

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JULIANO PASE NETO**

**MICROESFERAS PRODUZIDAS A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ  
PARA APLICAÇÃO NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA HORIZONTAL**

**Alegrete  
2023**

**JULIANO PASE NETO**

**MICROESFERAS PRODUZIDAS A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ  
PARA APLICAÇÃO NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA HORIZONTAL**

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  
2023**

**JULIANO PASE NETO**

**MICROESFERAS PRODUZIDAS A PARTIR DA CINZA DA CASCA DE ARROZ PARA  
APLICAÇÃO NA SINALIZAÇÃO VIÁRIA HORIZONTAL**

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: 26 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

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

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA

Profa. Dra. CHIARA VALSECCHI - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 18:27, 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 **1047414** e o código CRC **B5AA82E8**.

Dedico aos meus pais e meus irmãos, por terem me acompanhado ao longo desta jornada, sempre me incentivando e apoiando.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Estelamaris Bertoldo e Valdir Meneguetti Pase, por terem me dado força e estarem sempre comigo em todos momentos. Aos meus irmãos, Regina e Marcos, primos, tios e avós, que me apoiaram e torceram por mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes pela oportunidade de me orientar, sempre estando disposto a contribuir com conselhos, sugestões e auxílio constante na conclusão deste trabalho. Agradeço também a Prof. Dr. Chiara Valsecchi pela ajuda na realização das atividades desenvolvidas.

À Universidade Federal do Pampa, professores, técnicos e funcionários que durante estes cinco anos, sempre contribuíram para minha formação. Ao professor Dr. Deividi da Silva Pereira da Universidade Federal de Santa Maria por ter disponibilizado o retrorrefletômetro, aparelho necessário para a aferir a retrorrefletividade das amostras.

Aos meus amigos, principalmente a Gangue do Chimarrão, pelas companhias, mates, risadas, noites de estudos, e muitos outros acontecimentos que compartilhamos durante a graduação. Por fim, agradeço as demais pessoas, aqui não citadas, que de alguma forma contribuíram para meu crescimento.

## RESUMO

A sinalização viária corresponde a um instrumento essencial das rodovias, uma vez que permite a visualização desta em condições adversas de tempo e iluminação. Neste sentido, para que se tenha uma melhora na visibilidade, é essencial que as demarcações sejam retrorreflexivas. A retrorrefletividade na sinalização viária ocorre quando microesferas de vidro sólidas são agregadas às tintas de sinalização viária horizontal. Dentre os diversos tipos, as microesferas do tipo I-B, de acordo com a norma NBR 16184:2021, possuem diâmetro médio 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. Estas microesferas normalmente são fabricadas com vidros sódico-cálcicos reciclados. Por outro lado, vidros feitos a partir da cinza da casca de arroz (CCA) vem sendo produzidos na UNIPAMPA, campus Alegrete uma vez que este material possui um alto percentual de dióxido de silício, principal material constituinte no vidro. Sendo assim, este trabalho visa a produção de microesferas produzidas com CCA na composição e também areia na composição. Foi feito um estudo comparativo para estas duas composições (areia ou cinza) em termos de morfologia, granulometria e medidas de retrorrefletividade, considerando também normas vigentes. Os resultados mostraram que ambas as amostras satisfazem as normas. Mais do que isto, as microesferas produzidas a partir da cinza da casca de arroz podem ser utilizadas na sinalização viária horizontal, dando um fim adequado para este resíduo industrial, ajudando no fechamento do ciclo produtivo do arroz.

Palavras-Chave: Sustentabilidade. Cinza da casca de arroz. Microesferas. Retrorrefletividade. Sinalização viária.

## ABSTRACT

Road signs correspond to an essential tool on highways, as they allow visualization in adverse weather and lighting conditions. In this sense, in order to have an improvement in visibility, it is essential that the demarcations must be retroreflective. Retroreflectivity in road markings occurs when solid glass microspheres are added to horizontal road marking paints. Among the different types, type I-B microspheres, according to the NBR 16184:2021 standard, have an average diameter of around 150  $\mu\text{m}$  and are mixed with the paint before application. According to NBR 16184:2021, the microspheres must be clean, clear and colorless for use in road signs. These microspheres are usually manufactured with recycled sodic-calcium glass. On the other hand, glass made from rice husk ash (RHA) has been produced at unipampa, campus Alegrete, since this material has a high percentage of silicon dioxide, the main constituent material in glass. Therefore, this work aims at the production of microspheres produced with CCA in the composition and also sand in the composition. A comparative study was carried out for these two compositions (sand or ash) in terms of morphology, granulometry and retroreflectivity measurements, also considering current regulations. The results showed that both samples are in accordance with the regulations. More than that, the microspheres produced from rice husk ash can be used in horizontal road signs, giving an adequate end to this industrial waste, helping to close the rice production cycle.

