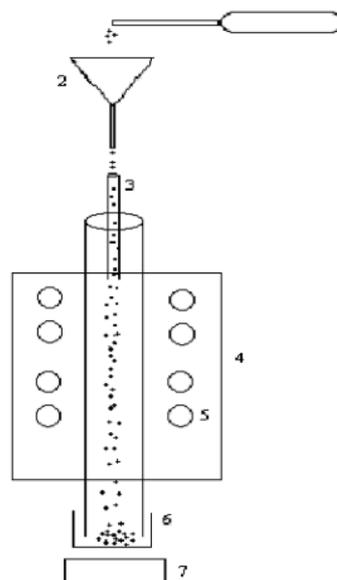
- II – Por flutuação de pós;
- III – Por plasma-*spraying*; e
- IV – Por chama horizontal.

Independentemente do método utilizado, os princípios para a produção das microesferas são os mesmos. Assim, Shelby (2005) explica que devido ao fato do vidro fundido se comportar como líquido, caso ocorra a queda livre destas gotas de vidro derretido, a partir de uma distância suficiente, estas assumirão uma forma esférica por consequência da ação das forças de tensão da superfície.

No mesmo sentido, o autor cita ainda que é possível obter tais esferas de vidro por meio do aquecimento de pequenas partículas de cacos de vidro moídos, os quais, ao serem submetidos a um aumento de temperatura em conjunto a um deslocamento vertical ou horizontal, se tornarão esferas antes de sua solidificação, assim permanecendo após seu resfriamento (SHELBY, 2005).

Partindo desse princípio, Barros Filho (2012) apresenta o método por queda gravitacional, no qual a matéria prima, ou seja, as partículas de vidro moído, são submetidas a queda livre em um tubo vertical aquecido lateralmente por meio de um forno tubular. Desse modo, o pó de vidro depositado na parte superior do tubo vertical é submetido simultaneamente a força gravitacional (deslocamento) e ao aumento da temperatura, adquirindo assim a forma de microesferas, as quais são coletadas na parte inferior do tubo como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Esquema do método por queda gravitacional.



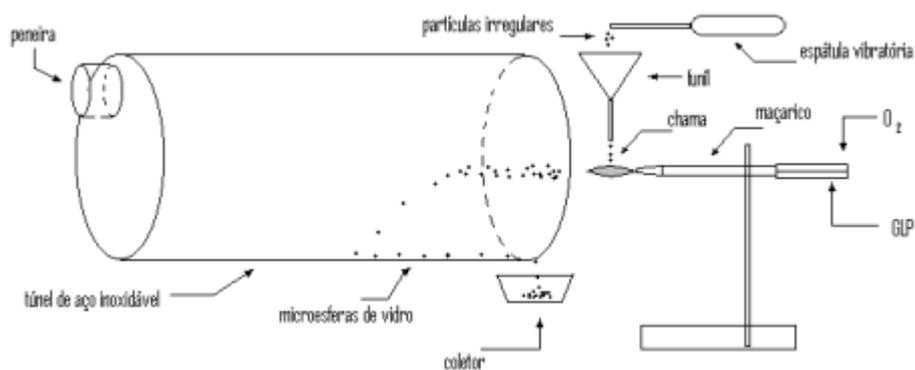
Fonte: Adaptado Barros Filho (2012, p.45).

Tong *et. al.* (2009) enunciou a produção de microesferas de vidro por meio do método da flutuação de pós, no qual o vidro previamente preparado é colocado no recipiente onde é insuflado até um forno vertical de alta temperatura sendo recolhidos no fundo do forno por um recipiente de coleta também insuflado. Nota-se que esse método se assemelha muito ao método por queda gravitacional, obtendo, porém, microesferas de diâmetros menores, entre 1 e 30 $\mu\text{m}$ .

Outro método que utiliza da gravidade para produção de microesferas de vidro, desta vez aliada ao uso de um gás e a tecnologia de plasma, é apresentado por Bessmertnyi *et. al.* (2001), sendo denominado como o método plasma-*spraying*. Nesse método específico, o pó de vidro é inserido diretamente no queimador de plasma, onde devido a altas temperaturas, ele se funde, sendo dispersadas pelo fluxo de gás, formando as microesferas, as quais são coletadas no recipiente que fica abaixo do aparato. Utilizando-se deste método os autores obtiveram diâmetro maiores do que os demais métodos apresentados, variando entre 350 e 1250  $\mu\text{m}$ .

Por outro lado, no método de produção a partir da chama horizontal, o pó de vidro é dispersado sobre a chama que, simultaneamente, eleva a temperatura das microesferas e desloca-as na horizontal, devido à sua pressão da chama. Assim, como descrito por Barros Filho (2012), a chama é produzida e regulada por meio de um maçarico tendo como fonte combustível gás GLP e como comburente oxigênio. O pó de vidro que cai sobre a chama é deslocado no sentido horizontal, o que, aliado a elevação da temperatura, faz com que ocorra o processo de esferolização. A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático do aparato utilizado para a produção pelo método da chama horizontal.

Figura 6 - Aparato para produção microesferas pelo método da chama horizontal.

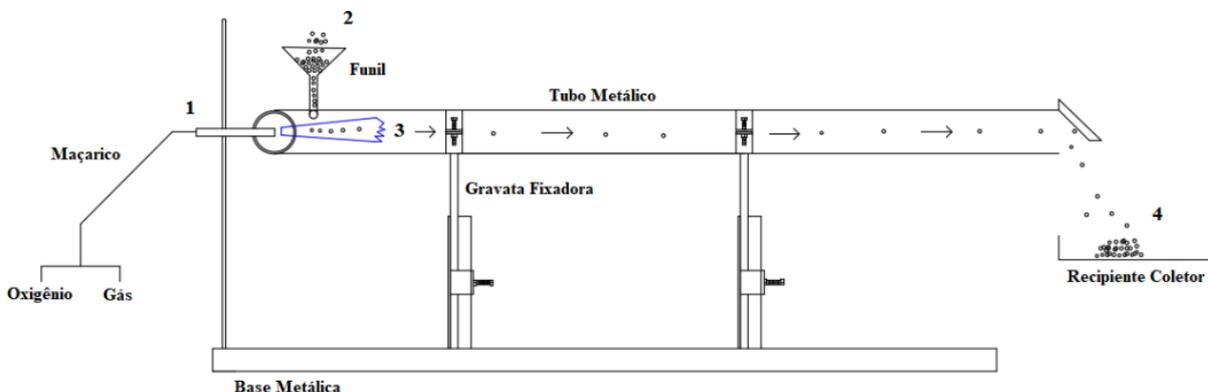


Fonte: Barros Filho (2012, p.43).

Nesse sentido, Silva (2020) utilizou-se dos princípios do método da chama horizontal para desenvolver um aparato capaz de produzir microesferas do tipo I-B, foco do presente

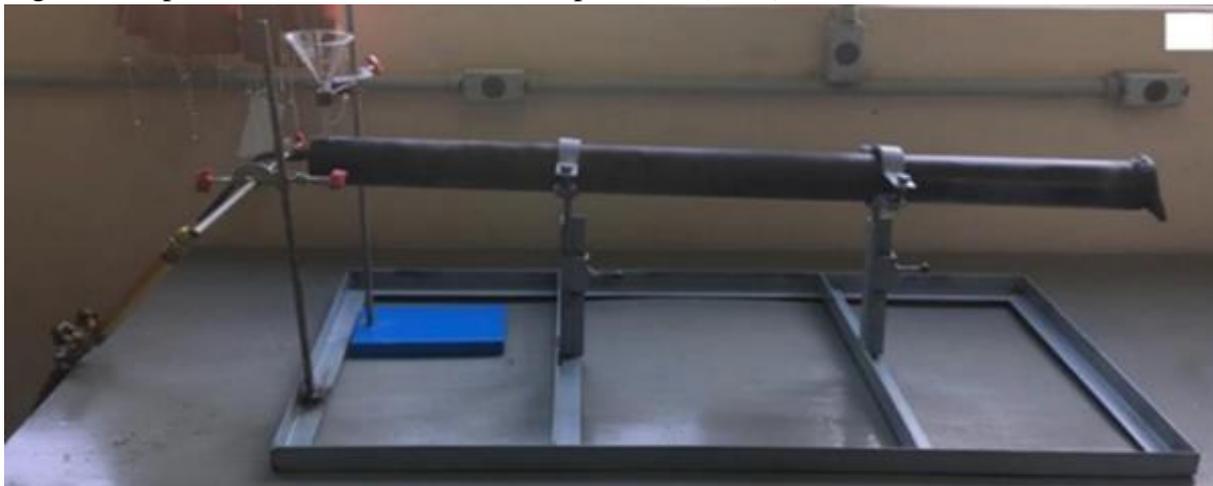
trabalho. Na Figura 7 e Figura 8 é possível observar respectivamente o esquema e o aparato desenvolvido e utilizado por Silva (2020).

Figura 7 - Esquema do aparato utilizado por Silva (2020).



Fonte: Adaptado Silva (2020, p.52).

Figura 8 - Aparato desenvolvido e utilizado por Silva (2020).



Fonte: Silva (2020, p. 43).

Em seu estudo, Silva (2020) realizou a moagem e o peneiramento dos vidros produzidos a partir da cinza da casca de arroz, dividindo-os em 8 categorias diferentes de acordo com a peneira em que os cacos ficaram retidos. Assim, utilizando do aparato por ele desenvolvido, Silva (2020) obteve bons resultados, em especial, para as amostras passantes na peneira 250  $\mu\text{m}$ , caracterizando, desse modo, o tipo I-B segundo a norma NBR – 16184:2021. Entretanto, apesar dos bons resultados em termos de geração de microesferas de vidro, o aparato demonstrou algumas limitações, como o fato de acarretar o escurecimento das microesferas geradas.

## 2.6 Produção e reciclagem do vidro

De acordo com Shelby (2005), o vidro pode ser definido como um sólido amorfo (não cristalizado, com ausência completa de ordem, simetria e periodicidade de sua estrutura atômica), exibindo uma região de transição vítrea. Ainda segundo o autor, o vidro pode ser obtido a partir de qualquer material orgânico, inorgânico ou metálico desde que, a partir de uma técnica de preparação, exiba uma transformação vítrea.

Assim, Akerman (2000) comenta que existem inúmeras formulações de vidros, porém, é possível dividi-los em grandes grupos, cada qual com suas próprias características e aplicações, sendo eles: silicatos alcalinos, sílicas vítreas, vidros alumino-borosilicatos, vidros ao chumbo, vidros borosilicatos e vidros sódico-cálcicos.

Ainda segundo Akerman (2000), os vidros sódico-cálcicos são os vidros mais antigos e mais utilizados, sendo, atualmente, a principal composição presente em garrafas, frascos, potes, janelas, entre outros artefatos. Neste grupo, especificamente, de acordo com Felisberto (2006), mais de 70% de sua composição corresponde a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), possuindo também teores significativos de óxido de cálcio e sódio ( $\text{CaO}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ).

Pokorny (2006) explica que os vidros são produzidos, em geral, a partir do aquecimento de areia de quartzo – rica em sílica – até uma temperatura acima da sua fusão, o que resulta em um vidro de alta viscosidade. A fim de solucionar os problemas relacionados a viscosidade, solubilidade e outras características não desejáveis, adicionam-se óxidos e agentes estabilizadores, no caso dos vidros sódico-cálcicos, óxido de sódio e cálcio.

Buscando a homogeneidade e isenção de poros, os ingredientes brutos, neste caso, para vidros sódico-cálcicos, majoritariamente, a areia de quartzo, o carbonato de sódio e o calcário, são fundidos em uma mistura completa. Assim, com os compostos fundidos, o vidro pode ser convertido em um sólido estável e homogêneo a partir de um processo de tratamento térmico, denominado vitrificação. Logo, após o resfriamento da mistura, obtém-se as estruturas vítreas sólidas (POKORNY, 2006).

Como citado anteriormente, a matéria prima para obtenção da sílica é areia de quartzo, sendo este o ingrediente majoritário da composição dos vidros, correspondendo a mais de 70% de sua composição. Assim, devido ao fato de ser a principal matéria prima para a produção de vidros, faz-se necessário a extração de grandes quantidades de areia quartzítica, as quais são extraídas do meio ambiente através das reservas minerais naturais (ARMELINI; FERNANDES, 2004).

Nesse sentido, segundo o Sumário da Mineração Brasileira (2017), em razão da areia natural advir de processos intempéricos sofridos pelas rochas, as suas reservas minerais são relativamente abundantes em todo o planeta. Entretanto, em locais onde há uma demanda muito grande por esse material, ocorre a escassez local ou regional, como a exemplo de grandes centros urbanos, ou seja, regiões metropolitanas (ANM, 2017).

Assim, embora seja um recurso abundante, além dos fatores relacionados a escassez local, outra problemática da extração mineral da areia está no fato da sua remoção causar impactos ambientais, comprometendo os cursos d'água. Por exemplo, em razão da extração se dar ao longo dos rios, a remoção da areia causa impactos relacionados ao escoamento da água alterando seu fluxo, velocidade e o perfil das encostas; a ecologia local com a retirada da cobertura vegetal, mudança no microclima, no habitat e na paisagem; e a qualidade hídrica (TIBIRIÇA, 2018).

Voltando-se ao vidro, segundo Amerlini e Fernandes (2004, p.3) “apesar de não poluente – produzido por matérias primas naturais que não agredem o meio ambiente – o vidro não é biodegradável, ou seja, é um material que não se decompõe”. Desse modo, tendo em vista a sua propriedade de não se decompor naturalmente, torna-se cada vez mais necessário adotar estratégias para a reciclagem dos materiais vítreos, utilizando-os para outros fins ou como matéria prima para fabricação de novos produtos.

Segundo a ABIVIDRO (2020), o vidro é um material 100% reciclável, infinitamente reutilizável. Em outras palavras, uma quantidade de vidro reciclado pode produzir a mesma quantidade de vidro novo sem a necessidade de adição de matéria prima virgem, quantas vezes forem necessárias. Entretanto apesar desta propriedade, o índice de reciclagem de vidros no Brasil, de acordo com o CEMPRE (s.d.), gira em torno de 47% para os vidros em geral, percentual este, quando comparado a porcentagem de reciclagem de vidros nos países da União Europeia, está bem abaixo, visto que, em média, cerca de 76% dos vidros são reciclados na Europa (FEVE, 2020).

Além das vantagens ecológicas promovidas pela utilização de material reciclado, segundo Armelini e Fernandes (2004), a reutilização de vidros como matéria prima gera uma redução de aproximadamente 25% da energia necessária para sintetização de novos vidros. Isto se dá pelo fato da temperatura necessária para se produzir a partir dos cacos de vidro reciclado ser menor do que a necessária para se obter o mesmo vidro por meio das matérias prima usuais.

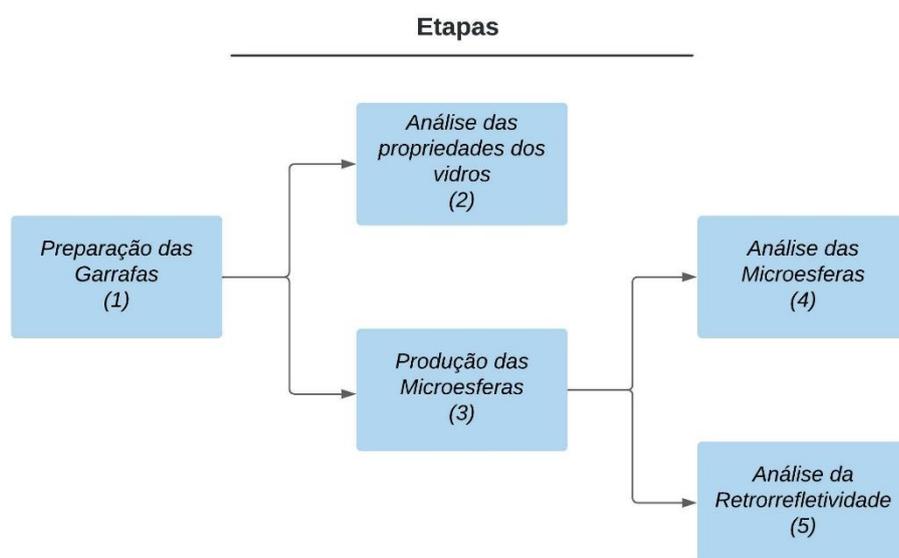
Entretanto, ainda de acordo com as autoras, um dos fatores que levam as empresas à ainda utilizarem matéria prima virgem está no fato de que a produção utilizando uma

composição inteiramente de vidro reciclado (percentual de 100%) gera um material menos transparente e esverdeado, que, conseqüentemente, é menos valorizado pelo mercado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

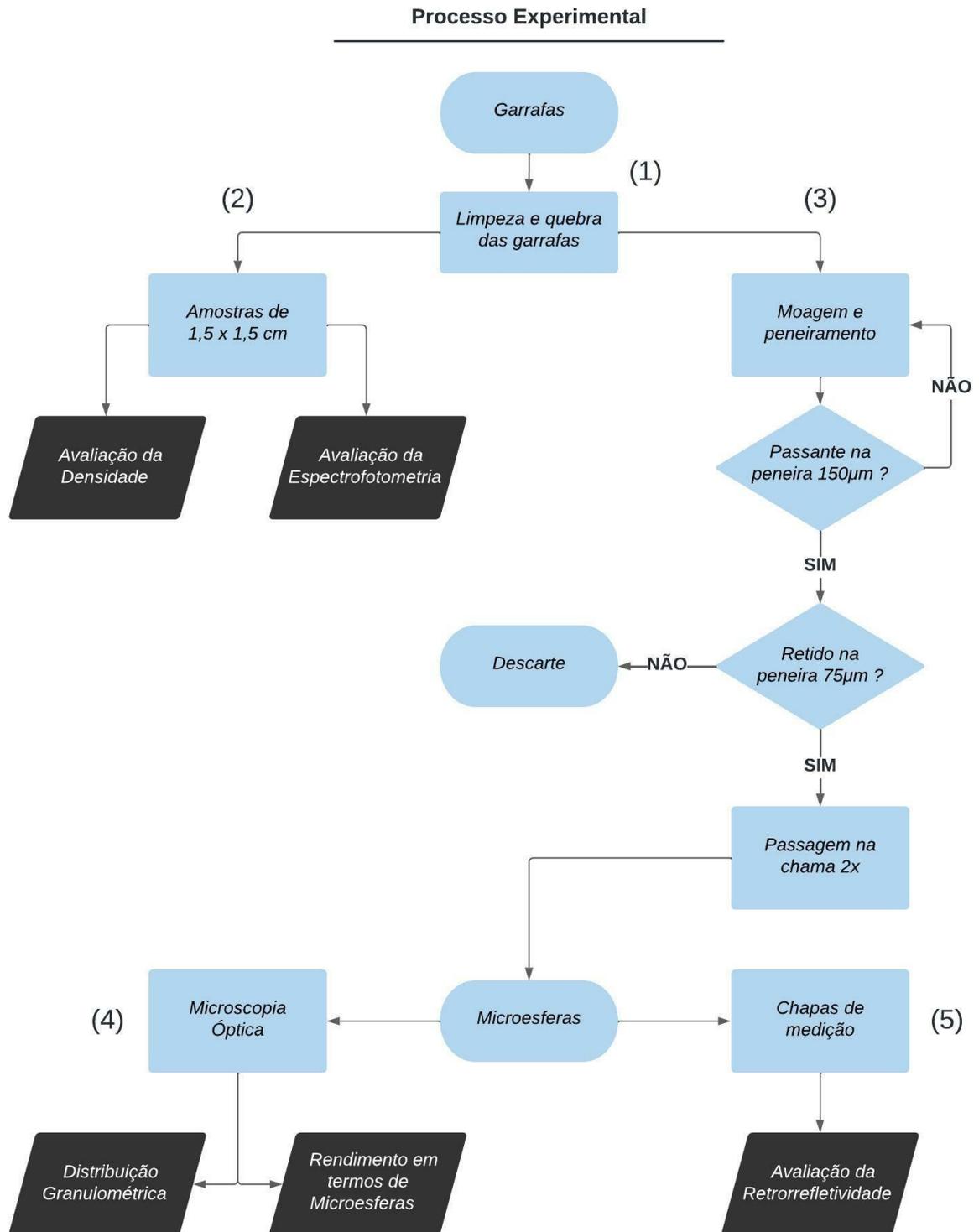
O procedimento experimental do presente trabalho pode ser dividido em etapas e processos experimentais com os quais buscou-se obter os dados almejados. Assim, dividiu-se as etapas e os procedimentos necessários sequencialmente, os quais são apresentados na Figura 9 e Figura 10 por meio de fluxogramas esquemáticos.