Keywords: Sustainability. Rice husk ash. Microspheres. Retroreflectivity. Road signage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contínuo (a); Tracejado (b); Seta e marcas de canalização (c). .....	22
Figura 2 - Cores utilizadas em lombadas (a); Cores utilizadas em vaga de estacionamento exclusiva para deficientes físicos (b); Cores utilizadas em faixas de rolamento e ciclovias (c).....	23
Figura 3 - Marca longitudinal contínua dupla amarela (a); Marca longitudinal contínua e seccionada amarela (b); Marcas longitudinais contínua e seccionadas brancas (c). .....	24
Figura 4 - Linha de retenção e faixa de pedestres zebreada (a); Linhas de redução de velocidade (b); Marcação de cruzamento ferroviário (c). .....	24
Figura 5 - Linha de canalização em vias com fluxo veiculares de mesmo sentido (a); Marcação de áreas não utilizáveis no pavimento em movimentações veiculares de sentido oposto (b).....	25
Figura 6 - Marcas de delimitação de estacionamento de veículos específicos (a); Marcação de áreas regulamentadas para estacionamento e paradas (b); Marcação de proibição de parada e estacionamento (c). .....	26
Figura 7 - Setas indicativas para execução de movimentos (a); Símbolo indicativo de ciclovia (b); Legendas (c). .....	26
Figura 8 - Diagrama do equipamento baseado no método da queda gravitacional. .	29
Figura 9 - Micrografia dos fragmentos vítreos irregulares (a); Micrografia dos fragmentos após processo de esferolização (método da queda gravitacional) (b)....	30
Figura 10 - Diagrama do equipamento baseado no método da chama horizontal. ...	30
Figura 11 - Micrografia dos fragmentos vítreos irregulares (a); Micrografia dos fragmentos após processo de esferolização (método da chama horizontal) (b). .....	31
Figura 12 - Diagrama do equipamento baseado no método da pulverização de plasma.....	32
Figura 13 - Micrografia das microesferas produzidas pelo método da pulverização de plasma (aumento de 12x).....	33
Figura 14 - Diagrama do equipamento baseado no método flutuação de pós. ....	33
Figura 15 - Micrografia das microesferas produzidas pelo método da flutuação de pós. ....	34
Figura 16 - Equipamento baseado no método da chama horizontal. ....	35
Figura 17 - Micrografia óptica das microesferas produzidas pelo autor. ....	35



Figura 18 - Aparato baseado no método da chama horizontal utilizado pelo autor...	36
Figura 19 - Resultado da retrorrefletividade para geometrias de 15 (a) e 30 m (b)...	37
Figura 20 - Reflexão especular. ....	38
Figura 21 - Reflexão difusa. ....	38
Figura 22 - Retrorreflexão. ....	39
Figura 23 - Retrorrefletividade da microesfera de vidro. ....	39
Figura 24 – Ancoragem e ponto focal das microesferas de vidro.....	40
Figura 25 - Detalhes da geometria de 15 e 30 m do equipamento Retrorrefletômetro. .....	41
Figura 26 - Fluxograma esquemático do processo experimental. ....	42
Figura 27 – Vidros que foram moídos (a); Fragmentos irregulares após moagem manual (b). ....	43
Figura 28 – Conjunto de peneiras utilizadas. ....	44
Figura 29 - Armazenamento de fragmentos irregulares após o peneiramento.....	45
Figura 30 – Equipamento utilizado(a); Chapas de aço para evitar perdas de microesferas (b e c).....	46
Figura 31 - Recipiente retangular para coleta das microesferas produzidas.....	46
Figura 32 - Maçarico (a); Registros do maçarico (b); Funil (c). ....	47
Figura 33 - Gás Oxigênio (a); Gás GLP (b).....	48
Figura 34 - Chama com o gás GLP acendido (a) Liberação do gás Oxigênio (b); Lançamento dos fragmentos irregulares (c). ....	49
Figura 35 - Marca de 50 cm para recolhimento das microesferas (a) Microesferas produzidas (b). ....	49
Figura 36 - Microscópio Óptico (a); Distribuição das microesferas na lâmina do microscópio (b).....	50
Figura 37 - Interface do Programa IsCapture.....	50
Figura 38 - Retrorrefletômetro Horizontal Clássico. ....	52
Figura 39 - Superfície para medidas de retrorrefletividade. ....	52
Figura 40 - Placa de MDF para suporte da superfície a ser pintada (a); Caixa plástica retangular (b).....	53
Figura 41 - Partículas encontradas no processo de microscopia óptica. ....	55
Figura 42 - Histograma (cinza escuro) e curva de distribuição normal (azul) para as microesferas produzidas com o vidro da CCA. ....	57
Figura 43 - Granulometria das microesferas produzidas com o vidro de CCA.....	58

Figura 44 - Histograma e curva de distribuição normal para as microesferas produzidas com o vidro de areia. ....	58
Figura 45 - Granulometria das microesferas produzidas com o vidro de areia. ....	59
Figura 46 - Comparativo entre as amostras 1, 2 e 5 para as geometrias de 15 e 30 m. ....	60
Figura 47 – Comparativo entre as amostras 1, 3 e 6 para as geometrias de 15 e 30 m. ....	61
Figura 48 – Comparativo entre as amostras 1, 4 e 7 para as geometrias de 15 e 30 m. ....	61
Figura 49 - Comparativo entre as amostras 2 e 5 com as amostras 3 e 6, para as geometrias de 15 e 30 m.....	63
Figura 50 – Comparativo entre as amostras 3 e 6 com as amostras 4 e 7, para as geometrias de 15 e 30 m.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria de cada tipo de Esferas e Microesferas.....	28
Tabela 2 - Coeficiente de multiplicação para cada aumento da lente objetiva do microscópio. ....	51
Tabela 3 - Resultados percentuais para cada classificação das partículas contidas nas amostras analisadas.....	56
Tabela 4 - Diâmetro mínimo, máximo, valor médio e desvio padrão das microesferas. ....	56
Tabela 5 - Amostras realizadas para análise. ....	60
Tabela 6 - Resultado das medidas de retrorrefletividade para cada amostra. ....	64

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CCA – Cinza da casca de arroz  
CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito  
CTB – Código de Trânsito Brasileiro  
DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte  
EVA – Etileno acetato de vinila  
GLP – Gás liquefeito de petróleo  
GONMDI – Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos  
SEM ME – Sem microesferas  
MDF – Fibras de média densidade  
MO – Microscópio Óptico  
NBR – Norma Brasileira

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.3 Justificativa.....</b>	<b>19</b>
<b>1.4 Organização do Trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Sinalização Viária .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1 Sinalização Viária Horizontal.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Microesferas de Vidro .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2 Fabricação de microesferas no laboratório do Grupo GOMNDI .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3 Retrorrefletividade .....</b>	<b>37</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Vidro .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Moagem dos vidros.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3 Produção de microesferas .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4 Avaliação morfológica das Microesferas .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5 Avaliação da Retrorrefletividade das Microesferas .....</b>	<b>51</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Avaliação morfológica das microesferas.....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Avaliação da retrorrefletividade das microesferas .....</b>	<b>59</b>