Figura 9 - Etapas do procedimento experimental.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 - Fluxograma esquemático do processo experimental.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.1 Vidros

#### 3.1.1 Materiais e equipamentos

Como matéria prima para a produção das microesferas foram utilizadas garrafas de cerveja do tipo *long neck* com as seguintes cores: verde, incolor, âmbar e azul. A fim de obter uma menor variabilidade de produtos, para cada cor, foram coletadas garrafas da mesma marca e, quando possível, do mesmo lote. Na Figura 11 é possível observar as garrafas escolhidas para a produção das microesferas.

Figura 11 - Garrafas utilizadas na produção das microesferas.



Fonte: Elaboração própria.

Foram utilizadas estas garrafas por terem cores diferentes e satisfazerem alguns critérios da NBR 16184:2021. Dentre eles, em relação a natureza do vidro, segundo Akerman (2000), as garrafas são constituídas de vidro sodo-cálcicos, estando de acordo com o critério da norma para microesferas do tipo I. Da mesma forma, o teor de sílica está de acordo com o mínimo estabelecido pela norma (65%), visto que, de acordo com Pokorny (2006), o teor de sílica de garrafas é de aproximadamente 71,25%. No mesmo sentido, segundo Giacomini (2005), o índice de refração para vidros sódico-cálcicos é em torno de 1,52, valor este maior que o mínimo estabelecido pela norma para o tipo I-B (1,5).

No preparo do material, para a moagem dos cacos de vidro foi utilizado o pistilo e almofariz de cerâmica do laboratório do grupo de Óptica, Micro e Nano fabricação de

Dispositivos (GOMNDI) da Universidade Federal do Pampa – *campus* Alegrete, apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Pistilo e almofariz.



Fonte: Elaboração própria.

Para o peneiramento dos cacos e das microesferas foram utilizadas as peneiras 200 (abertura 75  $\mu\text{m}$ ) e 100 (abertura 150  $\mu\text{m}$ ) de análise granulométrica da marca “a bronzinox” disponibilizadas pelo mesmo laboratório, apresentadas na Figura 13.

Figura 13 - Peneiras.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.2 Métodos

Os vidros coletados foram devidamente preparados, limpos e isentos de quaisquer impurezas por meio de uma limpeza com água e detergente, sendo retirados os rótulos e adesivos, como é possível verificar na Figura 14.

Figura 14 - Garrafas de vidro limpas.



Fonte: Elaboração própria.

Logo, com as garrafas devidamente preparadas e secas, os vidros de cada coloração foram quebrados e moídos separadamente com o auxílio do pistilo e almofariz com o objetivo de deixar os cacos com tamanho condizente das peneiras utilizadas. Na Figura 15 é possível observar os cacos de vidro moído no almofariz.

Figura 15 - Vidro moído da garrafa azul.



Fonte: Elaboração própria.

Para garantir que as microesferas sejam formadas e que a faixa de diâmetro escolhida seja atendida, os cacos de vidro moído foram peneirados. Neste sentido, de acordo com a NBR 16184:2021, as microesferas do tipo I-B deverão ter diâmetro menor que 300  $\mu\text{m}$ . Logo, baseando-se na norma e nos resultados obtidos por Silva (2020) em seu estudo, utilizou-se, na produção das microesferas, os cacos de vidro passantes na peneira 150  $\mu\text{m}$  e retidos na peneira 75  $\mu\text{m}$ .

No processo de peneiramento, os cacos foram peneirados por aproximadamente 3 minutos em movimentos repetidos para frente e para trás com leves batidas, permitindo que todo o material circulasse pela tela da peneira. Assim, os materiais retidos na peneira com abertura de 150  $\mu\text{m}$  eram submetidos ao processo de moagem novamente, a fim de diminuir o seu tamanho. Por outro lado, o material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$  era descartado, visto que devido ao fato de possuir um tamanho muito pequeno, as microesferas produzidas a partir destes não atenderiam as especificações granulométricas previstas na norma. Desse modo, os cacos de cada cor de vidro passantes na peneira 150  $\mu\text{m}$  e retidos na 75  $\mu\text{m}$  eram separados para a produção das microesferas, como é possível observar na Figura 16.

Figura 16 - Cacos de vidro verde durante o peneiramento.



Fonte: Elaboração própria

## 3.2 Produção das microesferas

### 3.2.1 Materiais e equipamentos

Para a geração das microesferas de vidro optou-se pelo melhoramento do aparato que vinha sendo utilizado pelo grupo GOMNDI, desenvolvido por Silva (2020) em seu estudo. Logo, o aparato até então utilizado pelo grupo era constituído de um tubo metálico com um funil de vidro em sua parte superior, no qual era possível depositar o pó de vidro diretamente sobre a chama do maçarico, conforme é possível observar na Figura 17.

Figura 17 - Aparato utilizado pelo GOMNDI.

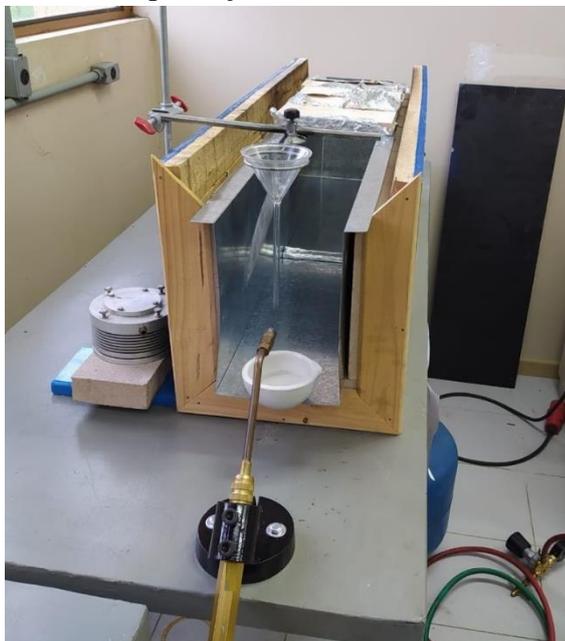


Fonte: Elaboração própria

Entretanto, devido algumas limitações do aparato, principalmente no que se refere ao escurecimento das microesferas devido a colisão nas paredes deste *setup*, no presente trabalho as microesferas foram produzidas em um *setup* diferente do utilizado por Silva (2020). Assim, o novo *setup* é constituído de uma caixa retangular de compensado plastificado, na qual são acomodados tijolos refratários em seu fundo e paredes laterais. Os tijolos são cobertos, ainda, por uma chapa única de aço galvanizado, que abrange tanto o fundo, quanto as paredes laterais do aparato. A fim de evitar que ocorra a perda demasiada das microesferas produzidas foram colocados tijolos refratários envoltos em papel alumínio na parte superior e uma chapa de aço

galvanizada na extremidade do aparato. Na Figura 18 é possível observar o novo *setup* utilizado na produção das microesferas de vidro. As dimensões e demais detalhes do aparato utilizado estão descritos no apêndice A.

Figura 18 - Novo setup utilizado na produção das microesferas de vidro.



Fonte: Elaboração própria.

Para a produção da chama, foi utilizado um botijão de gás liquefeito de petróleo (GLP) de 13kg e um cilindro de oxigênio (O<sub>2</sub>) de 1 m<sup>3</sup>. Por meio de mangueiras, os gases abastecem o maçarico tipo chuveirinho de latão de alta resistência multi-chama oxigênio-GLP, o qual fora fixado na bancada, visando a reprodutibilidade do processo de produção das microesferas. Nas figuras 19 e 20 é possível visualizar os equipamentos utilizados para a produção da chama.

Figura 19 - Maçarico do tipo chuveirinho de latão e suporte de fixação.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 - Cilindro de gás oxigênio (a); Botijão de GLP (b).



Fonte: Elaboração própria.

### 3.2.2 Métodos

Com o material devidamente peneirado, passou-se para o processo de produção das microesferas a partir do aparato descrito. Primeiramente, regulou-se a saída do gás combustível e do gás comburente que abasteciam o maçarico. Assim, foi adotada a pressão de 1 Kgf/cm<sup>2</sup> para o gás GLP e 2 Kgf/cm<sup>2</sup> para o oxigênio, sendo que tais valores foram escolhidos baseando-se nos preceitos utilizados por Silva (2020).

Com os gases de abastecimento devidamente regulados, os registros eram abertos e a chama acesa a partir da ignição de um fósforo. Com a chama acesa, regulava-se, nas válvulas do maçarico, a quantidade de gás e oxigênio até o momento em que a chama apresentasse uma coloração azul na saída do maçarico, como é possível verificar na Figura 21.

Figura 21 - Chama do maçarico.



Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, na sequência do processo, os cacos eram depositados no funil de vidro que os despejava diretamente na chama provinda do maçarico. Após a passagem dos cacos pela chama, eram coletadas as microesferas formadas, sendo respeitada a marca de aproximadamente 50 centímetros a contar o bico do maçarico. Optou-se por coletar o material a partir desta marca visando evitar a coleta dos cacos que não passaram corretamente pela chama, ou seja, que não se tornaram microesferas. Repetiu-se o processo de passagem dos cacos pela chama duas vezes, a fim de produzir uma amostra com um percentual maior de microesferas, ainda conforme a metodologia de Silva (2020). A Figura 22 mostra as microesferas produzidas no aparato.

Figura 22 - Microesferas produzidas a partir do método da chama horizontal.



Fonte: Elaboração própria.

Foram produzidas cerca de 20 gramas de microesferas para cada coloração estudada. Assim, buscou-se repetir todo o processo de preparo e produção de maneira igual para cada garrafa, visando a menor variabilidade possível e de modo que as condições de formação das microesferas fossem as mesmas para cada cor de vidro. Na Figura 23 é possível visualizar as microesferas das 4 cores distintas produzidas a partir das garrafas *long neck*.

Figura 23 - Microesferas azuis (a); Microesferas incolores (b); Microesferas âmbar (c); Microesferas verdes (d).



Fonte: Elaboração própria.

### 3.3 Avaliação da microscopia óptica

#### 3.3.1 Materiais e equipamentos

Para avaliar o rendimento do material que passou pela chama, em termos de formação, aparência e dimensões das microsferas, foi utilizado o microscópio óptico trinocular. O equipamento disponibilizado pelo laboratório do GOMNDI na Universidade Federal do Pampa – *campus* Alegrete é da marca Laborana, modelo MTM-3030. Este microscópio possui 3 tubos oculares o que permite a conexão de um destes com uma câmera CCD. Na Figura 24 é possível observar o microscópio utilizado na microscopia óptica das microsferas.

Figura 24 - Microscópio óptico trinocular.



Fonte: Elaboração própria.

Logo, a câmera pode ser ligada ao computador onde, com o auxílio do software ISCapture, as imagens são captadas e analisadas. Desse modo, com o auxílio das ferramentas dispostas no software, torna-se possível efetuar a medida dos diâmetros das microesferas, bem como avaliar a existência de cacos, elementos estranhos e microesferas ovoides ou fundidas, conforme prevê a norma NBR 16184:2021.

### 3.3.2 Métodos

Desse modo, primeiramente separou-se uma pequena quantidade de amostra de microesferas espalhando-as sobre a platina do microscópio, de modo que estas ficassem bem distribuídas e não houvesse a sua sobreposição, como é possível observar na Figura 25.

Figura 25 - Microscópio durante a análise das microesferas.



Fonte: Elaboração própria.

O microscópio utilizado permite fazer imagens nos modos transmissão e reflexão. Para a análise das microesferas foi utilizado o modo transmissão, na qual a fonte de luz fica na base do microscópio. As imagens foram feitas através da câmera do microscópio que era conectada ao notebook, onde, por meio do software ISCapture, tornava-se possível visualizar a amostra. Desse modo, ajustava-se o foco através dos parafusos macrométricos e micrométricos até o momento em que houvesse uma imagem nítida da amostra analisada.

Após ajustar a imagem, efetuava-se a calibração do software de acordo com a lente objetiva utilizada, visando realizar a medição dos diâmetros das microesferas. A calibração era efetuada de acordo com a quantidade de pixels que uma imagem capturada do software possuía. Assim, multiplicando os pixels por um fator que varia de acordo com o aumento da lente objetiva utilizada – apresentados na Tabela 2 – calibrava-se o software.

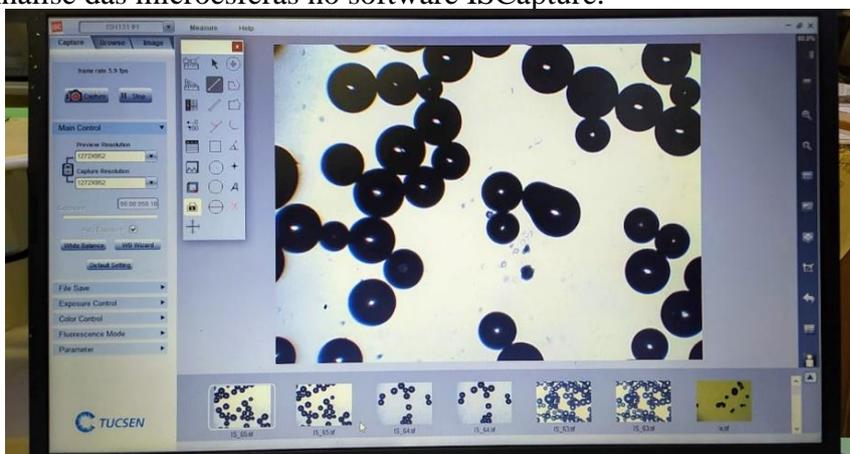
Tabela 2 - Fator de calibração.

<b>Aumento da lente objetiva (x)</b>	<b>Coefficiente</b>
5	0,89
10	0,45
20	0,22
50	0,09
80	0,05

Fonte: Perez e Menezes (2016).

Uma vez calibrado, era possível medir todas as microesferas presentes na platina, registrando os diâmetros destas em uma planilha do excel. Vale salientar, que se efetuava a leitura apenas dos diâmetros das microesferas esféricas, com o objetivo de determinar o diâmetro médio. Porém, as microesferas ovóides, fundidas ou cacos de vidro eram contadas em separado a fim de, posteriormente, calcular a sua porcentagem na amostra analisada. Neste sentido, para cada coloração de vidro, foram contabilizadas uma amostra representativa de pelo menos 1000 microesferas, quantificando tanto as perfeitamente esféricas, quanto as ovóides e os cacos de vidro. Na Figura 26 pode-se visualizar as microesferas no software ISCapture durante a análise no microscópio óptico.

Figura 26 - Análise das microesferas no software ISCapture.



Fonte: Elaboração própria.

### 3.3.3 Distribuição granulométrica das microesferas

Após a contagem e a medição dos diâmetros, os dados obtidos na microscopia óptica para as microesferas produzidas das 4 cores de garrafa e para as microesferas comerciais foram analisados com o auxílio do software Excel. Assim, foi avaliado o rendimento por meio da razão entre a quantidade de microesferas esféricas (mensuradas) e a quantidade total de elementos, contabilizando as microesferas tanto esféricas, quando ovoides ou cacos.

Os valores percentuais tanto em relação aos cacos e impureza, quanto a porcentagem de microesferas ovoides e fundidas, foram analisados e comparados com os valores máximos permitidos pela NBR 16184:2021 para o tipo I-B.

Além disso, as microesferas esféricas foram avaliadas, também, em relação aos diâmetros que apresentaram, calculando os valores mínimos e máximos, valores médios, desvio padrão e a distribuição dos diâmetros. Com tais valores, visando a elaboração do histograma e da curva de distribuição normal, calculou-se, primeiramente, a quantidade de classes de corte necessárias para a representação do histograma, utilizando da equação (1) e arredondando para o número inteiro acima.

$$n_c = 1 + 3,322 * \log(n) \quad (1)$$

Onde:

$n_c$  – Número de classes de corte;

$n$  – Quantidade da amostra.