**5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....66**

**REFERÊNCIAS.....67**

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da sociedade, vários segmentos industriais atualmente produzem uma quantidade significativa de resíduos, que se descartados incorretamente, causam um desequilíbrio ambiental. Neste sentido, a Agenda 2030 consiste em um plano de ação global que reúne 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas. Dentre tais objetivos, podem-se destacar:

**Objetivo 02 - Fome zero e agricultura sustentável:** acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável.

**Objetivo 08 - Trabalho decente e crescimento econômico:** promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos.

**Objetivo 09- inovação infraestrutura:** construir infraestrutura resiliente, promover a industrialização inclusiva e sustentável, e fomentar a inovação.

**Objetivo 17- Parcerias e meios de implementação:** fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável.

Observa-se nestes objetivos uma preocupação em gerar inovação considerando meios sustentáveis e com uma preservação da natureza. Assim, torna-se fundamental utilizar materiais renováveis e desenvolver metodologias e tecnologias para a fabricação de produtos gerando valor agregado a eles. O foco em inovação de produtos considerando materiais sustentáveis justificam em boa parte os objetivos citados acima. Por outro lado, muitos produtos que poderiam usar materiais sustentáveis em sua fabricação continuam sendo produzidos com matéria prima que degrada o meio ambiente.

A indústria vidreira, por exemplo, utiliza grande parte de reservas naturais de areias de quartzo, uma vez que a sílica encontrada na areia é o principal componente na fabricação do vidro (LUZ, 2008). Embora o Brasil possua grandes reservas naturais e é um grande produtor de areias de quartzo - a produção de areia bruta comercializada segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM) foi de 255.807.957 toneladas (ANM, 2010). A extração destas reservas naturais acarreta e contribui de forma significativa para a degradação do meio ambiente, prejudicando por exemplo a vegetação nativa, com a sua remoção, além de problemas de erosão e assoreamento de cursos de água. Desta forma, um material alternativo sustentável com alto teor de

sílica permitiria a produção de vidros e ajudaria nesta preservação. Dentre os materiais alternativos para a produção de vidros, a cinza proveniente da queima da casca de arroz pode ser considerada um potencial substituto da sílica proveniente da areia uma vez que, além de ser um material renovável, é possível produzir em torno de 90% de sílica a partir da cinza através de tratamentos térmicos e químicos (GONÇALVES, 2019).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), estima-se que no Brasil exista um consumo aproximado de 13.982 toneladas/ano de areia industrial bruta para a produção de vidros (ANM, 2010). Por outro lado, o Brasil gera em torno de 443.591 toneladas/ano de cinza de casca de arroz (CCA) conforme descrito por Della (2005). Uma vez que a CCA é considerada um lixo industrial, boa parte desse material poderia ser utilizado na indústria vidreira, seja como um percentual deste material junto a areia ou mesmo na total substituição da areia. A reutilização da CCA abriria a possibilidade de valorização comercial a esse resíduo, além de minimizar impactos ambientais e fechar o ciclo produtivo da cadeia do arroz. Por outro lado, dentre as diversas utilizações de materiais vítreos, a produção de microesferas é de grande interesse já que estas possuem uma gama de aplicações em diversos segmentos tais como: indústria petrolífera e aeronáutica, medicina para tratamentos oncológicos e também a sua utilização na sinalização viária (BARROS FILHO, 2012; WATKINS, 2015; POTTERS, 2013).

Para o caso das microesferas sólidas, a principal aplicação destas está no segmento de sinalização viária. A norma que regulamenta esta aplicação é a ABNT NBR 16184: 2021 – Sinalização horizontal viária- Esferas e Microesferas de vidro- Requisitos e métodos de ensaio. A classificação de acordo com a NBR 16184: 2021 é adequada em tipos, de acordo com a faixa granulométrica das microesferas de vidro e são separadas em grupos de aplicação. Por exemplo, microesferas do Tipo IB (Premix) são aquelas incorporadas à tinta, permitindo a retrorefletorização somente após o desgaste da superfície da película aplicada, quando se tornam expostas. Estas microesferas, em seu maior percentual, devem ter diâmetros menores que 212  $\mu\text{m}$ .

Já as microesferas do Tipo IIA (*Drop-on*), são aquelas aplicadas por aspersão, em conjunto com tinta ou o termoplástico, de maneira que permaneçam na superfície da película aplicada, permitindo sua imediata retrorefletorização (NBR 16184:2021). Este tipo possui diâmetros superiores a 300  $\mu\text{m}$ . Estima-se que no Brasil se utilize



mais de 20 mil toneladas de microesferas todo o ano. Considerando que o Brasil gera em torno de 400 mil toneladas de cinza por ano e que, aproximadamente, 1 tonelada de cinza (junto com outros materiais que compõem o vidro) gera 1 tonelada de microesferas, o mercado interno de microesferas poderia ser completamente atendido considerando como fonte de sílica a cinza da casca de arroz ao invés da areia que normalmente é utilizada na produção do vidro inicial. Sendo assim, este trabalho tem como foco a produção e caracterização de microesferas do Tipo IB para a aplicação na sinalização viária horizontal, considerando vidros fabricados a partir da CCA e também areia, para efeito de comparação.