Desse modo, definido o número de classes, obteve-se os valores de corte com os quais foi possível subdividir a distribuição de diâmetros entre os valores extremos a partir das equações (2) e (3).

$$\text{Incremento} = \frac{\text{Diâmetro}_{\text{máximo}} - \text{Diâmetro}_{\text{mínimo}}}{n^{\circ} \text{ de classes}} \quad (2)$$

$$\text{Diâmetro}_{\text{classe}} = \text{Diâmetro}_{\text{classe anterior ou mínimo}} + \text{Incremento} \quad (3)$$

Assim, tornou-se possível verificar a quantidade de microesferas contadas para cada intervalo de classe, possibilitando a elaboração dos histogramas de barras verticais. No mesmo

sentido, subdividindo a distribuição em 100 classes de corte e utilizando da função “*dist.norm.n*” do excel, foi possível gerar os valores referentes as curvas de distribuição normal para cada tipo de microesfera.

Ademais, por meio da porcentagem de diâmetros igual ou inferior a cada peneira disposta na Tabela 1, foi calculada a granulometria das amostras, comparando-as com os limites dispostos pela NBR 16184:2021 para o tipo I-B.

### 3.4 Avaliação da espectrofotometria UV-Vis

#### 3.4.1 Materiais e equipamentos

Para a análise das medidas ópticas dos diferentes vidros, foi utilizado o espectrofotômetro da marca Bel Engineering, modelo UV-M51 mono-feixe, apresentado na Figura 27. O equipamento funciona basicamente por meio de uma fonte de luz e um monocromador que divide a luz em comprimentos de onda individuais, ou seja, em cores diferentes que varrem do Uv (190 nm) ao infravermelho (1100 nm), passando por todo o espectro visível.

Essas medidas permitem avaliar as faixas de absorção dos diferentes vidros utilizados neste trabalho, através das medidas de transmitância, que corresponde a razão da quantidade de luz captada pelo detector ao passar pela amostra e a quantidade de luz captada pelo detector sem nenhuma amostra (referencial).

Figura 27 - Espectrofotômetro Bel Engineering UV-M5.



Fonte: Elaboração própria.

Para a realização das medidas de transmitância foi necessário medir a espessura das amostras de vidro (espessura da parede da garrafa, previamente ao processo de moagem). Esta medição da espessura foi realizada através do paquímetro universal quadrimensional da marca Pantec (Figura 28) disponibilizado pelo laboratório de metalografia da Universidade Federal do Pampa – *campus* Alegrete.

Figura 28 - Paquímetro universal.

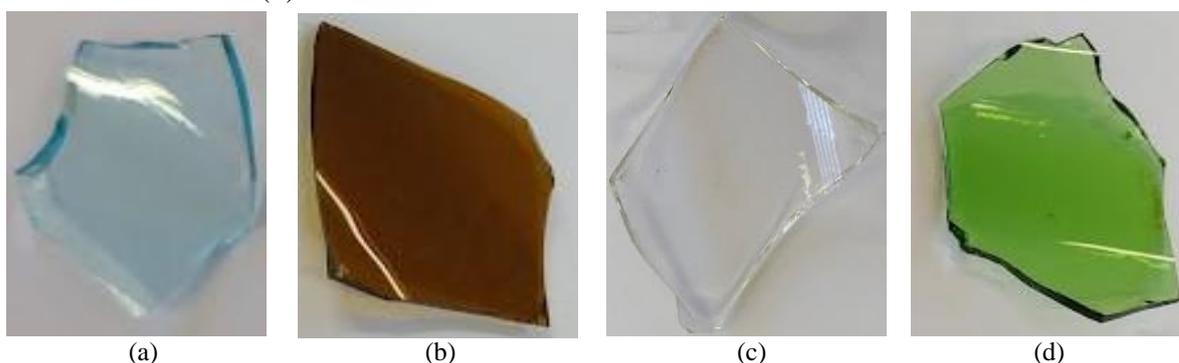


Fonte: Elaboração própria.

### 3.4.2 Métodos

Para as análises, foram separadas pequenas amostras de aproximadamente 1,5 x 1,5 cm de cada vidro utilizado, as quais não passaram pelo processo de moagem e peneiramento. É possível observar as amostras de cada vidro utilizadas na análise da espectrofotometria na Figura 29.

Figura 29 - Amostra vidro azul (a); Amostra vidro âmbar (b); Amostra vidro incolor (c); Amostra vidro verde (d).



Fonte: Elaboração própria.

As medidas foram feitas no modo transmitância na faixa visível do espectro eletromagnético, entre 400 e 700 nm. Como os vidros possuíam diferentes espessuras, fez-se necessário aferi-las para que fosse possível comparar os resultados de diferentes colorações de vidro, sem que a espessura da amostra fosse uma variável determinante. Desse modo,

primeiramente, a partir dos espectros Uv-Vis, foi calculada o coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) de cada vidro (cor) para cada comprimento de onda a partir da equação (4).

$$\alpha = \frac{-\log T}{L} \quad (4)$$

Onde:

$\alpha$  - Coeficiente de absorção ( $\text{mm}^{-1}$ );

T – Transmitância entre 0 (0%) e 1 (100%);

L – Espessura média do vidro em milímetros

Com os resultados de coeficiente de absorção, foi calculada a Transmitância para as amostras considerando uma espessura padrão de 2 mm, possibilitando a comparação entre as diferentes cores de microesferas. A equação que permite calcular a transmitância para uma mesma cor do vidro considerando a espessura constante de 2mm, é dada por:

$$T = 10^{-2\alpha} \quad (5)$$

Estes resultados serão apresentados na seção 4.1.2.

### **3.5 Avaliação da densidade**

#### **3.5.1 Materiais e equipamentos**

Pequenas amostras de cada vidro foram avaliadas em termos de densidade, por meio de uma pipeta graduada de 10 mL, um pipetador de três vias e uma proveta graduada de vidro 50 mL. Para a pesagem das amostras foi utilizada a balança analítica Marte, modelo AL 500C. Tanto a balança, quanto os demais equipamentos, foram disponibilizados pelo laboratório de Química, na Universidade Federal do Pampa – *campus* Alegrete e podem ser observados na Figura 30.

Figura 30 - Balança analítica Marte (a); Pipeta graduada, pipetador de três vias e proveta (b).



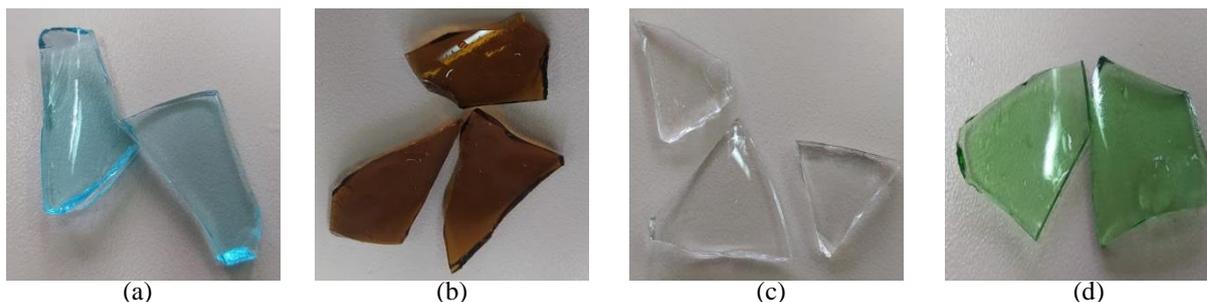
Fonte: Elaboração própria.

### 3.5.2 Métodos

A densidade das amostras de vidro foi avaliada por volume de líquido deslocado. A massa de cada vidro foi medida em uma balança analítica (Figura 30(a)). Após a medida da massa, uma proveta foi preenchida com água até a demarcação de 10 ml. Logo após, o vidro foi colocado na proveta e o volume de líquido deslocado pela amostra foi retirado com o auxílio de uma pipeta graduada, até que o volume na proveta ficasse novamente na demarcação 10ml. O volume de líquido deslocado corresponde ao volume da amostra de vidro.

Com a massa e o volume de cada amostra determinados, a densidade foi calculada a partir da relação  $d = m/v$  onde  $d$  é a densidade,  $m$  a massa e  $v$  o volume. Foram realizadas três medidas de para cada vidro, e conseqüentemente foi medido o valor médio. A Figura 31 mostra as amostras que foram utilizadas para a realização da medida de densidade. Os valores de densidade para cada coloração de vidro analisado foram avaliados e comparados com os valores dados pela norma NBR 16184:2021.

Figura 31 - Vidro azul (a); Vidro marrom (b); Vidro incolor (c); Vidro verde (d).



Fonte: Elaboração própria.

## 3.6 Avaliação da retrorrefletividade

### 3.6.1 Materiais e equipamentos

Para medir a retrorrefletividade das microesferas foi utilizado o equipamento Easylux Clássico Horizontal da Universidade Federal de Santa Maria, em colaboração com o Prof. Dr. Deividi Pereira. Com este equipamento tornou-se possível avaliar a retrorrefletância ( $R_L$ ) noturna e a visibilidade diurna ( $Q_d$ ). De acordo com o fabricante, o retrorrefletômetro está de acordo com os requisitos dispostos pela norma ABNT NBR 14723:2020, além de cumprir com todos os padrões internacionais de marcação rodoviária.

Desse modo, o aparelho disponibilizado possuía dupla geometria 15/30, ou seja, era capaz de medir, simultaneamente, na geometria de 15 e de 30 metros. As dimensões da fonte de radiação, que tem espectro de emissão equivalente a um farol de um carro, são de 9 cm largura por 17 cm de comprimento, totalizando em uma área de 153 cm<sup>2</sup>. Na Figura 32 é possível visualizar o modelo de retrorrefletômetro utilizado nas medidas de retrorrefletividade.

Figura 32 - Retrorrefletômetro horizontal clássico easylux.



Fonte: Easylux (2015, n.p.).

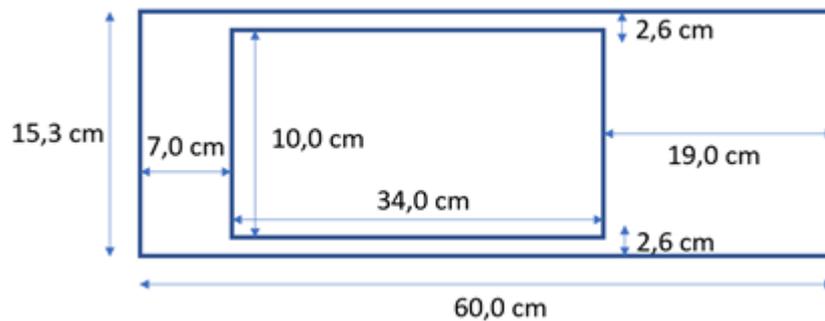
A superfície para a medida da retrorrefletividade das microesferas foi constituída a partir de uma peça de MDF de superfície branca com uma lâmina fina de fórmica de 0,8 mm colada à sua superfície e com uma abertura com área de medida de 34 x 10 cm<sup>2</sup>. Nas figuras 33 e 34 é possível observar, respectivamente, a placa de fórmica e as medidas da placa de avaliação da retrorrefletividade.

Figura 34 - Placa de fórmica com a abertura da área de medida.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 - Medidas da placa de medida.



Fonte: Elaboração própria.

Para a realização das medidas de retrorrefletividade, todo o dispositivo foi pintado com tinta preta fosca, incluindo a região da medida, objetivando avaliar única e exclusivamente o efeito da coloração das microesferas na retrorrefletividade. A Figura 35 mostra uma imagem do dispositivo (aqui a região da medida está de coloração branca para melhor visualização do aparato). Esta escolha visou diminuir o número de variáveis, visto que a opção de agregar as microesferas a tinta e aplicá-las em conjunto nas placas necessitaria de um desgaste da superfície da chapa pintada, apresentando, desse modo, variações de difícil controle como por exemplo, o nível de ancoragem das microesferas e desgaste da superfície.

Figura 35 - Retrorrefletômetro e placa de medição.



Fonte: Elaboração própria.

Para comparar os resultados obtidos pelas microesferas produzidas, em termos de retrorreflexão e percentual de microesferas, foram utilizadas como referência microesferas comerciais da marca Dragonlux tipo I-B premix. As microesferas comerciais foram adquiridas e disponibilizadas pelo GOMNDI da Universidade Federal do Pampa – *campus* Alegrete. A Figura 36 apresenta as microesferas comerciais que foram utilizadas na comparação com as microesferas produzidas.

Figura 36 - Microesferas comerciais Dragonlux.



Fonte: Elaboração própria

### 3.6.2 Métodos

Para a realização das medidas de retrorrefletividade, foram colocadas as microesferas na região de medida delimitada pelo retrorrefletômetro e pela placa de medição, considerando as especificações citadas anteriormente. Assim, embora a escolha por não utilizar as microesferas agregadas à tinta, optou-se por manter a quantidade de microesferas em gramas por litro.

Neste sentido, considerando a quantidade de 250 g/l e uma espessura média de 0,4 mm de tinta (teórica) sobre uma determinada superfície, 250 g/l equivalem a uma densidade de microesferas colocadas sobre a placa de 100 g/m<sup>2</sup>. Logo, levando em conta a área de medida da placa de 10 x 34 cm<sup>2</sup> e a densidade citada anteriormente, a massa de microesferas necessária para a medição equivale a 3,40 g. Desse modo, após a pesagem e colocação das microesferas

na área de medição, foram realizadas 8 medidas, tomando a média como sendo o valor mais representativo. A Figura 37 mostra a região da medida coberta por microesferas.

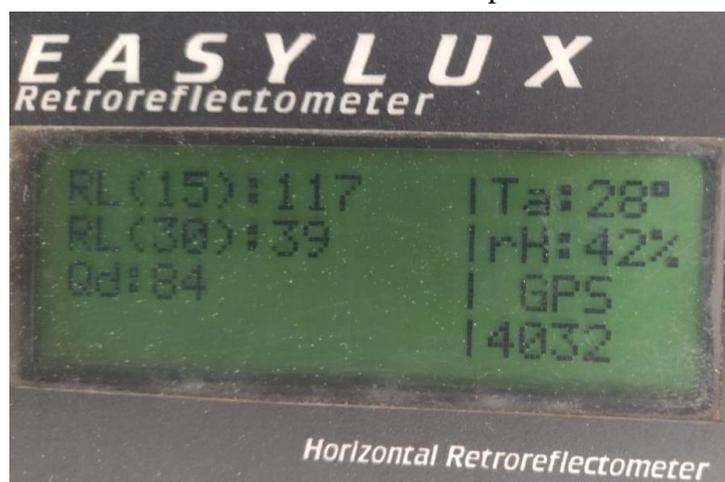
Figura 37 - Retrorrefletômetro e placa de medição durante a avaliação da retrorrefletividade.



Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, considerando as especificações do retrorrefletômetro dispostas na seção anterior, na Figura 38 é possível visualizar um exemplo de resposta após a realização da medida, onde pode-se observar os seguintes parâmetros: RL (retrorrefletância noturna) (15m); RL (30m); Qd (visibilidade diurna); Ta (temperatura ambiente); e rH (umidade relativa).

Figura 38 - Resposta do retrorrefletômetro no visor do aparelho.



Fonte: Elaboração própria.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos por meio da adoção da metodologia exposta no capítulo anterior. Assim, os resultados estão divididos em duas seções, apresentando, primeiramente, os resultados referentes aos vidros utilizados e em seguida os resultados referentes as microesferas produzidas.

### 4.1 Vidros

#### 4.1.1 Avaliação da densidade

A NBR 16184:2021 estipula os valores máximos e mínimos de densidade de massa de microesferas de acordo com o tipo de microesferas. Assim, de acordo a norma a densidade de massa para as microesferas deve atender os valores limites da Tabela 3.

Tabela 3 - Valores limites de densidade.

<b>Tipo de microesfera</b>	<b>Densidade</b>
I-A, I-B, II-A, II-B, II-C, II-D, II-E, III, IV, V e VI	2,4 g/cm <sup>3</sup> - 2,6 g/cm <sup>3</sup>
VII	4 g/cm <sup>3</sup> - 4,5 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: NBR 16184:2021

Conforme descrito na seção 3.5 do presente trabalho, foram efetuadas três medidas de densidade de cada vidro visando um resultado médio, os valores obtidos nos levantamentos são apresentados nas tabelas 4, 5, 6 e 7.

Tabela 4 - Valores medidos para o vidro azul.

<b>Vidro Azul</b>					
<b>Medição</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Volume Pipeta (mL)</b>	<b>Volume com o vidro (mL)</b>	<b>Diferença (mL)</b>	<b>Densidade (g/mL)</b>
1	2,419	10	9,08	0,92	2,63
2	2,419	10	9,04	0,96	2,52
3	2,419	10	9,06	0,94	2,57

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5 - Valores medidas para o vidro incolor.

<b>Vidro Incolor</b>					
Medição	Massa (g)	Volume Pipeta (mL)	Volume com o vidro (mL)	Diferença (mL)	Densidade (g/mL)
1	2,214	10	9,16	0,84	2,64
2	2,214	10	9,14	0,86	2,57
3	2,214	10	9,10	0,90	2,46

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Valores medidos para o vidro verde.

<b>Vidro Verde</b>					
Medição	Massa (g)	Volume Pipeta (mL)	Volume com o vidro (mL)	Diferença (mL)	Densidade (g/mL)
1	1,544	10	9,38	0,62	2,49
2	1,544	10	9,42	0,58	2,66
3	1,544	10	9,36	0,64	2,41

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 - Valores medidos para o vidro marrom.

<b>Vidro Marrom</b>					
Medição	Massa (g)	Volume Pipeta (mL)	Volume com o vidro (mL)	Diferença (mL)	Densidade (g/mL)
1	2,733	10	8,94	1,06	2,58
2	2,733	10	8,96	1,04	2,63
3	2,733	10	8,94	1,06	2,58

Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, dispondo das medidas levantadas, foi calculada a média aritmética dos valores de densidade de massa de cada vidro. Logo, foi verificado se os valores calculados atendiam aos limites dispostos na Tabela 3 (densidade entre 2,4 e 2,6 g/cm<sup>3</sup>) considerando a produção de microesferas do tipo I-B, foco deste trabalho. Na Tabela 8 é possível visualizar os valores médios de densidade de cada vidro, assim como a verificação se tais valores atendem os limites da NBR 16184:2021.

Tabela 8 - Valores médios de densidade e verificação dos limites NBR 16184:2021.