### **1.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar parâmetros morfológicos e nível de retrorreflexão de microesferas do Tipo IB, produzidas a partir do método de chama horizontal, considerando vidros produzidos a partir da cinza da casca de arroz e a partir da areia convencional.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Produzir microesferas retrorrefletoras do tipo IB pelo método de chama horizontal a partir de vidros produzidos a partir da cinza da casca de arroz;
- Produzir microesferas retrorrefletoras do tipo IB pelo método de chama horizontal a partir de vidros produzidos a partir da areia;
- Avaliar o rendimento das microesferas em termos morfológicos (formato esférico);
- Avaliar níveis de retrorreflexão nas geometrias de 15 e 30 m das amostras produzidas com a utilização de tinta branca, considerando densidades e diâmetros diferentes;
- Comparar os níveis de retrorreflexão das microesferas produzidas com CCA e com areia e também com os valores mínimos especificados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e pelo Departamento autônomo de estradas de rodagem (DAER).

### 1.3 Justificativa

Embora as microesferas já tenham sido produzidas no grupo GOMNDI (Grupo de óptica, micro e nanofabricação de dispositivos), como em Silva (2020) e Machado (2022), este foi o primeiro trabalho do grupo em que as microesferas foram caracterizadas do ponto de vista de níveis de retroreflexão, com o objetivo de avaliar a qualidade das microesferas quando comparadas com microesferas de mesmas características, mas com areia em sua composição. Neste sentido, este trabalho visa fechar o ciclo de produção de arroz, dando um fim sustentável a cinza da casca de arroz, através da produção de vidros e sua utilização na produção de microesferas sólidas aplicadas a sinalização viária horizontal.

### 1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está estruturado nos seguintes capítulos:

1. **Introdução:** neste capítulo é apresentado uma motivação do tema de estudo, buscando uma relação do tema com o desenvolvimento sustentável, além dos objetivos e também a justificativa;
2. **Revisão bibliográfica:** neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica da literatura existente em termos dos conceitos pertinentes ao tema do trabalho, abordando principalmente as microesferas e sua aplicação na sinalização viária horizontal;
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 DE LITERATURA

Em conformidade com os objetivos apresentados no capítulo 1, pesquisou-se concepções e definições presentes na literatura sobre as características da sinalização viária, métodos de produção de microesferas, diferentes tipos de reflexão de luz e uso de equipamento para realização de medidas de retrorrefletividade.

### 2.1 Sinalização Viária

A sinalização viária é um instrumento de suma importância para a segurança no trânsito. Através de dispositivos fixos como, por exemplo, placas, painéis, marcas viárias e dispositivos auxiliares, estas organizam, advertem e orientam os usuários (DNIT, 2010). O Código Brasileiro de Trânsito, lei número 9503 de, 23 de setembro de 1997 (CTB), que estabelece as competências das autoridades de trânsito e determina infrações, condutas e penalidades aos motoristas, define sinalização 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).

Devido a sua importância, a sinalização deve atrair a atenção e confiança dos utilizadores, possibilitando tempo de reação suficiente para a realização da ação que nela estiver indicada. Neste sentido, os dispositivos de sinalização viária devem ter dimensões que facilitem o seu entendimento e devem estar localizadas em pontos apropriados à visualização de motoristas e pedestres (DNIT, 2010).

Problemas na sinalização (deficiência, inadequação, insuficiência ou deterioração) impactam fortemente a ocorrência de acidentes, destacando-se três aspectos cruciais: falta de visibilidade das marcas longitudinais (linhas de bordo, separações de faixas e paradas obrigatórias) no período noturno e em condições climáticas adversas (chuva e neblina); escassez de elementos verticais refletivos em curvas, ilhas e obras; e deficiência de informações prévias para mudanças na via (obras na pistas, semáforos, acidentes e cruzamentos com via preferencial) (FERRAZ, 2012).

O artigo 87, do Código brasileiro de trânsito classifica os sinais como:

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

Para Branco (1999), durante o percurso por uma rodovia, quase todas as informações recebidas pelo motorista são de natureza visual. As que mais rapidamente o motorista percebe são aquelas localizadas no pavimento - sinalização viária horizontal - para onde o condutor dirige continuamente a sua atenção.

### **2.1.1 Sinalização Viária Horizontal**

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2010), define sinalização viária horizontal como o “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.” (DNIT, 2010, p. 219)

Para o Conselho Nacional de Trânsito, a sinalização horizontal é fundamental, pois otimiza o espaço viário disponível maximizando seu uso, além de aumentar a segurança em condições desfavoráveis, como neblina e chuva. Além disso, uma correta sinalização permite uma visualização no período noturno ajudando na redução de acidentes (CONTRAN, 2007)

Estas demarcações apresentam padrões que devem ser seguidos nos projetos de rodovias. Neste sentido, o CONTRAN (2007) determina as formas de traçado e cores em:

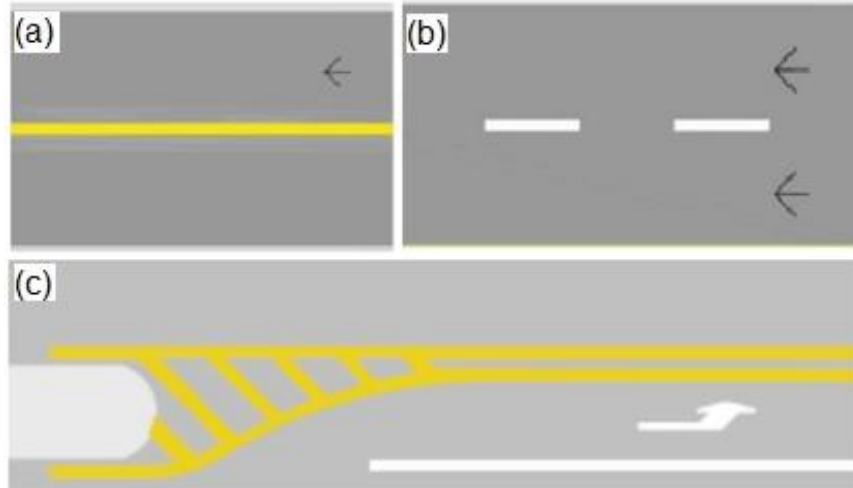
#### **a) Traçado:**

- Contínuo: linhas sem interrupção, aplicadas em trechos específicos da via, onde não se pode realizar ultrapassagens;
- Tracejado: linhas interrompidas aplicadas em sequência, com extensão igual ou maior que o traço, em trechos que as ultrapassagens são permitidas;

- Setas, símbolos e legendas: informações no formato de desenhos gravados sobre o pavimento, para informar uma situação ou como complemento para a sinalização vertical.

É mostrado na Figura 1 imagens dos diferentes tipos de traçados.

Figura 1 - Contínuo (a); Tracejado (b); Setas e marcas de canalização (c).



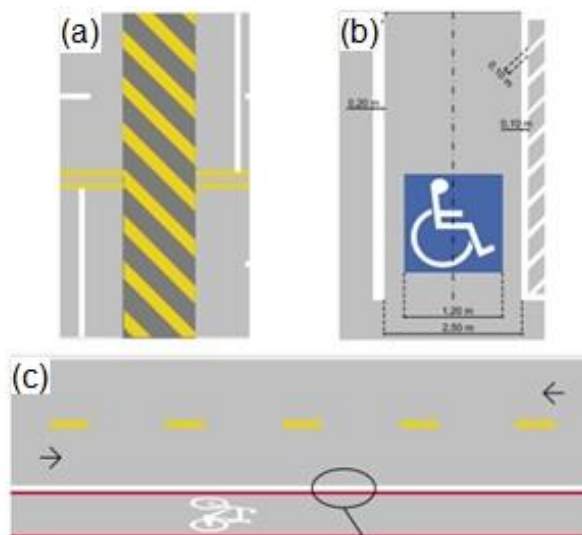
Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

#### b) Cores:

- Amarela: utilizada quando é necessário distinguir movimentos de fluxos opostos, regulariza os locais de ultrapassagens e deslocamentos laterais e onde há proibições de estacionamento ou parada, além de demarcar também obstáculos, como as lombadas;
- Branca: utilizada para separar movimentos de mesmo sentido, delimitar áreas de circulação, e define trechos de pistas apropriados para estacionamentos, marcação de faixas de pedestres, e também para inscrever setas, símbolos e legendas;
- Vermelha: utilizada em ciclovias ou ciclofaixas e inscrever símbolo (cruz);
- Azul: utilizada em áreas especiais de parada ou estacionamento para pessoas com deficiência física ou idosas.
- Preta: utilizada para contraste entre marcas viárias e o pavimento, usada principalmente em pavimentos de concreto.

É mostrada na Figura 2 alguns exemplos de imagens das diferentes cores aplicadas à sinalização viária horizontal.

Figura 2 - Cores utilizadas em lombadas (a); Cores utilizadas em vaga de estacionamento exclusiva para deficientes físicos (b); Cores utilizadas em faixas de rolamento e ciclovias (c).



Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

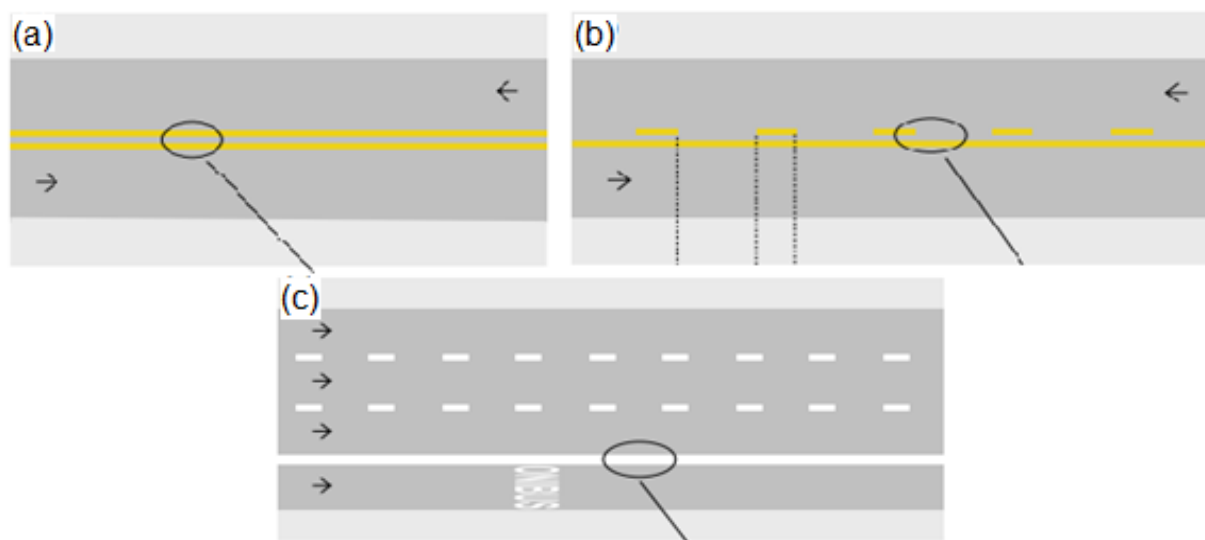
O CONTRAN (2007) explica que a pintura empregada na sinalização pode ser feita por tintas, massas plásticas de dois componentes, massas termoplásticas, entre outras. O tipo de pintura aplicada na pista de rolamento depende da situação do projeto, volume e classificação do tráfego, manutenção, etc.

Ainda, classifica as marcas em:

- Marcas Longitudinais - usadas para distinguir e organizar as correntes de tráfego, definindo o espaço em que os veículos circulam. As marcas amarelas contínuas simples ou duplas, separam os movimentos de fluxo opostos, e regulamentam trechos de ultrapassagem e movimentos laterais. As seccionadas apenas ordenam os movimentos veiculares opostos. As marcas brancas contínuas possuem funções de delimitação de pista (linha de brodo) e separam movimentos de mesmo fluxo, determinando trechos onde é proibido realizar ultrapassagens.