<b>Vidro</b>	<b>Densidade média (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Verificação NBR 16184:2021</b>
Azul	2,57	Atende os limites
Incolor	2,55	Atende os limites
Verde	2,52	Atende os limites
Marrom	2,59	Atende os limites

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.1.2 Avaliação dos espectros Uv-Vis

Conforme especificado no item 3.4, foi avaliada a espectrofotometria de cada vidro utilizado, a fim de analisar a correlação entre estes resultados e os resultados de retrorrefletividade de cada coloração de vidro. Primeiramente foram aferidas as espessuras de cada amostra de vidro, sendo efetuadas 7 medidas, as quais são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Espessuras das amostras de cada vidro.

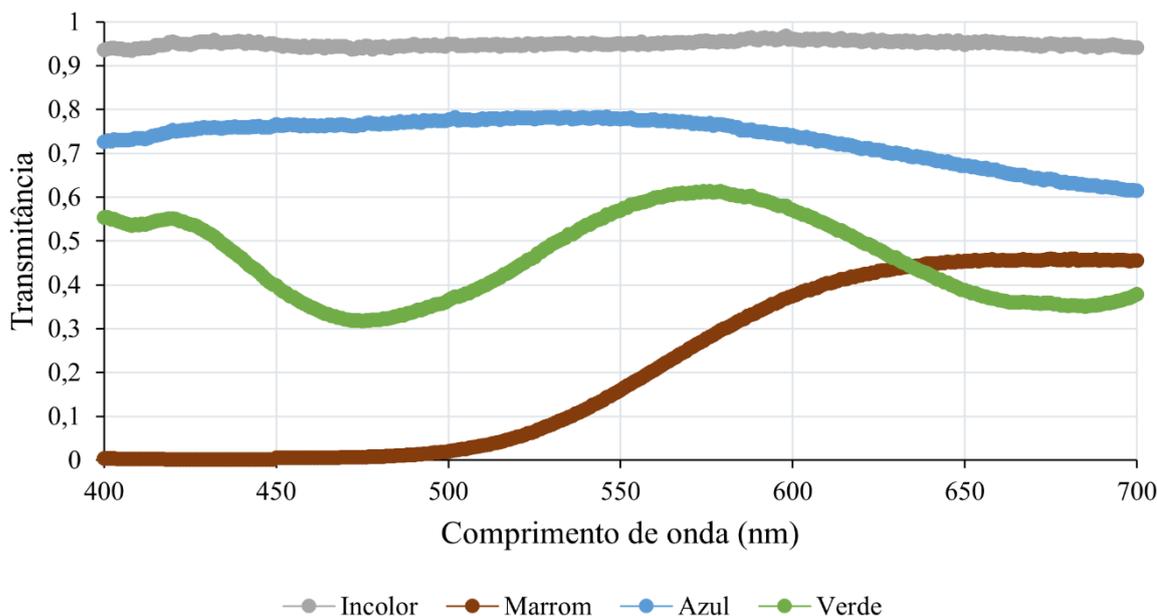
<b>Medição</b>	<b>Incolor</b>	<b>Marrom</b>	<b>Azul</b>	<b>Verde</b>
<b>1</b>	2,40 mm	2,20 mm	2,20 mm	1,90 mm
<b>2</b>	2,70 mm	2,00 mm	2,25 mm	1,85 mm
<b>3</b>	2,70 mm	1,95 mm	2,20 mm	1,85 mm
<b>4</b>	2,20 mm	2,25 mm	2,20 mm	1,60 mm
<b>5</b>	2,10 mm	2,45 mm	2,20 mm	1,70 mm
<b>6</b>	2,30 mm	2,35 mm	2,20 mm	1,85 mm
<b>7</b>	2,20 mm	2,30 mm	2,20 mm	1,85 mm
<b>Média</b>	2,37 mm	2,21 mm	2,21 mm	1,80 mm

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se que para algumas amostras de vidro as espessuras aferidas apresentaram maior variação. Isto se deve ao fato das garrafas *long neck* possuírem uma espessura não uniforme em seu casco. Como não há a exata certeza do local da amostra em que as ondas estão passando durante a medição, optou-se por efetuar várias medidas ao longo da amostra, adotando o seu valor médio. Após a aferição das espessuras de cada vidro, foram efetuadas a medidas de Uv-Vis, conforme o item 3.4, obtendo os valores de transmitância para cada comprimento de onda

no intervalo de 400 a 700 nm. Com as medidas obtidas do espectrofotômetro, foram elaborados gráficos da transmitância em função do comprimento de onda para cada cor de vidro. A Figura 39 mostra o espectro de transmitância em função do comprimento de onda, considerando uma espessura constante de 2 mm para cada cor de vidro.

Figura 39 - Gráfico de transmitância por comprimento de onda.



Fonte: Elaboração própria.

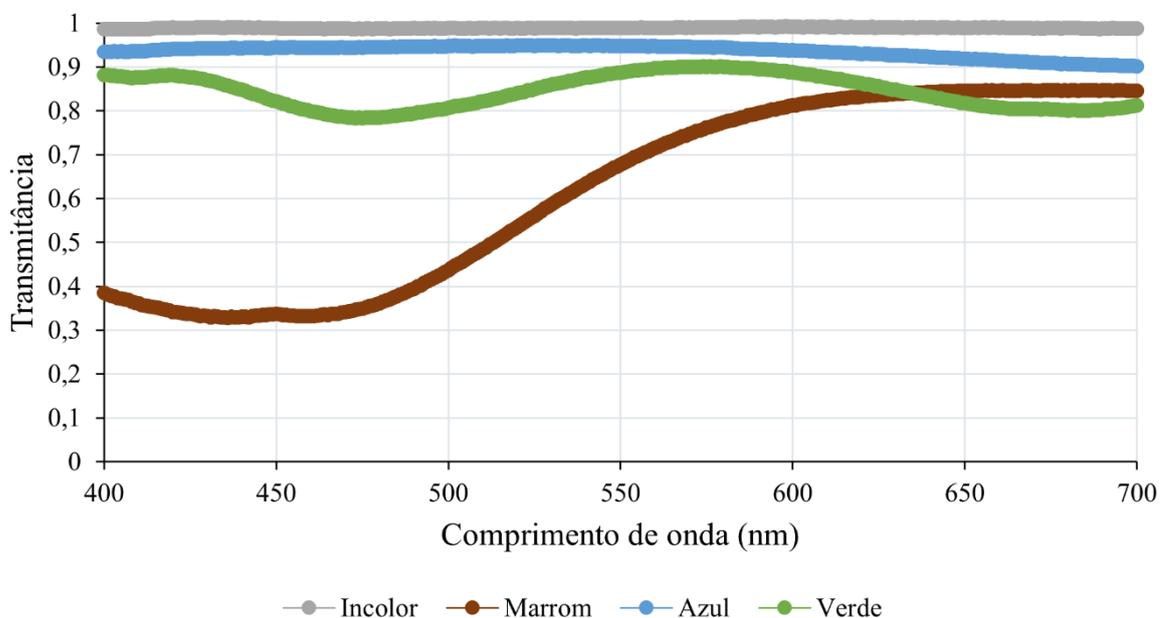
Como pode ser observado, o vidro incolor apresenta uma transmitância superior aos outros vidros coloridos, o que permite em um primeiro momento concluir que o vidro incolor deve ser o mais adequado para aplicações em sinalização viária, conforme orienta a norma NBR 16184:2021.

Desse modo, comparando o comportamento dos diferentes tipos de microesferas, nota-se que para comprimentos de onda acima de 600 nm, a diferença de transmitância entre o melhor caso (vidro incolor) e o pior caso (vidro verde) chega a 70%. Para comprimentos de onda menores, a diferença é ainda maior, de quase 100% entre o vidro incolor e o vidro marrom.

Por outro lado, embora o coeficiente de absorção não mude pois este depende do material, a absorvância muda com a espessura, conseqüentemente a transmitância também muda com a espessura. Neste sentido, para o caso das microesferas tipo I-B que devem ter diâmetros, com alto percentual, abaixo de 212  $\mu\text{m}$ , supondo que a luz, em média, atravessa duas vezes a espessura da microesfera no processo de retrorreflexão, pode-se dizer que a espessura que deve ser considerada para uma melhor análise da coloração seja em torno de 425  $\mu\text{m}$ . Sendo

assim, a Figura 40 mostra o espectro de transmitância para os mesmos vidros considerando uma espessura de 425  $\mu\text{m}$ .

Figura 40 - Espectro de transmitância considerando a espessura de 425 $\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaboração própria.

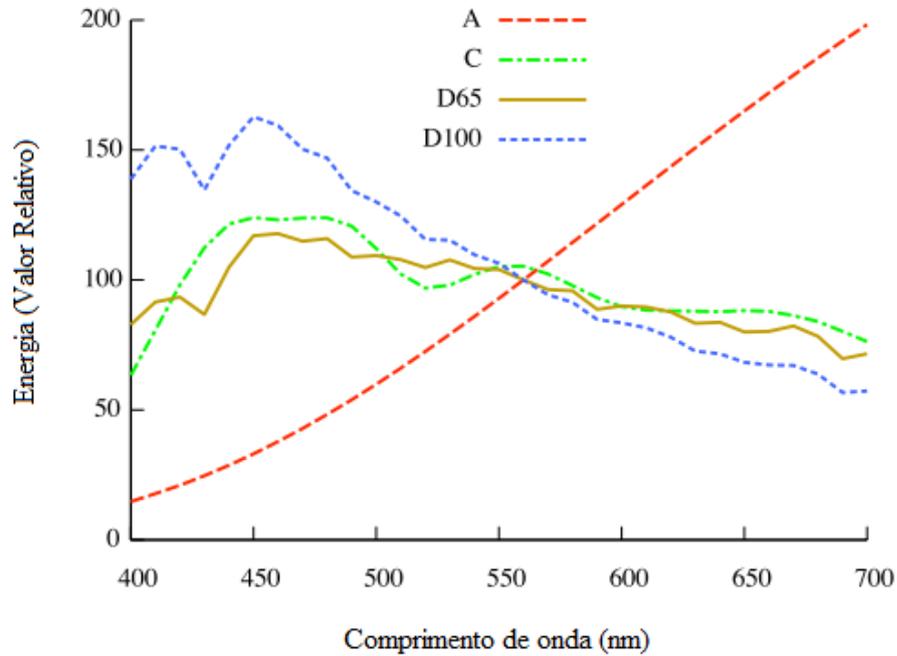
Para esta situação, observa-se que as diferenças de transmitância entre o melhor e o pior caso diminuem bastante. Mais especificamente, pode-se verificar que para comprimentos de onda acima de 600 nm, a diferença entre o melhor e o pior caso está em torno de 20%. Para comprimentos de onda abaixo de 600 nm, as diferenças aparecem de forma mais pronunciada, principalmente para o caso do vidro marrom que tem alta absorbância abaixo de 500 nm.

Por outro lado, outro fator que se deve levar em consideração é a curva iluminante representativa da fonte de emissão de luz utilizada. De acordo com o CIE (2017) *apud* Ferreira e Spricigo (2017), o iluminante pode ser definido como a incidência de uma energia luminosa teórica especificada pela sua distribuição espectral apresentada por meio de curvas de distribuição.

Desse modo, resumidamente, o iluminante descreve de forma gráfica o comportamento da certa fonte de emissão de luz teórica em relação a quantidade de energia emitida para cada comprimento de onda, caracterizando, assim, a sua coloração predominante. Nas figuras 41 e

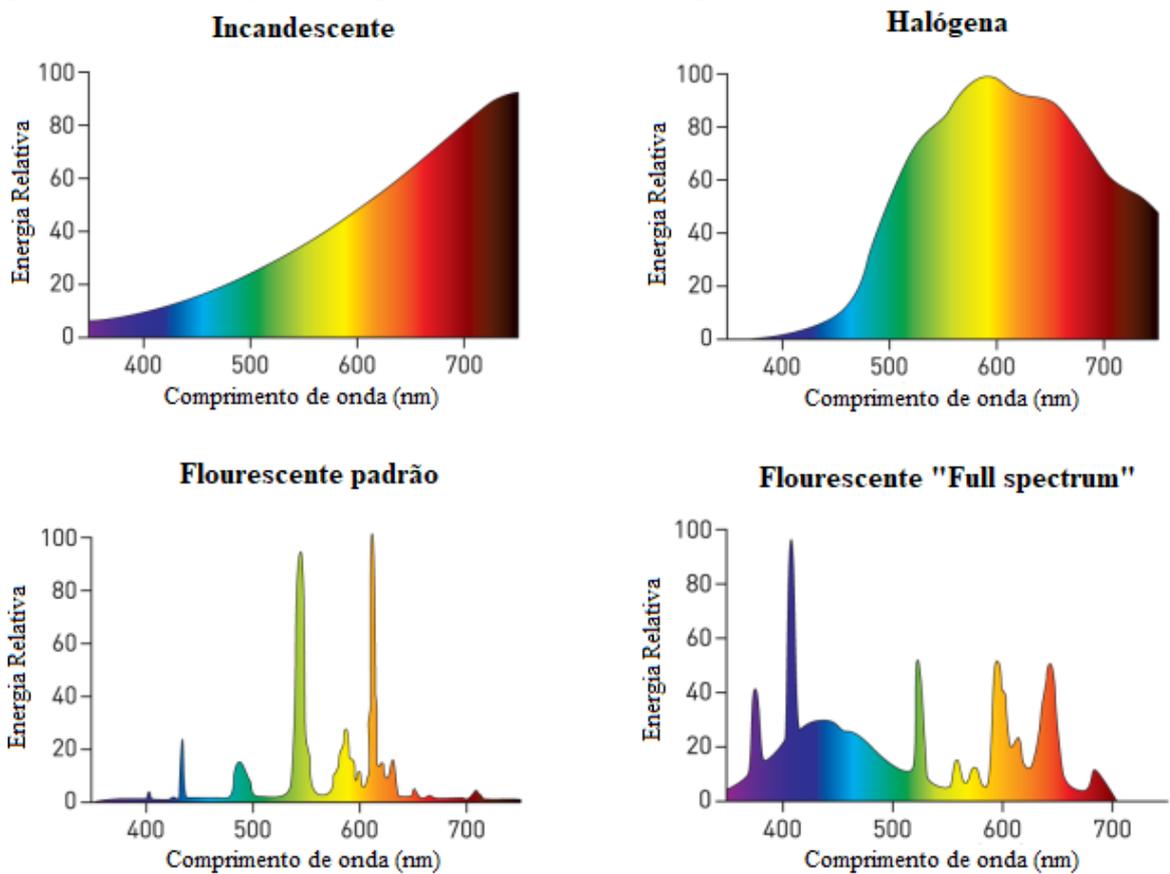
42 é possível observar, respectivamente, alguns iluminantes padrões de acordo com o CIE e as curvas de distribuição de potência espectral referentes a cada tipo de fonte de emissão.

Figura 41 - Iluminantes padrão CIE.



Fonte: Adaptado Durikovic e Kimura (2006, p.2).

Figura 42 - Distribuição dos espectros de diferentes lâmpadas.



Fonte: Adaptado Leid (2016, p.3).

A partir da análise das últimas imagens é possível concluir que a retrorrefletância vai depender fortemente da fonte. Logo, possuindo o retrorrefletômetro uma fonte de emissão com um espectro característico iluminante padrão A, pode-se inferir sobre o possível comportamento das microesferas nas medições de retrorrefletividade.

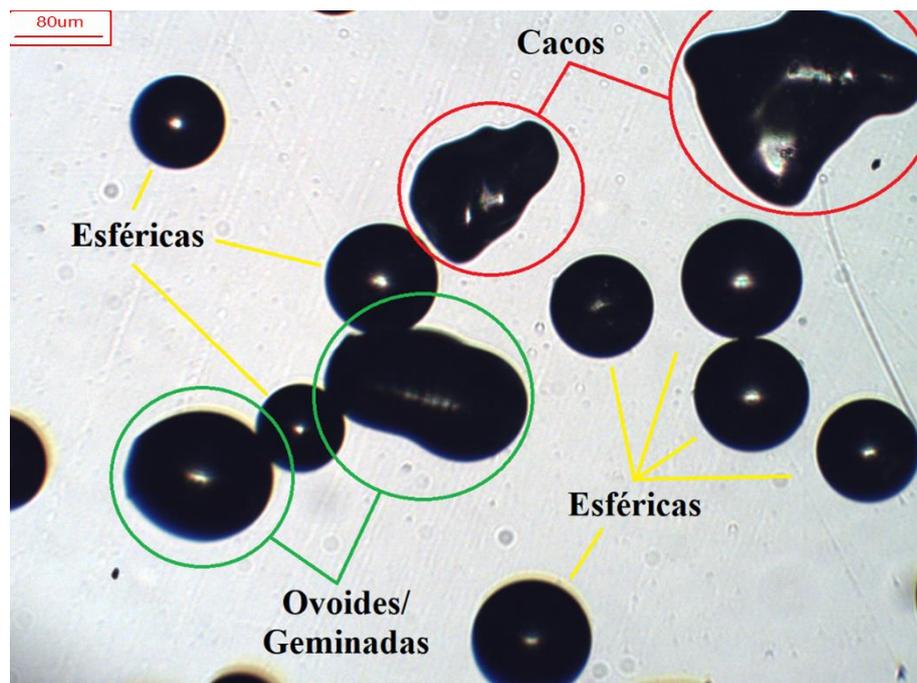
Desse modo, como foi possível observar na Figura 41 a intensidade do sinal emitido aumenta quase que linearmente, com alto coeficiente angular, acima dos 500nm e cai exponencialmente abaixo deste valor. Correlacionando este espectro de emissão com os resultados de transmitância medidos nos vidros de diferentes cores, pode-se dizer que a resposta da retrorrefletância não será fortemente influenciada de maneira negativa pela coloração dos vidros do ponto de vista espectral.

## 4.2 Microesferas

### 4.2.1 Rendimento em termos de microesferas

Em relação ao rendimento, as microesferas foram contadas de acordo com a seção 3.3 do capítulo 3, considerando as microesferas esféricas, ovoides e cacos de vidro. Na Figura 43 é possível visualizar as microesferas durante a contagem, sendo elas classificadas de acordo com a sua morfologia.

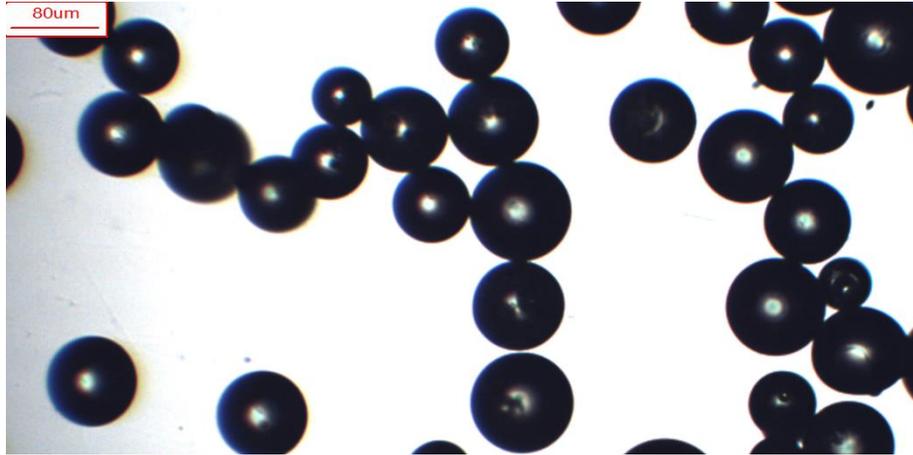
Figura 43 - Microesferas durante a microscopia óptica.



Fonte: Elaboração própria.

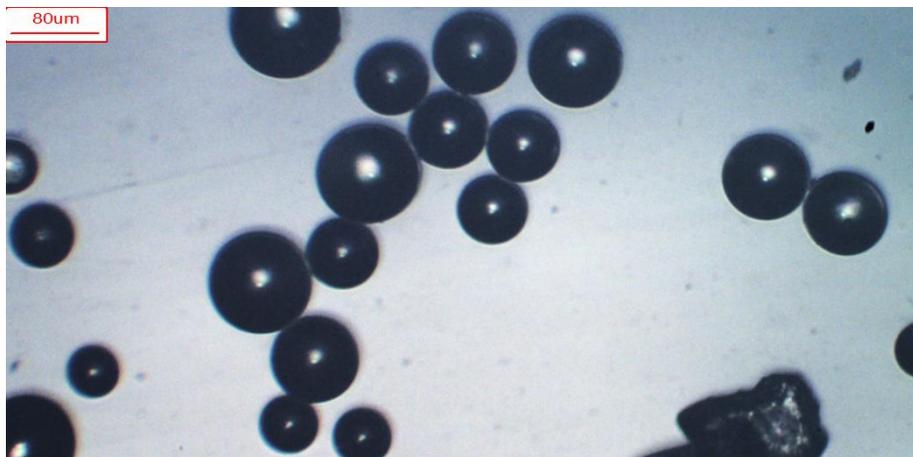
As figuras 44, 45, 46, 47 e 48 apresentam as microesferas produzidas, assim como as microesferas comerciais durante o procedimento de microscopia óptica, com as imagens obtidas a partir do software ISCapture.

Figura 44 - Microesferas incolores durante o processo de microscopia óptica.



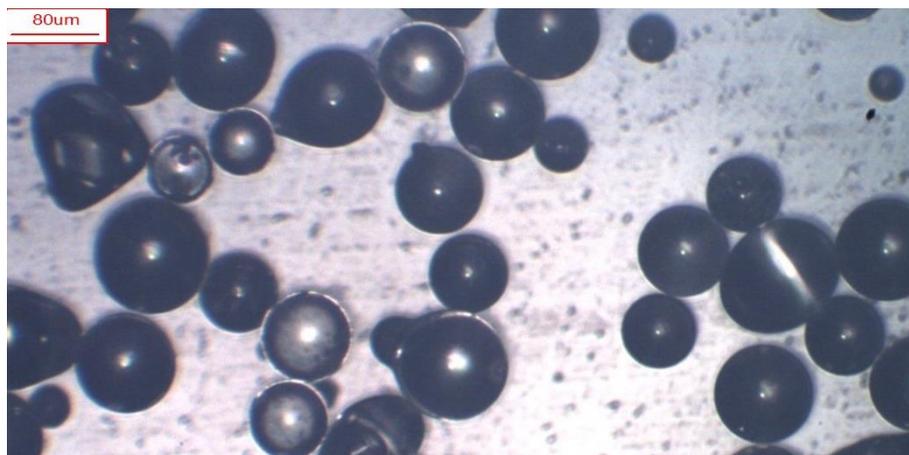
Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 - Microesferas marrons durante o processo de microscopia óptica.



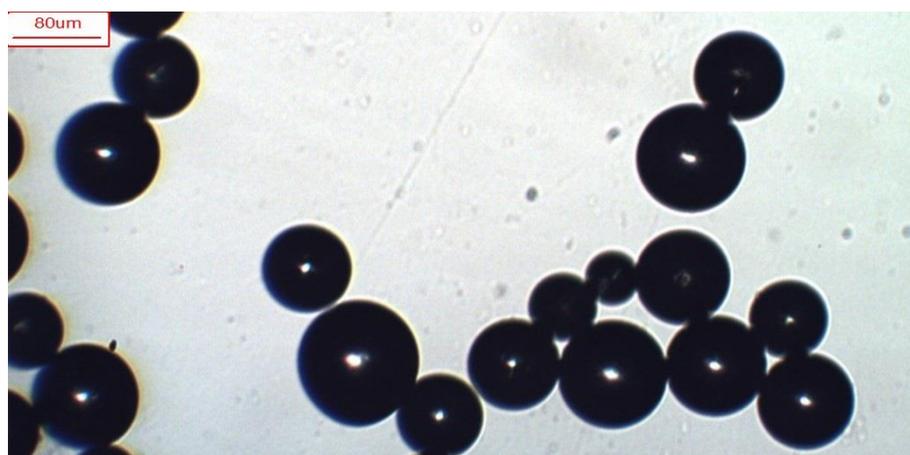
Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 - Microesferas verdes durante o processo de microscopia óptica.



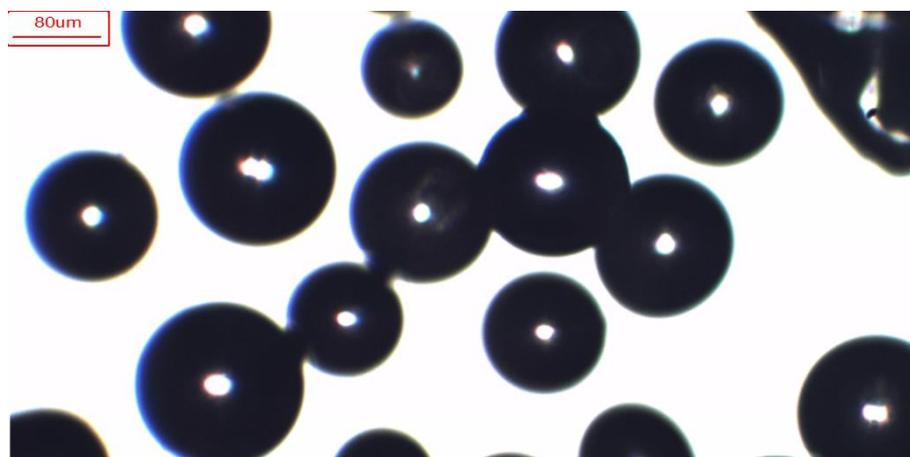
Fonte: Elaboração própria.

Figura 46 - Microesferas azuis durante o processo de microscopia óptica.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 48 - Microesferas comerciais durante o processo de microscopia óptica.



Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, tanto as microesferas produzidas, bem como as microesferas comerciais de referência, foram analisadas em termos de rendimento, ou seja, a razão entre o número de microesferas esféricas e o número total de elementos contados. Na Tabela 10 são apresentados os resultados relação ao rendimento, à porcentagem de microesferas ovoides e à porcentagem de cacos para cada tipo de microesferas.

Tabela 10 – Resultados percentuais de microesferas esféricas, ovoides e cacos.

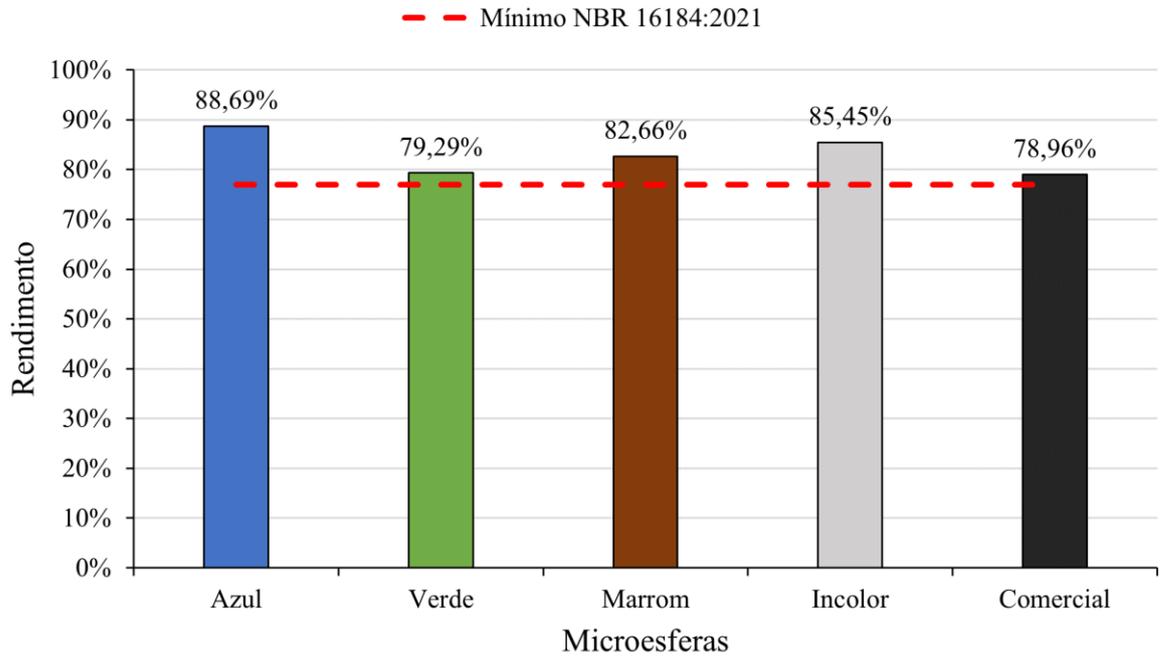
Microesfera	Esféricas		Ovoides		Cacos		Total	
	Qtd.	%	Qtd.	%	Qtd.	%	Qtd.	%
<b>Incolor</b>	922	85,45%	137	12,70%	20	1,85%	1079	100%
<b>Marrom</b>	844	82,66%	156	15,28%	21	2,06%	1021	100%
<b>Azul</b>	910	88,69%	101	9,84%	15	1,46%	1026	100%
<b>Verde</b>	823	79,29%	194	18,60%	21	2,02%	1038	100%
<b>Comercial</b>	878	78,96%	198	17,81%	36	3,24%	1112	100%
<b>NBR 16184:2021</b>	-	77%	-	20%	-	3%	-	100%

Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, comparando os resultados, nota-se que para a contagem realizada, as microesferas produzidas apresentam percentuais ligeiramente superiores as microesferas comerciais. Além disso, é possível verificar que as microesferas geradas atendem todos os limites da norma. Para a contagem realizada, as microesferas comerciais apresentaram um percentual de cacos superior ao máximo estabelecido pela NBR 16184:2021.

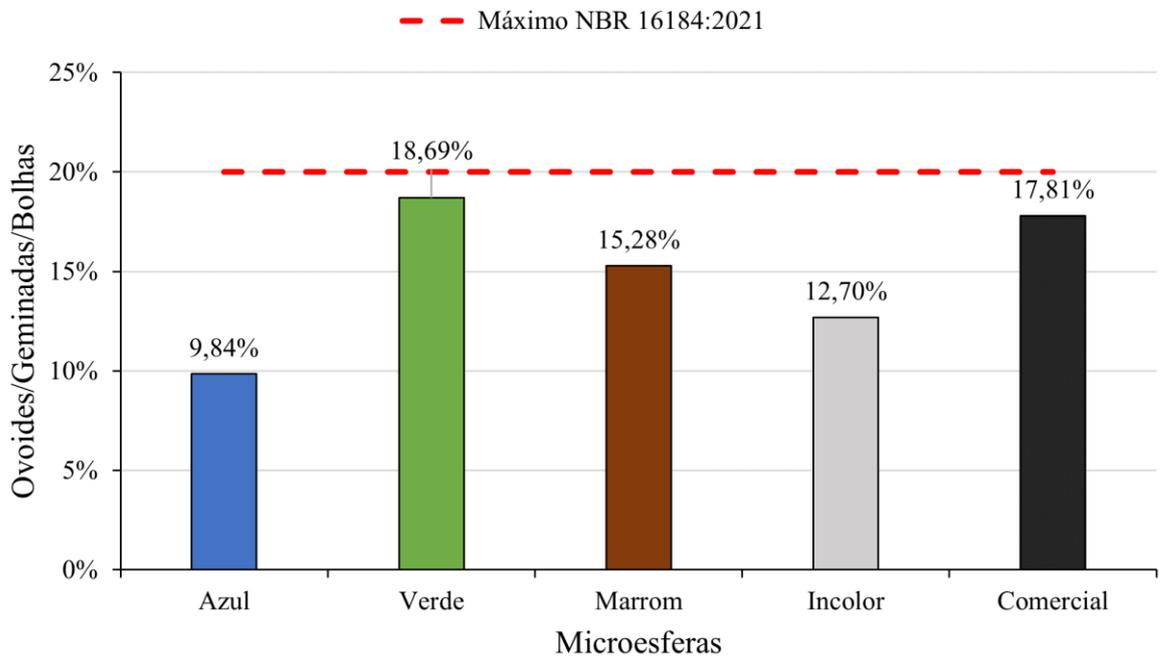
Para uma melhor visualização, as figuras 49, 50 e 51 mostram o comportamento das diferentes microesferas em termos de rendimento, microesferas ovoides ou geminadas e elementos estranhos ou partículas não fundidas, assim como os limites dispostos pela norma NBR 16184:2021.

Figura 49 - Gráfico comparativo de rendimento em termos de microesferas esféricas.



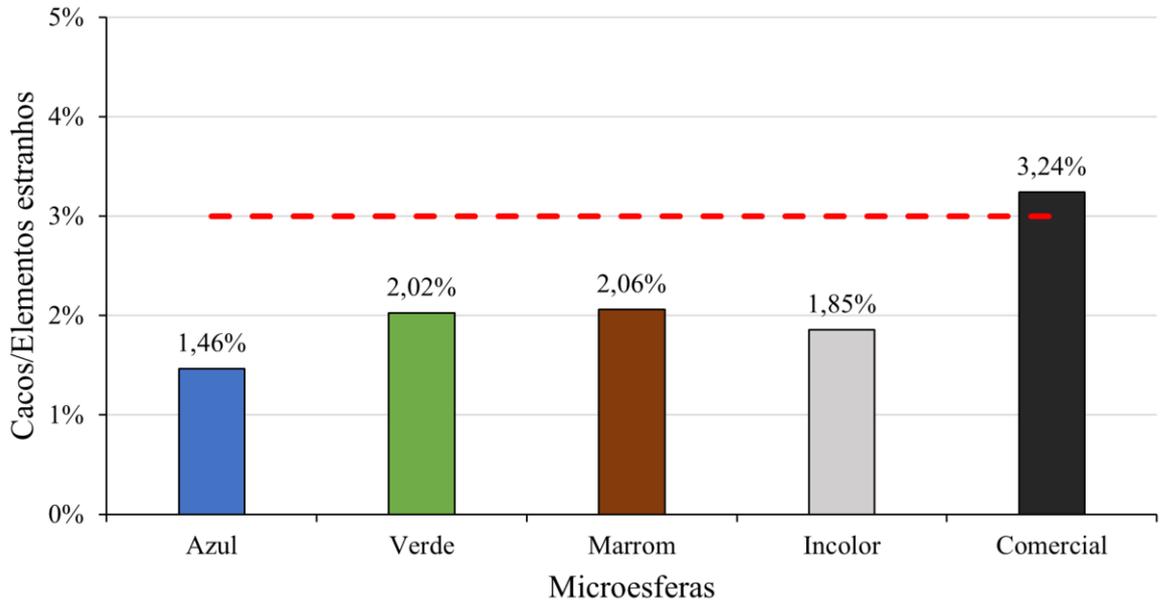
Fonte: Elaboração própria.