As marcas seccionadas apenas ordenam os fluxos de veículos de mesmo sentido. Na Figura 3, é possível visualizar imagens das diferentes marcas longitudinais.

Figura 3 - Marca longitudinal contínua dupla amarela (a); Marca longitudinal contínua e seccionada amarela (b); Marcas longitudinais contínua e seccionadas brancas (c).

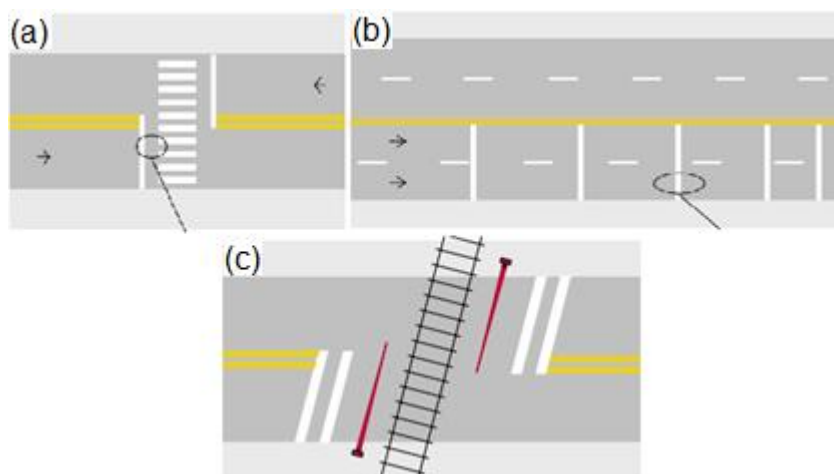


Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

- Marcas Transversais - usadas para organização dos deslocamentos frontais dos veículos orientando movimentos de outros veículos e pedestres, e também indicam travessias de pedestres (faixas de segurança).

Na Figura 4 é possível observar imagens das diferentes marcas transversais

Figura 4 - Linha de retenção e faixa de pedestres zebreada (a); Linhas de redução de velocidade (b); Marcação de cruzamento ferroviário (c).

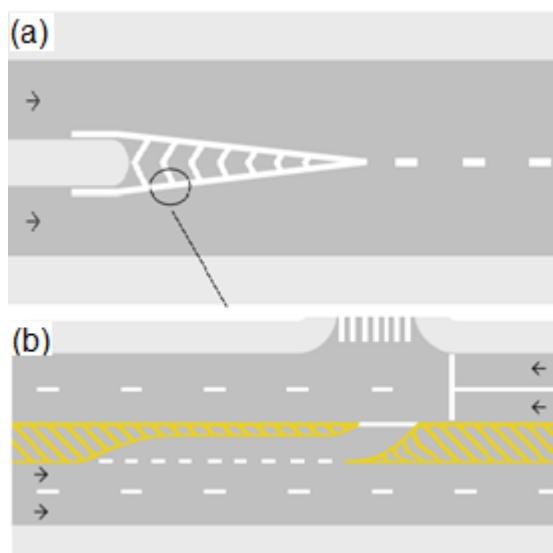


Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

- Marcas de Canalização - usadas para orientar os fluxos de tráfego em uma via, concedendo segurança e desempenho em situações em que é necessário reorganização do fluxo natural.

É mostrada na Figura 5 imagens das diferentes marcas de canalização.

Figura 5 - Linha de canalização em vias com fluxo veiculares de mesmo sentido (a);  
Marcação de áreas não utilizáveis no pavimento em movimentações veiculares de  
sentido oposto (b).



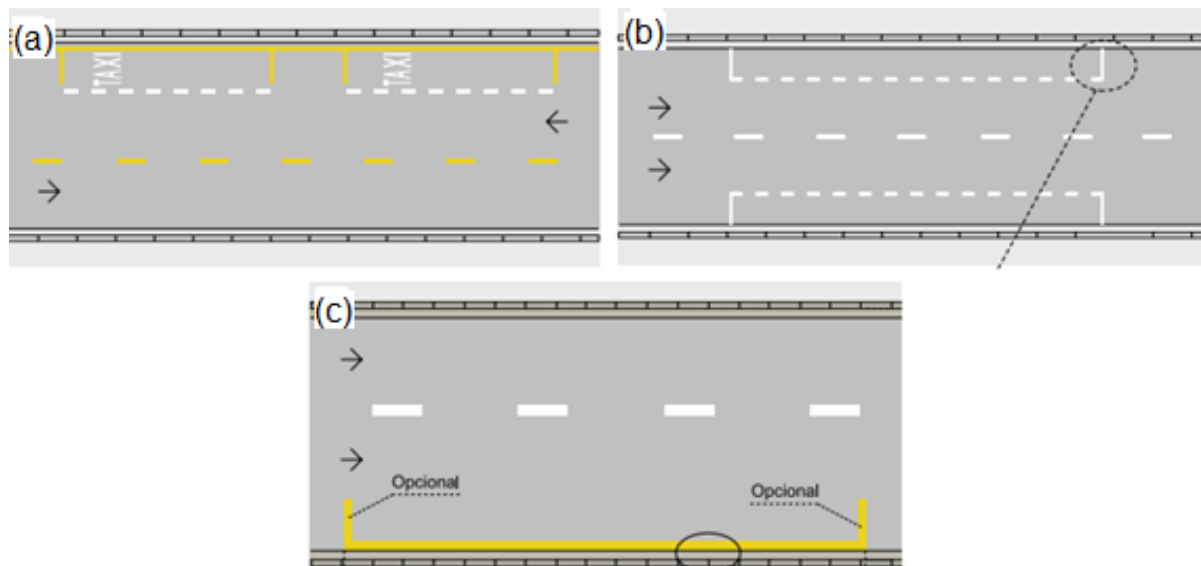
Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

- Marcas de Delimitação e Controle de Parada e/ou Estacionamento - usadas para determinar as áreas onde é permitido ou proibido estacionamento ou paradas de veículos na via.