Figura 50 - Gráfico comparativo de percentual de microesferas ovóides, geminadas ou bolhas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 51 - Gráfico comparativo de rendimento em termos de cacos e elementos estranhos.  
- - - Máximo NBR 16184:2021

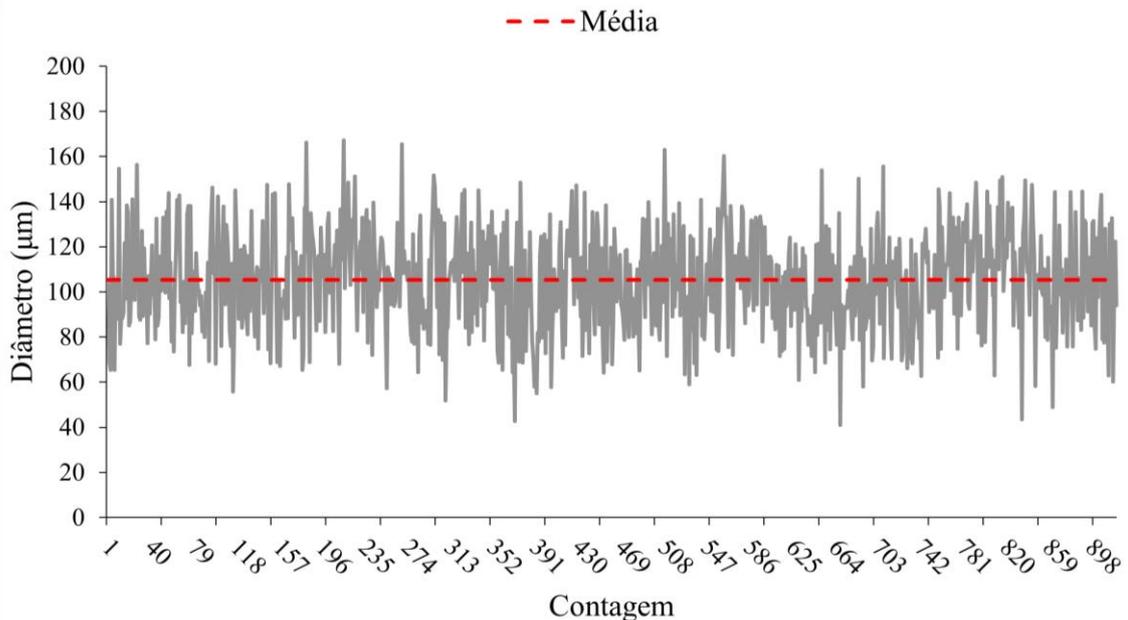


Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2.2 Distribuição granulométrica

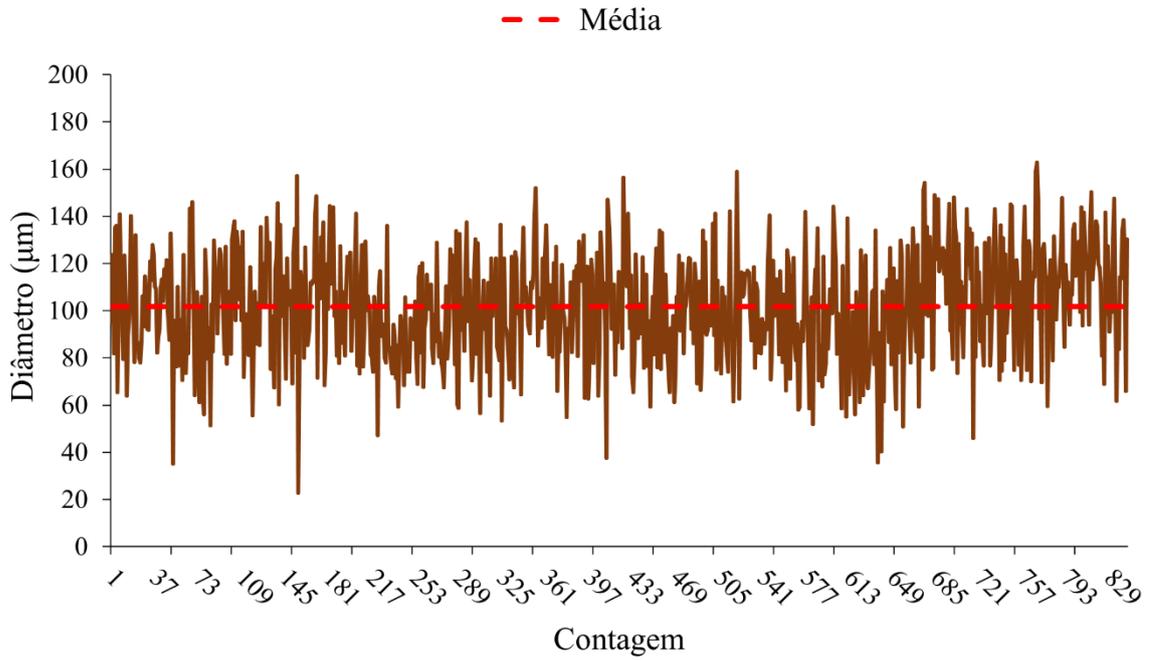
A partir do procedimento de microscopia óptica, além dos dados apresentados na seção anterior, foram obtidos também os dados relativos à granulometria das microesferas. Nas figuras 52, 53, 54, 55 e 56 pode-se observar o comportamento durante a contagem.

Figura 52 - Comportamento das microesferas incolores durante a contagem.



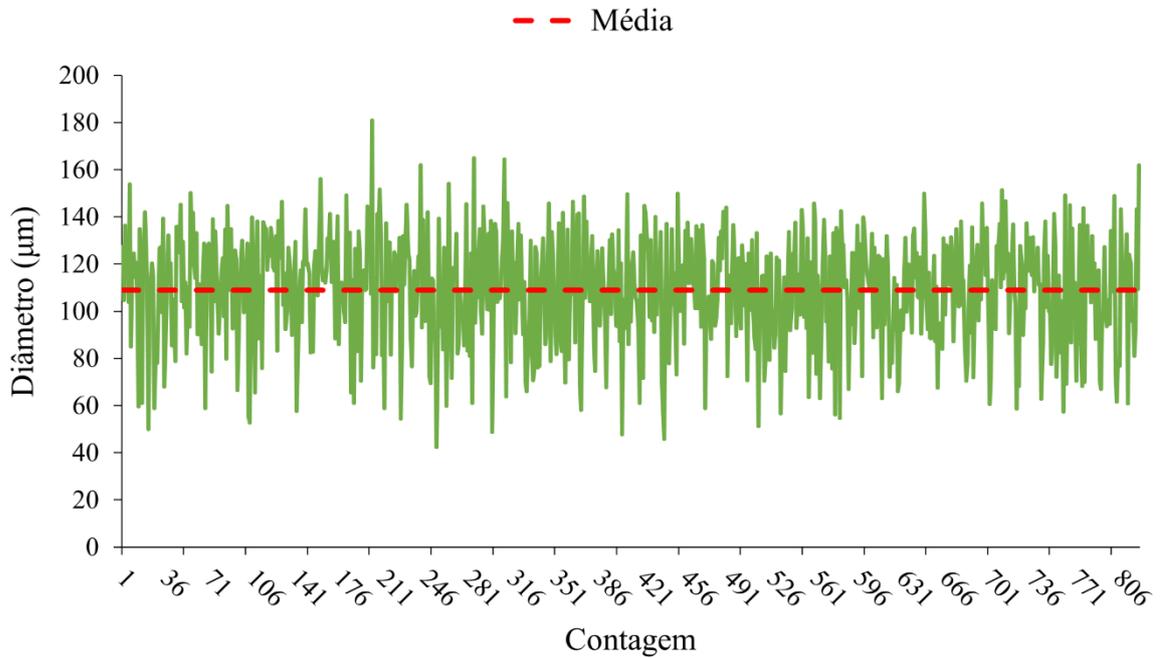
Fonte: Elaboração própria.

Figura 53 - Comportamento das microesferas marrom durante a contagem.



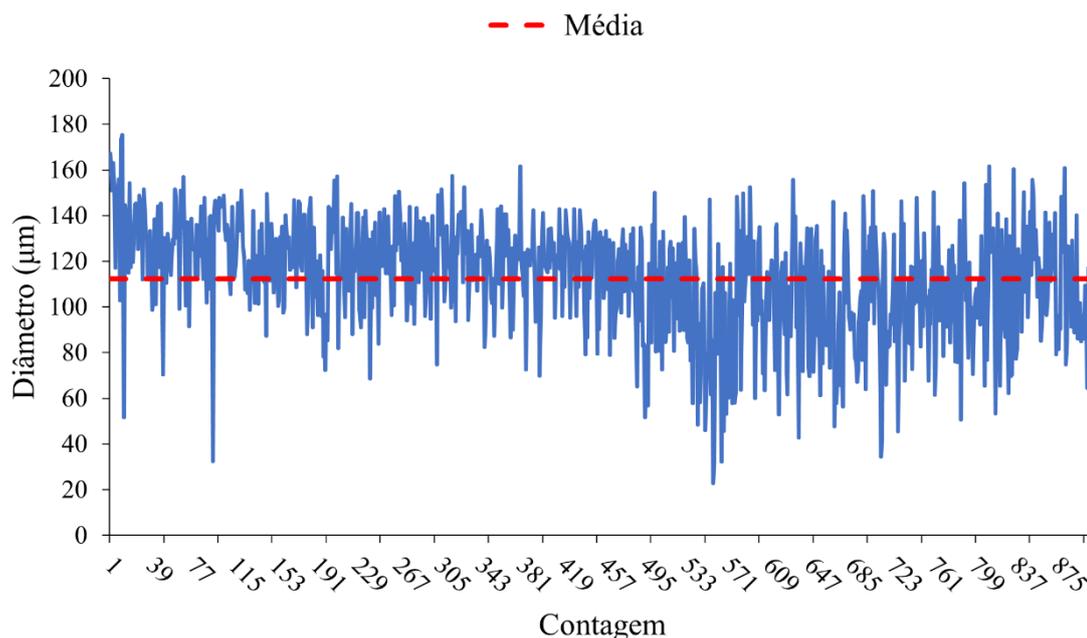
Fonte: Elaboração própria.

Figura 54 - Comportamento das microesferas verdes durante a contagem.



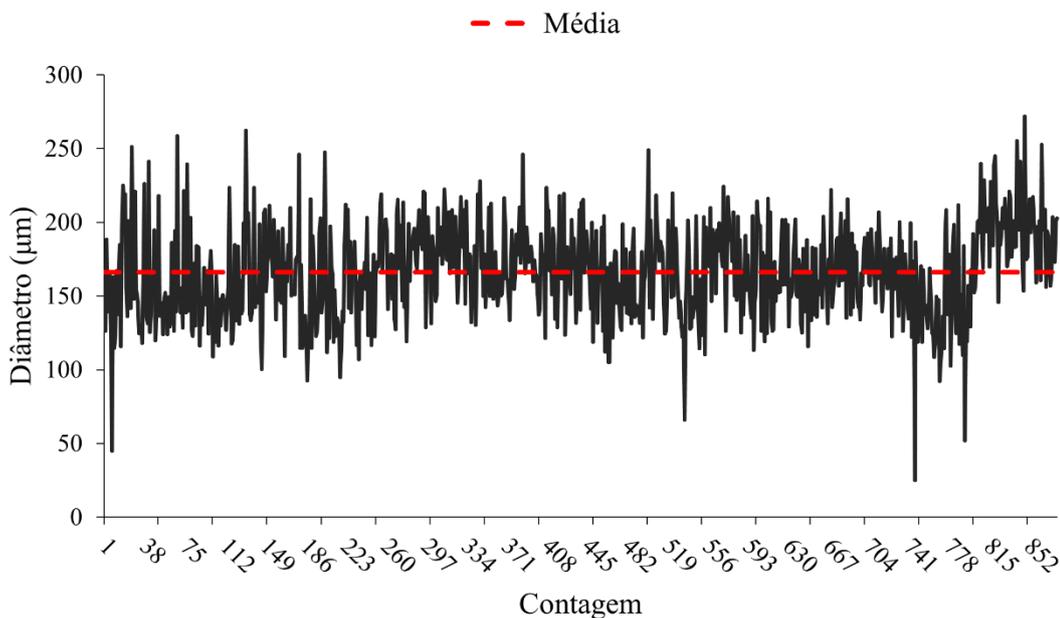
Fonte: Elaboração própria.

Figura 55 - Comportamento das microesferas azuis durante a contagem.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 56 - Comportamento das microesferas comerciais durante a contagem.



Fonte: Elaboração própria.

Apenas pela análise visual dos gráficos de diâmetro em função da contagem, pode-se observar que os diâmetros das microesferas produzidas apresentaram um valor próximo de 100  $\mu\text{m}$  enquanto as microesferas comerciais apresentaram um diâmetro médio próximo de 160  $\mu\text{m}$ . Na Tabela 11 pode-se observar os valores de diâmetros mínimos, máximos, médios e o desvio padrão para as microesferas produzidas e comerciais.

Tabela 11 – Valores de diâmetro mínimo, máximo, médio e desvio padrão das microesferas.

Microesfera	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )			
	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio Padrão
<b>Incolor</b>	41,1	167,0	105,4	21,9
<b>Marrom</b>	22,8	162,8	101,7	23,1
<b>Azul</b>	22,9	175,3	112,3	25,0
<b>Verde</b>	42,6	180,9	109,0	22,9
<b>Comercial</b>	25,1	271,9	166,1	25,9

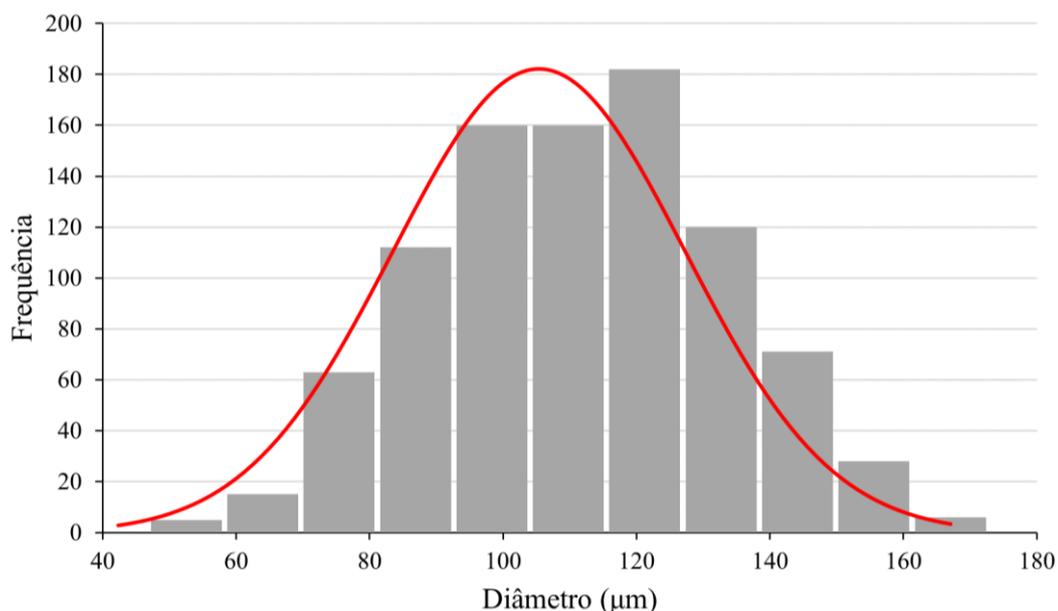
Fonte: Elaboração própria.

Logo, nota-se que os valores médios das microesferas produzidas se assemelham entre si, com um diâmetro variando entre 101,7 e 109,0  $\mu\text{m}$ . Observa-se também uma grande variação de diâmetro entre as menores e as maiores microesferas comerciais.

Em uma breve análise destes resultados, pode-se concluir que o procedimento de produção das microesferas vítreas manteve-se razoavelmente padronizado, visto que os valores de diâmetro mínimo, máximo, médio e desvio padrão mantiveram-se semelhantes para as diferentes cores. A justificativa para este padrão ter se mantido vem do fato da utilização das mesmas peneiras granulométricas para o caso dos vidros coloridos.

Desse modo, baseando-se na metodologia apresentada na seção 3.3.3, a Figura 57 apresenta o histograma de barras verticais (cinza claro) e a curva de distribuição normal (vermelha) referente às microesferas produzidas com vidro incolor.

Figura 57 - Histograma e curva de distribuição microesferas incolores.

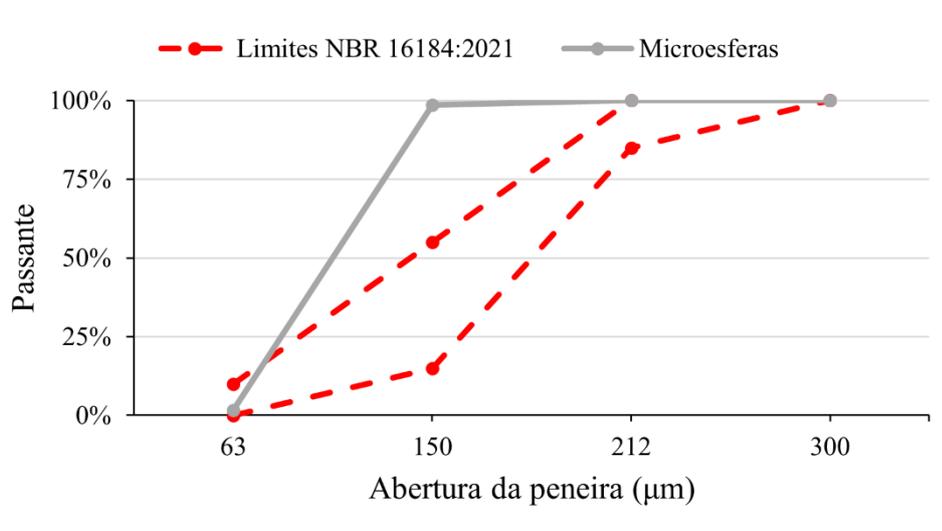


Fonte: Elaboração própria.

Pode-se observar que a grande maioria das microesferas, mais precisamente 96,85%, se concentram entre as peneiras 63 e 150 $\mu$ m. Este comportamento caracteriza uma granulometria não uniforme e não atende os valores especificados pela NBR 16184:2021, que afirma que as microesferas devem possuir uma porcentagem máxima de 55% para este intervalo.

De mesmo modo, na Figura 58 é possível observar a granulometria destas microesferas em comparação aos limites dispostos pela norma para cada abertura de peneira, os quais foram apresentados na Tabela 1.

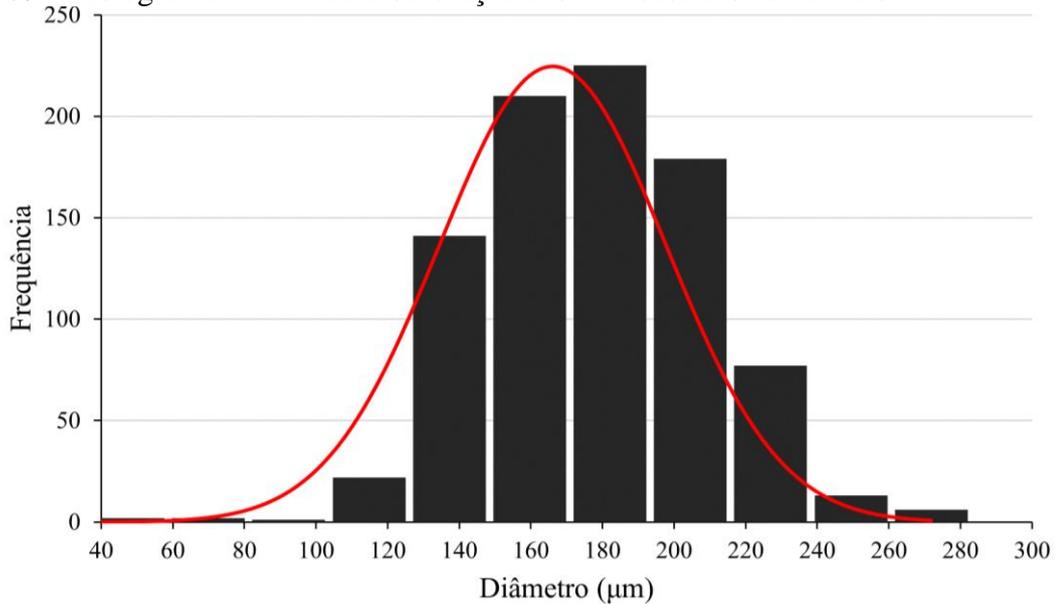
Figura 58 - Granulometria das microesferas incolores.