A Figura 6 mostra imagens das diferentes marcas de delimitação e controle de estacionamento.



Figura 6 - Marcas de delimitação de estacionamento de veículos específicos (a); Marcação de áreas regulamentadas para estacionamento e paradas (b); Marcação de proibição de parada e estacionamento (c).

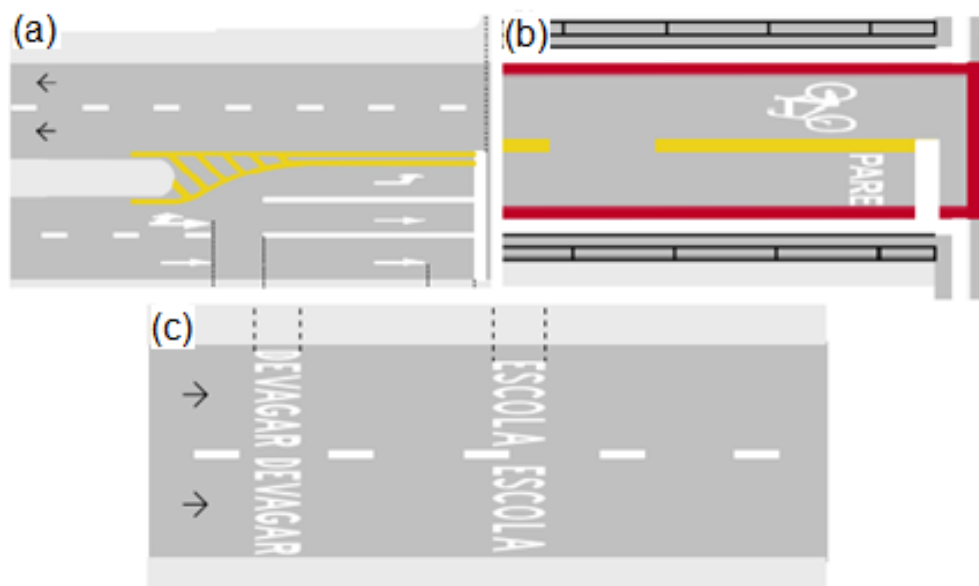


Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

- Inscrições no Pavimento - usadas para o auxílio do condutor a identificar as características da via, permitindo adotar decisão adequada no tempo apropriado.

Na Figura 7 é possível observar imagens das diferentes inscrições no pavimento.

Figura 7 - Setas indicativas para execução de movimentos (a); Símbolo indicativo de ciclovia (b); Legendas (c).



Fonte: Adaptado CONTRAN (2007).

O DNIT (2010) salienta que a sinalização horizontal funciona como um guia para os usuários no período noturno, pois facilita a percepção das faixas de rolamento. Para que as condições de visibilidade necessárias sejam alcançadas, Branco (1999) explica que, durante o período diurno, é necessário haver um bom contraste, entre a sinalização e o pavimento, e para o período noturno é necessária a retrorefletividade.

Um meio para garantir a retrorefletividade no período noturno, de acordo com Machado (2019), é a aplicação de microesferas de vidro nas tintas de demarcação viária, as quais são utilizadas para pintura da sinalização horizontal. Estas microesferas possuem a capacidade de refletir a luz dos faróis dos veículos de volta ao condutor. Segundo Branco (1999), existem dois métodos de incorporação das microesferas na pintura, por mistura ou por aspersão imediatamente após a demarcação do pavimento.

## **2.2 Microesferas de Vidro**

As microesferas sólidas, de acordo com Schwab (1999), são fabricadas com vidro composto de soda-cal-sílica ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ ), com teor de sílica acima de 65%. Produzidos com restos de vidros, estes são moídos em partículas menores e submetidos a temperatura de 1200 °C, a velocidade controlada, em fornos verticais com correntes ascendentes de gás aquecido, que através da tensão superficial transforma os fragmentos em esfera. A esferolização dos fragmentos vítreos acontece devido ao acréscimo de temperatura, que reduz a viscosidade do vidro. Logo, estas partículas devem passar por uma área aquecida com temperatura apropriada, que podem ser alcançadas em fornos ou chamas. (SOUZA, 2013).

A ABNT NBR 16184:2021 Sinalização Horizontal Viária – Esferas e microesferas de vidro – Requisitos e métodos de ensaio, detalha os requisitos e métodos de ensaios para esferas e microesferas de vidro usados na sinalização horizontal viária. A norma em questão determina que as microesferas de vidro possuem diâmetros menores que 1000  $\mu\text{m}$ , e as esferas possuem diâmetros superiores.

As microesferas de vidro são classificadas de acordo com o uso, conforme descrição abaixo:

- Tipos IA, V e VI: são incorporadas as massas termoplásticas, antes da aplicação da pintura no pavimento, permanecendo na parte interna da película. A retrorrefletorização acontecerá no momento em que estiverem expostas, logo deve ocorrer o desgaste da película. Os tipos V e VI são utilizados em trechos que as condições climáticas (chuva e neblinas) são intensas.
- Tipo IB: são incorporadas às tintas, e também podem ser incorporadas ao plástico frio de acordo com as instruções do fabricante, antes da aplicação no pavimento. Este tipo ficará dentro da película, e apresentará a retrorrefletorização após o desgaste da película.
- Tipos IIA, IIB, IIC, IID, IIE, III e IV: a aplicação ocorre por aspersão, em tintas ou termoplásticos, elas permanecem na superfície da película aplicada, permitindo retrorrefletorização imediata. Os tipos III e IV são utilizados em trechos que as condições climáticas (chuva e neblinas) são intensas.

É apresentada na Tabela 1 a granulometria de cada tipo de microesferas.

Tabela 1 - Granulometria de cada tipo de Esferas e Microesferas.