Fonte: Elaboração própria.

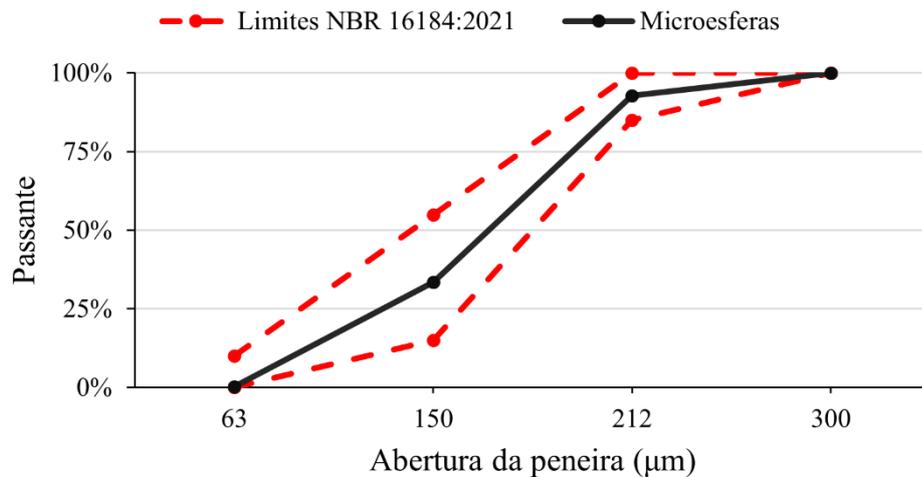
Nesta figura, a porcentagem passante referente as peneiras de abertura 63, 212 e 300  $\mu$ m estão de acordo com os limites da NBR 16184:2021. O mesmo comportamento é observado para as microesferas produzidas a partir das garrafas das outras cores. Dessa maneira, para efeito de comparação, foram elaborados os mesmos gráficos (histograma, curva de distribuição e granulometria) para as microesferas comerciais, os quais são apresentados nas figuras 59 e 60.

Figura 59 - Histograma e curva de distribuição das microesferas comerciais.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 60 - Granulometria das microesferas comerciais.



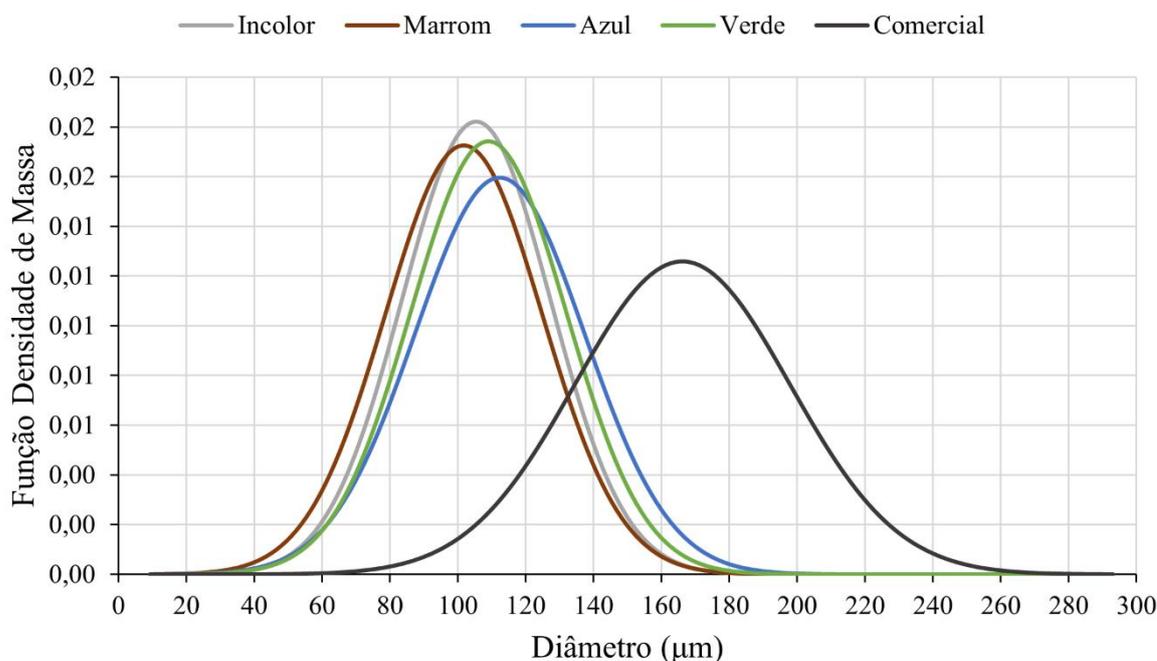
Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 59 pode-se observar que a distribuição dos diâmetros das microesferas comerciais abrange um intervalo maior quando comparado às microesferas produzidas, variando entre 40 e 280 µm. Além disso, é possível notar que a maioria das microesferas se concentram no intervalo das peneiras 150 e 212 µm, com uma porcentagem de 59,23% nesta faixa. Assim, este percentual atende a especificação da norma que prevê, para esse intervalo, uma porcentagem mínima de 30% e uma porcentagem máxima de 70%.

Já em relação a Figura 60, as microesferas comerciais atendem as especificações de granulometria para as demais peneiras, apresentando uma porcentagem de passantes de acordo

com os limites da NBR 16184:2021. Logo, visando uma melhor visualização da distribuição granulométrica das diferentes microesferas, a Figura 61 apresenta o gráfico comparativo das curvas de distribuição normal.

Figura 61 - Gráfico comparativo das curvas de distribuição normal das microesferas ao longo dos diâmetros.



Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, como verifica-se na Figura 61, a diferença de comportamento entre as microesferas produzidas e as comerciais mostra-se evidente. Sobretudo em relação a concentração das microesferas, visto que as produzidas se concentraram em um intervalo de diâmetros relativamente menor. A explicação para este comportamento, é o fato de que os cacos de vidro utilizados na produção das microesferas, foram os retidos na peneira 75 e passantes na peneira 150 µm, visando um rendimento maior no aparato utilizado.

#### 4.2.3 Avaliação da retrorrefletividade

Por meio dos procedimentos apresentados na seção 3.6, foram efetuadas as medidas de retrorrefletividade para as diferentes microesferas produzidas e comerciais. Desse modo, na Tabela 12 é possível visualizar as medidas de retrorrefletividade das amostras de diferentes cores, bem como a amostra comercial, para uma geometria de 15 m, considerando também o desvio padrão de cada cor para uma densidade de 100 g/m<sup>2</sup>.

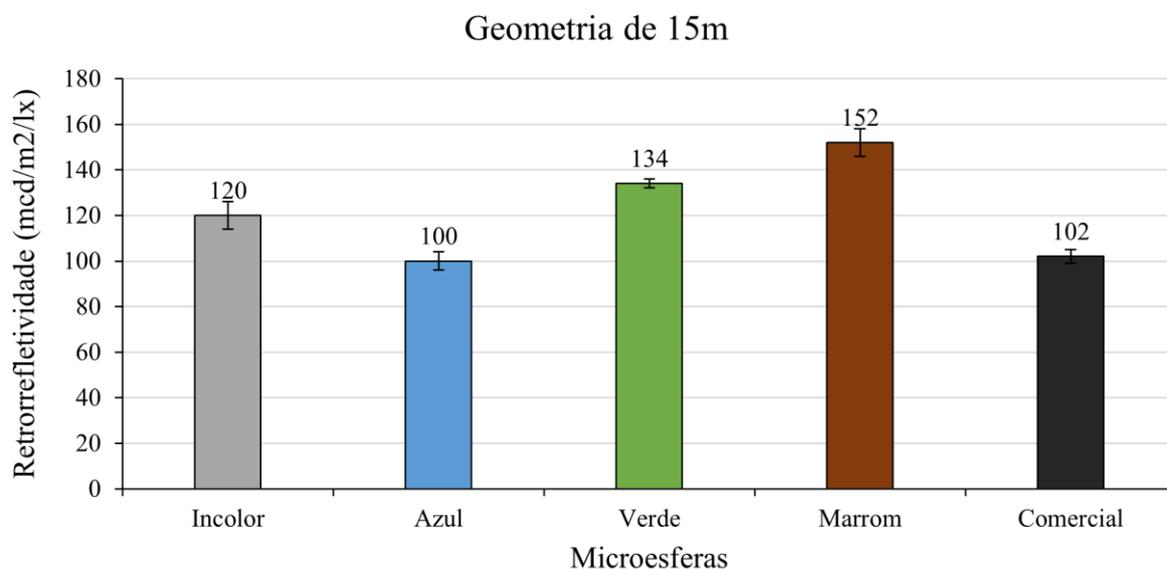
Tabela 12 - Retrorefletividade em função de cor para uma densidade de 100g/m<sup>2</sup> para 15m.

Retrorefletividade (mcd/m <sup>2</sup> /lx)										
Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Desvio Padrão
<b>Comercial</b>	111	106	95	103	96	99	109	100	102	6
<b>Incolor</b>	129	121	116	120	121	116	116	118	120	4
<b>Azul</b>	98	98	98	104	100	102	100	100	100	2
<b>Verde</b>	126	126	135	136	138	138	134	141	134	6
<b>Marrom</b>	147	149	149	155	155	153	155	151	152	3

Fonte: Elaboração própria.

Para uma melhor visualização dos resultados, a Figura 62 apresenta o gráfico de barras das diferentes amostras, onde pode-se observar as medidas de retrorefletividade com seus respectivos desvios padrão.

Figura 62 - Gráfico da retrorefletividade média das diferentes microesferas geometria 15m.



Fonte: Elaboração própria.

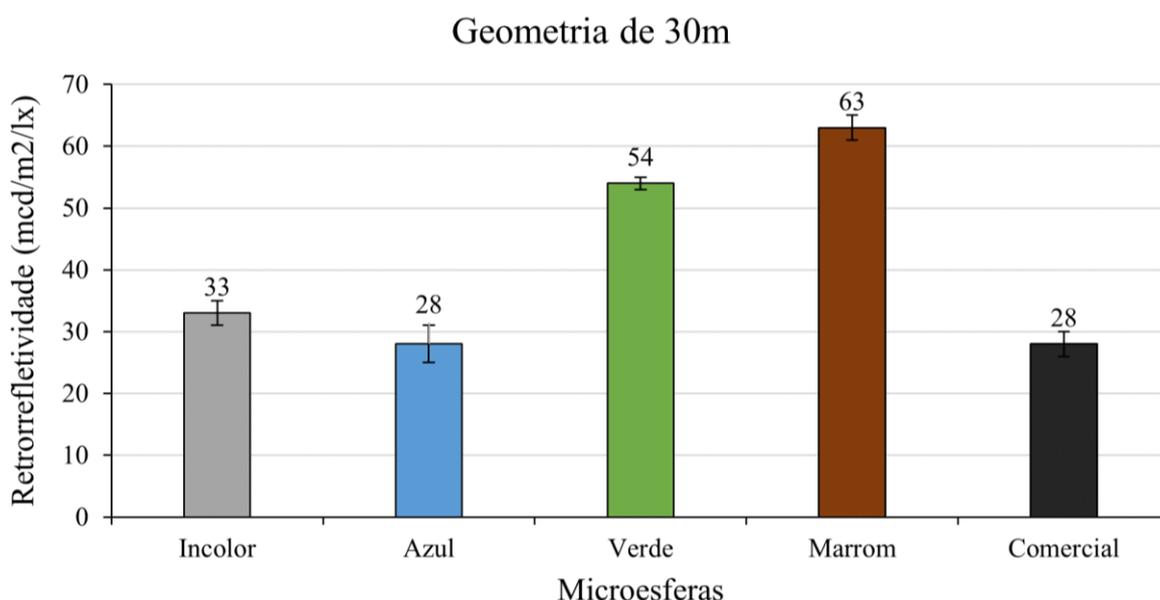
Por outro lado, a Tabela 13 mostra as medidas de retrorefletividade das amostras de diferentes cores, bem como a amostra comercial, para uma geometria de 30m, considerando também o desvio padrão. Também para uma melhor visualização dos resultados, a Figura 63 apresenta o gráfico de barras das diferentes amostras, onde pode-se observar as medidas de retrorefletividade com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 13 - Retrorefletividade em função de cor para uma densidade de 100g/m<sup>2</sup> para 30m.

Retrorefletividade (mcd/m <sup>2</sup> /lx)										
Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Desvio Padrão
<b>Comercial</b>	29	31	27	29	25	27	29	27	28	2
<b>Incolor</b>	39	36	32	33	31	30	30	33	33	3
<b>Azul</b>	28	27	29	27	28	29	26	26	28	1
<b>Verde</b>	54	52	53	53	53	55	54	59	54	2
<b>Marrom</b>	61	61	62	66	64	64	64	61	63	2

Fonte: Elaboração própria.

Figura 63 - Gráfico da retrorefletividade média das diferentes microesferas geometria 30m.



Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, observa-se um comportamento semelhante da retrorefletividade para ambas as geometrias, de 15 e 30m, onde os melhores resultados são observados para as microesferas marrons e verdes e, os piores resultados para as microesferas azuis e comercial. Mais especificamente é possível observar uma variação de mais de 50% nas medidas de retrorefletividade entre o melhor e o pior caso para a geometria de 15m e de mais de 100% para a geometria de 30 m. Estes percentuais estão sendo considerados baseados nos valores médios para cada cor.

Desse modo, diferentemente do que o TxDOT (2004) afirma, ao citar que microesferas menos transparentes tendem a dificultar a passagem da luz, diminuindo, dessa forma, a retrorefletividade e ao que a norma sugere, no que tange a utilização de microesferas incolores;

os resultados mostrados revelam que a coloração das microesferas afeta fortemente e de forma positiva as medidas de retrorrefletividade.

Por conseguinte, como observado nas figuras 62 e 63, as microesferas marrons mostraram os melhores resultados, seguidos pelas colorações verde, incolor, azul e comercial, estas últimas com patamar semelhante. A explicação para esta melhora pode estar no fato de que o índice de refração e o brilho das garrafas de coloração marrom são maiores, quando comparadas com a incolor por exemplo.

Neste sentido, trabalhos futuros permitirão avaliar a influência das características como o índice de refração e o brilho da matéria prima utilizada, de forma a melhor elucidar os resultados de retrorrefletividade mostrados neste trabalho. Considerando que em um processo de reciclagem de garrafas, as diferentes cores estão presentes, em um primeiro momento os resultados sugerem que a mistura das cores não será um problema na produção das microesferas uma vez que não necessariamente o vidro final precisa ser incolor para que se obtenha bons resultados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho possuía como objetivos principais, conforme citado no capítulo 1, a otimização, a produção e a avaliação das propriedades e da retrorrefletividade de microesferas de vidro geradas a partir de garrafas comerciais de diferentes cores. Desse modo, ao fim dos procedimentos experimentais e a partir da análise dos resultados, pode-se concluir que:

- a) No que tange a densidade, os vidros utilizados para a produção das microesferas atendem aos limites de densidade dispostos pela NBR 16184:2021;
- b) Em relação ao efeito da coloração nos resultados de transmitância de cada vidro, notou-se que as discrepâncias entre os resultados diminuem à medida que a espessura da amostra diminui. Logo, considerando o diâmetro médio disposto pela NBR 16184:2021 para as microesferas do tipo I-B, os diferentes vidros apresentam valores semelhantes, sobretudo para comprimento de onda acima de 600nm;
- c) Levando em conta a influência da fonte de emissão de luz utilizada e o padrão de iluminante do retrorrefletômetro, pode-se inferir que a coloração das microesferas não influenciará, de maneira negativa e do ponto de vista espectral, os resultados de retrorrefletividade;
- d) No que diz respeito ao rendimento, a partir da contagem realizada, as microesferas produzidas atendem os limites percentuais dispostos pela NBR 16184:2021, em relação à cacos, elementos estranhos, microesferas ovóides e geminadas;
- e) Baseando-se nos resultados de rendimento e considerando o tamanho dos cacos de vidro utilizados, o aparato apresentou valores satisfatórios. Entretanto, deve-se buscar otimizar o aparato buscando obter microesferas de diâmetros superiores, de modo a atender a granulometria da NBR 16184:2021;
- f) Devido ao fato de a utilização das peneiras limitar o tamanho dos cacos utilizados na produção das microesferas, embora a produção se manteve padronizada, estas não atenderam os limites percentuais de passantes da norma;
- g) No tocante aos resultados de retrorrefletividade, as microesferas produzidas apresentaram desempenho numérico superior as microesferas comerciais, em especial para as microesferas verdes e marrons;
- h) Conforme citado no item acima, a coloração de fato não diminui os resultados de retrorrefletividade, contrapondo as especificações da norma e de alguns autores quanto a coloração e claridade;

- i) Faz-se necessário a avaliação de outras características como por exemplo, o índice de refração e a análise do brilho dos materiais, para embasar as afirmações acerca da influência da coloração;
- j) Em um primeiro momento, pode-se inferir que a utilização de cacos de diferentes cores misturados não apresentará empecilhos quanto aos valores de retrorrefletividade;
- k) De mesmo modo, os resultados prévios sugerem que a utilização de microesferas produzidas a partir de vidros gerados pela cinza da casca de arroz e sem tratamento de coloração, ou seja, avermelhadas, não apresentarão empecilhos quanto à sua retrorrefletividade.

Por fim, conforme as considerações apresentadas anteriormente, faz-se necessário mais resultados acerca das propriedades tanto dos vidros quanto das microesferas. Além disso, é válido destacar que os resultados de retrorrefletividade referem-se somente às microesferas e que para a sua utilização na sinalização viária, faz-se necessária a avaliação do comportamento destas quando agregadas à tinta de demarcação.

Assim, devido ao fato de algumas propriedades, como por exemplo a granulometria, destoarem dos valores das microesferas comerciais e dos limites da norma, deve-se avaliar o impacto desta característica na retrorrefletividade do conjunto microesferas e tinta de demarcação.

### **5.1 Sugestões de trabalhos futuros**

- a) Avaliar o índice de refração e brilho das diferentes amostras pois estes são parâmetros importantes no que se refere às medidas de retrorrefletividade;
- b) Fazer medidas de retrorrefletividade das diferentes amostras inseridas na tinta apropriada para aplicações em sinalização viária;
- c) Estudar a influência do diâmetro e concentração das microesferas na retrorrefletividade;
- d) Fazer os testes químicos de acordo com a norma NBR 16184:2021;
- e) Encontrar mecanismos de produção de microesferas com diferentes diâmetros, de forma a produzir tipos diferentes para diferentes aplicações.

## REFERÊNCIAS

ABIVIDRO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO. **Como o vidro é reciclado?**. In: Abividro. [S. l.], 4 nov. 2020. Disponível em: <https://abividro.org.br/2020/11/04/como-o-vidro-e-reciclado/>. Acesso em: 6 set. 2021.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14723: Sinalização horizontal viária — Medição de retrorefletividade utilizando equipamento manual com geometria de 15 m: Método de ensaio**. Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2020. 8 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16184: Sinalização horizontal viária — Esferas e microesferas de vidro: Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro/RJ: ABNT. 2021. 32 p.

ABRAVIDRO - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS. **O mercado vidreiro em números. Panorama Abravidro**, Água Branca/ SP, ed. 10, 2021. Disponível em: <https://pdf.magtab.com/leitor/136/edicao/21630>. Acesso em: 6 set. 2021.

AKERMAN, Mauro. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil, p. 37, 2000.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sumário Mineral 2017**. Brasília/DF: ANM/ME, v. 37, 2017. p. 211.

ARMELINI, C.; FERNANDES, D. Utilização da sucata de vidro para a publicação de novos produtos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 48., 2004, Curitiba/PR. **Anais [...]**. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004.

BARROS FILHO, E. C. **Estudo do processo de esferolização de partículas vítreas visando a aplicação em radioterapia interna seletiva**. Orientador: Dr. José Roberto Martinelli. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nuclares - IPEN, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2012.

BESSMERTNYI, V. S. *et al.* Production of glass microspheres using the plasma-spraying method. **Glass and Ceramics**, Nova York: Springer Nature Switzerland AG, ed. 58, ano 2001, p. 7-8.

BHTRANS - Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S.A. **Especificações Técnicas: Sinalização estatigráfica horizontal**. Belo Horizonte/MG: Secretaria Municipal de Serviços Urbanos - SMSU. 2014. 69 p.

BRANCO, A. M. **Segurança Viária**. 1 ed. São Paulo/SP: Editora CL-A, 1999. 109 p.

CASTILHO, F. B. **Sobre a conspicuidade, legibilidade e retrorefletividade das de sinalização viária**. Orientador: Dr. Antônio Clóvis Pinto Ferraz. 2009. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia dos Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2009.

CEMPRE - COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE.org**. Taxas de reciclagem. São Paulo/SP: GoWork Itaim Bibi, s.d. Disponível em: <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>. Acesso em: 4 set. 2021.

CÓDIGO DE TRÂNSITO BRASILEIRO – **CTB** – LEI N° 9.503, DE 23 DE SETEMBRO 1997. Conselho Nacional De Trânsito. 2021.

CIE - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **CIE.co.at**. Disponível em: <<http://www.cie.co.at/>>. Acesso em: 22 fev. 2012.

DETRAN/PR - DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO PARANÁ. **Sinalização Horizontal**: Fornecimento de tinta para demarcação viária a base de resina acrílica. s.d. Disponível em: <[https://www.deTRAN.pr.gov.br/arquivos/File/coordenadoria/coad/cp22/Sinalizacao\\_H.pdf](https://www.deTRAN.pr.gov.br/arquivos/File/coordenadoria/coad/cp22/Sinalizacao_H.pdf)>. Acessado em: 24 fev. 2022.

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

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

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Medida da retrorrefletividade com uso de equipamento dinâmico**: Procedimento. Rio de Janeiro/RJ: INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS - IPR. 2017. 6 p.

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

DURIKOVIC, R.; KIMURA R. **GPU Rendering of the Thin Film on Paints with Full Spectrum**. In: IEEE Tenth International Conference on Information Visualisation (IV'06). p 751-756. Londres, Inglaterra, 2006.

EASYLUX. **EasyLux.com.br**. Horizontal Classic. Santo André/SP: EasyLux, s.d. Disponível em: <https://easyLux.com.br/br/products/horizontal-classic/>. Acesso em: 7 set. 2021.

FELISBERTO, Camila Benini. **Rendimento e cor de selênio e seus compostos na coloração de vidros sodo-cálcicos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FEVE - EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION. **FEVE.org**. Latest Glass Packaging Recycling Rate Steady at 76%. Bruxelas: FEVE, 2020. Disponível em: [https://feve.org/glass\\_recycling\\_stats\\_2018/](https://feve.org/glass_recycling_stats_2018/). Acesso em: 6 set. 2021.

FERREIRA, M. D.; SPRICIGO, Poliana Cristina. **Colorimetria-princípios e aplicações na agricultura**. Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE), 2017.

FONTANA, A. M. **Estudo Psicofísico sobre conspicuidade, estética e harmonia ambiental de sinais de trânsito**. Orientador: Dr. Antônio Clóvis Pinto Ferraz. 2005. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2005.

GIACOMINI, E. **Material, O Vidro**. Faculdade de Engenharia da universidade do Porto, Secção de Construções Cívicas. X Mestrado em Construções de Edifícios tecnologias de Fachadas, p. 11, 2005.

GUIMARÃES, A. F. **Marketing verde e propaganda ecológica: Uma análise da estrutura da comunicação em anúncios impressos**. Orientador: Dr. Geraldo Luciano Toledo. 2006. 191 f. Tese (Doutorado) – Doutorado em Administração, Departamento de Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

HERNÁNDEZ-PÉREZ I. *et al.* Reflective Materials for Cost-Effective Energy-Efficient Retrofitting of Roofs. *In: PACHECO-TORGAL, F. et al. Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting: Materials, Technologies, Optimization and Case Studies*. Cambridge: Elsevier, 2017. p. 119-139.

LEID, Jean. **Blue Light: what are the risks to our eyes**. *In: Points de Vue: International Review Ophthalmic Optics*, p. 1-7, 2016.

MACHADO, D. D. D. N. **Estudo da durabilidade da sinalização horizontal em pavimentos asfálticos rodoviários**. Orientador: Dra. Liedi Legi Bariani Bernucci. 2019. 165 f. Tese (Doutorado) - Curso de Mestrado em Ciências, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2019.

MAZZONI, L. N. *et al.* **Comparação entre medidas de retrorrefletividade na geometria de 15 e 30 metros e seu efeito na segurança viária**. *In: Congresso De Pesquisa E Ensino Em Transporte Da ANPET*, 33., 2019, Balneário Camboriú/SC. Artigo [...]. Balneário Camboriú/SC: ANPET, 2019.

MCGEE, H. W. *et al.* **Implementation guide for minimum retroreflectivity requirements for traffic signs**. United States. Federal Highway Administration, 1998.

MENG, X. *et al.* **Thermal Performance Improvement of Prefab Houses by Covering Retro-reflective Materials**. *In: International Symposium On Heating, Ventilation And Air Conditioning (Ishvac) And The 3rd International Conference On Building Energy And Environment*, 9., 2015, China. Artigo [...]. China: Procedia Engineering 121, 2015. p. 1001-1007.

MIGLETZ, J.; FISH, J.; GRAHAM, J. L. **Roadway delineation practices handbook**. United States. Federal Highway Administration, 1994.

MORAES, R. D. **Estudo do impacto visual de alguns sinais horizontais de trânsito: Avaliação utilizando o método da psicofísica**. Orientador: Dr. Antônio Clóvis Pinto

Ferraz. 2002. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia de Transporte, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2002.

PEREZ, D. M.; MENEZES, J. W. D. **Aula prática 2: Microscópio Óptico**. Alegrete/RS, 2016.

POKORNY, A. **Obtenção e caracterização de espumas vítreas a partir de resíduos de vidro sodo-cálcicos e calcário dolomítico como agente espumante**. Orientador: Dr. Carlos Pérez Bergmann. 2006. 2006 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2006.

ROBERTSON, J. *et al.* A Methodology for Estimating and Comparing the Lifecycles of High-Build and Conventional Waterborne Pavement Markings on Primary and Secondary Roads in South Carolina. **Public Works Management & Policy**, South Caroline/USA, ed. 18(4), 2012, p. 360-378.

ROSSI, Federico *et al.* Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model. **Applied Energy**, Amsterdã: Elsevier E. R., ed. 114, 2014, p. 621-631.

SCHWAB, M. S. F. **Estudo do desempenho dos materiais de demarcação viária retrorrefletivos**. Orientador: Dr. Robson José de Cássia Franco Afonso. 1999. 160 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia dos Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais (UFOP-UEMG-CETEC), Belo Horizonte/MG, 1999.

SHELBY, J. E. **Introduction to Glass Science and Technology**: Second Edition. 2. ed. Nova York: The Royal Society of Chemistry, 2005.

SILVA, G. L. C. D. **Geração e otimização de microesferas vítreas produzidas a partir da cinza da casca de arroz**. Orientador: Dr. Jacson Weber de Menezes. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, Alegrete/RS, 2020.

SMADI, O. *et al.* Recommended Laboratory Test for Predicting the Initial Retroreflectivity of Pavement Markings from Glass Bead Quality. **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, Washington, ed. 2440, ano 2012.

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

TONG, J. *et al.* Fabrication of glass microspheres using the powders floating method. *In*: 2009 SYMPOSIUM ON PHOTONICS AND OPTOELECTRONICS, 2009, Wuhan. **Artigo [...]**. Wuhan: Photonics and Optoelectronics (SOPO), 2009.

TXDOT – Texas Department of Transportation. Pavement Marking Handbook. Manual Notice 2004-1. 95p. Texas, EUA, 2004.

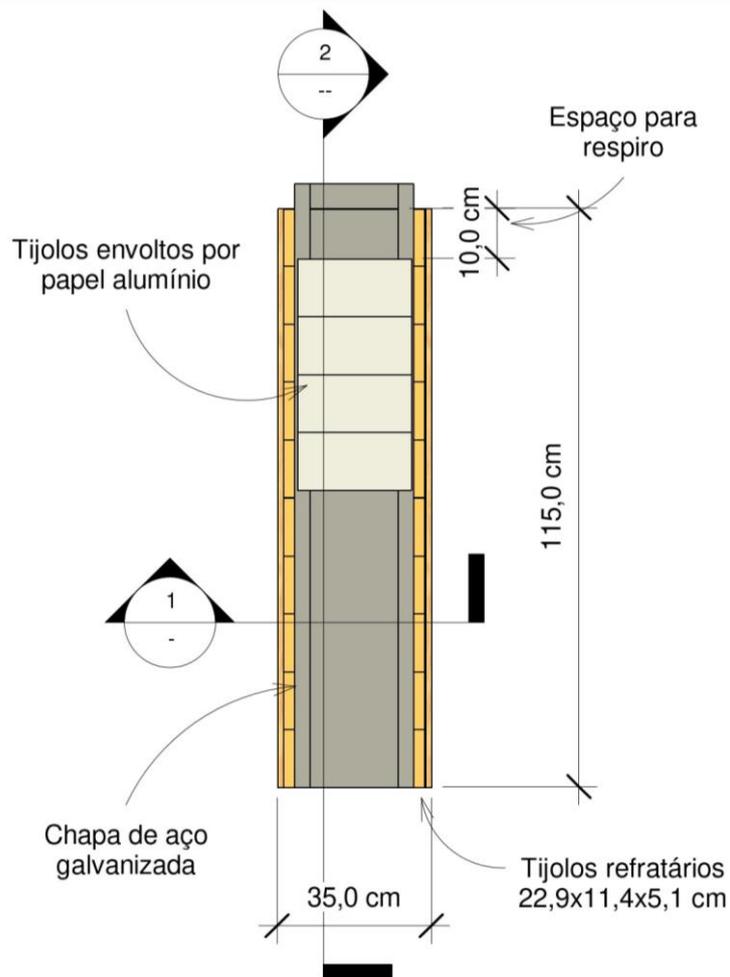
YUAN, J. Application of Glass Beads in Building Exterior Wall Surface Materials. *In*: SGLAVO, V M.. (Org.). **Advances in Glass Science and Technology**. Osaka: IntechOpen, 2018. p. 173-193.

YUAN, J.; FARNHAM, C.; EMURA, K. Development of a retro-reflective material as building coating and evaluation on albedo of urban canyons and building heat loads. *In*: NIU, J.; SANTAMOURIS, M. (Org.). **Energy and Buildings**. Amsterdã: Elsevier B.V., 2015. p. 107-117.

## APÊNDICE A – DETALHAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL

Figura 64 - Vista superior do aparato utilizado.

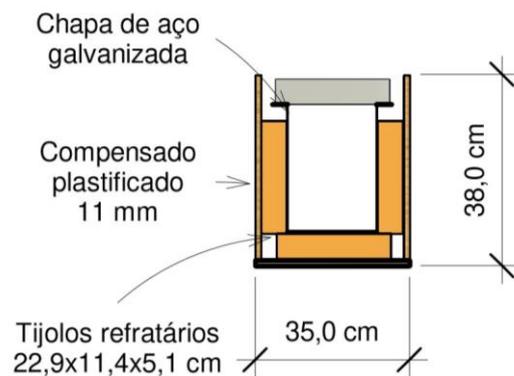
Vista Superior Esc: 1:15



Fonte: Elaboração própria

Figura 65 - Corte 1 do aparato.

Corte 1 Esc: 1:15

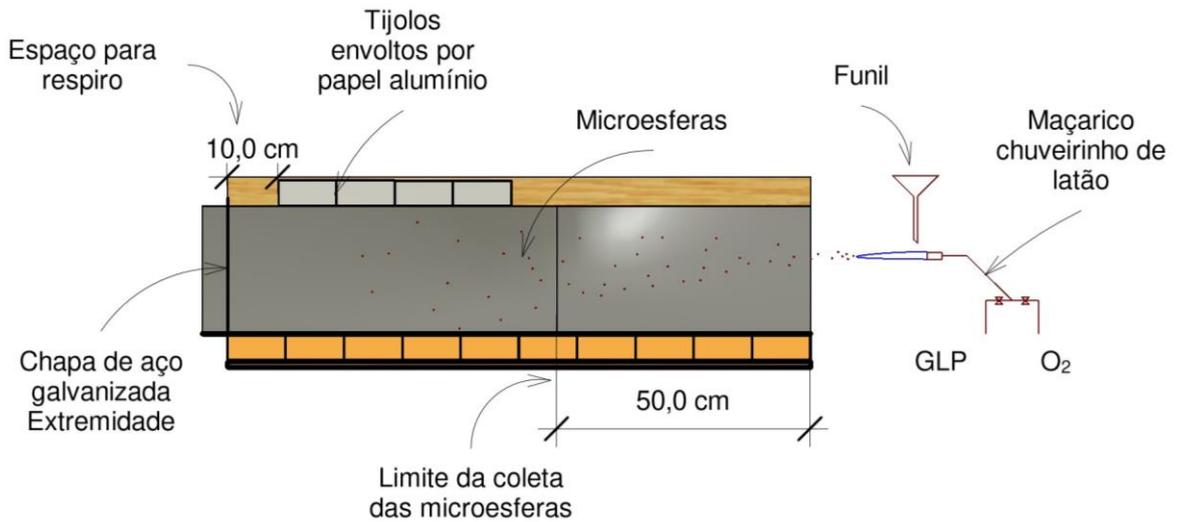


Fonte: Elaboração própria.

Figura 66 - Corte 2 do aparato.

### Corte 2

Esc 1:15

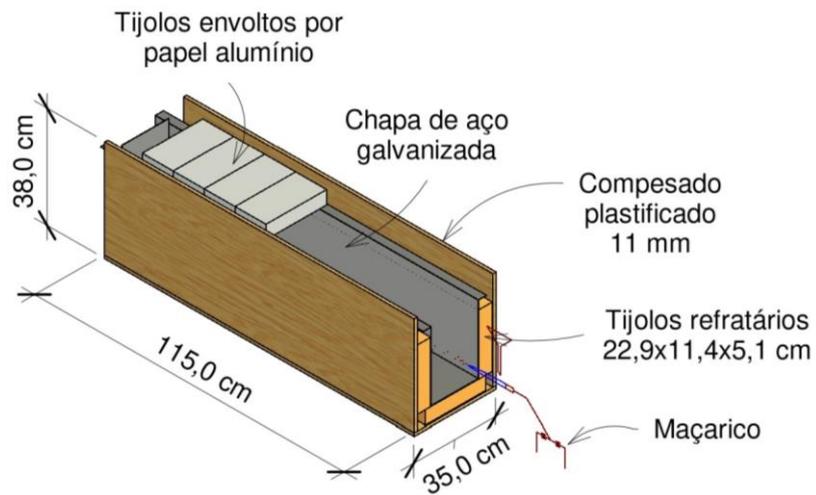


Fonte: Elaboração própria.

Figura 67 - Detalhe isométrico do aparato.

### Detalhe Isométrico

Esc: 1:20

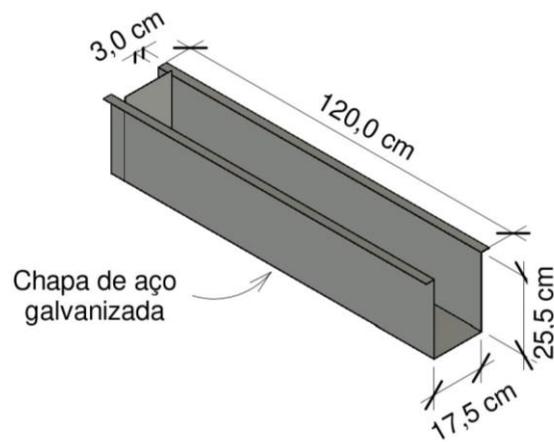


Fonte: Elaboração própria.

Figura 68 - Detalhes isométrico da chapa de aço galvanizada.

Detalhe da Chapa

Esc: 1:20



Fonte: Elaboração própria.