Peneiras		% passante											
Número	Abertura (µm)	Tipo I		Tipo II					Tipo III	Tipo IV	Tipo V	Tipo VI	Tipo VII
		A	B	A	B	C	D	E					
6	3350											100	
8	2360										100	95 - 100	
10	2000									100	95 - 100	80 - 95	
12	1700								100	95 - 100	80 - 95	10 - 40	
14	1400								95 - 100	80 - 95	10 - 40	0 - 5	
16	1180								80 - 95	10 - 40	0 - 5	0 - 2	100
18	1000			100		100	100	100	10 - 40	0 - 5	0 - 2		
20	850	100		98 - 100	100	90 - 100	95 - 100	95 - 100	0 - 5	0 - 2			95 - 100
25	710								0 - 2				
30	600	90 - 100		75 - 95		10 - 30	85 - 100	50 - 75					55 - 75
40	425				90 - 100			15 - 45					15 - 35
50	300	18 - 35	100	9 - 35		0 - 5	0 - 10	0 - 10					0 - 5
70	212		85 - 100		0 - 10		0						
80	180			0 - 5				0 - 2					
100	150	0 - 10	15 - 55		0 - 5								
140	106												
200	75	0 - 2											
230	63		0 - 10										

Fonte: Adaptado NBR 16184:2021.

Estas microesferas podem apresentar alguns tipos de defeitos, tais como:

- Partículas não esféricas: partículas com formatos ovóides, deformadas ou geminadas.
- Partículas angulares: unidades de vidros que não ocorreu fundição ou que apresentou quebras.

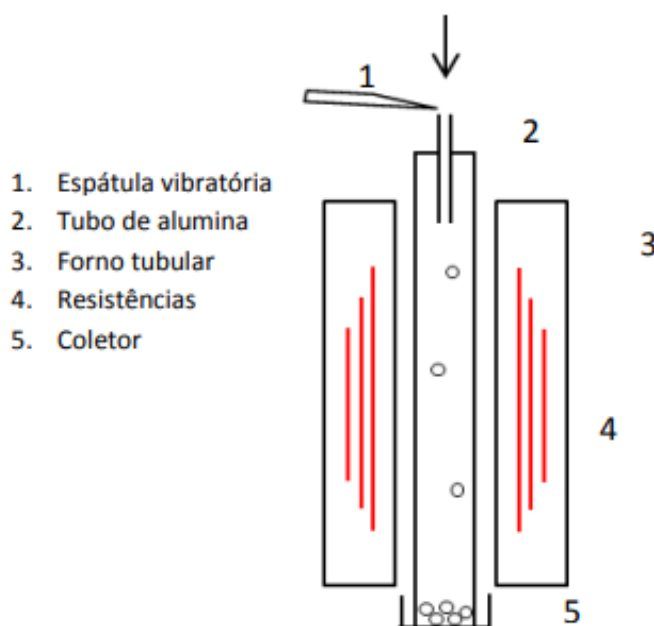
- Elementos estranhos: esferas ou microesferas que não são de vidro soda-cal;
- Partículas contendo Bolhas gasosas: esfera ou microesfera que apresenta mais de 25% de sua seção transversal ocupada por bolhas de gases.

Silva (2020), cita que para produzir microesferas existem quatro métodos, sendo eles:

- Método da queda gravitacional: Neste método, os fragmentos de vidro são lançados na parte superior de um equipamento instalado verticalmente, através da força gravitacional as partículas sofrem o fenômeno de queda livre. Durante a queda atravessam uma zona com alta temperatura (SOUZA, 2015).

Em seu estudo, Souza (2015) fabricou microesferas de vidro pelo método da queda gravitacional. O aparato utilizado está apresentado no diagrama da Figura 8.

Figura 8 - Diagrama do equipamento baseado no método da queda gravitacional.

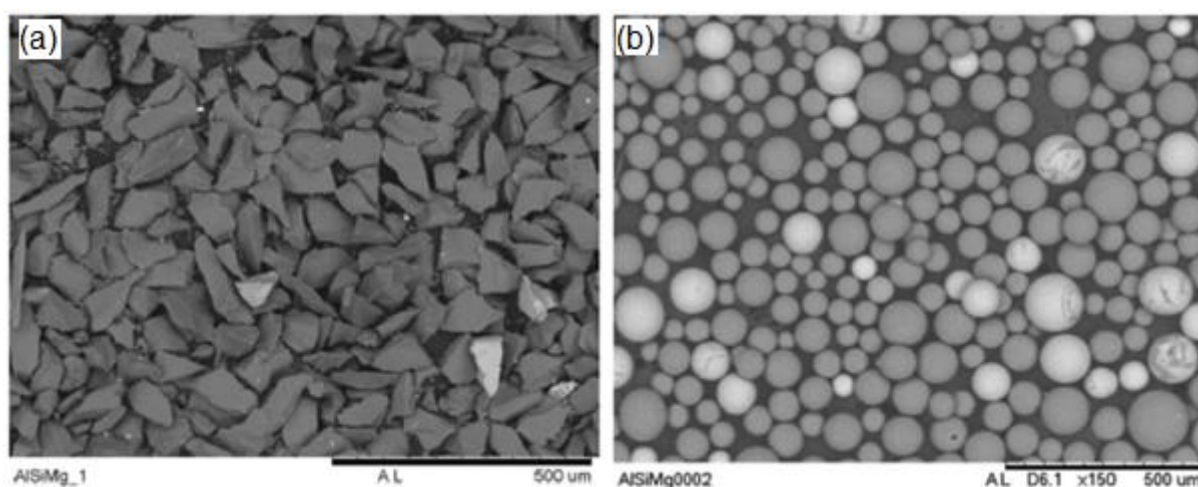


Fonte: Souza (2015, p.33).

Souza (2015), utilizou partículas vítreas compostas por aluminossilicatos de magnésio, o material foi moído em um moinho planetário por 20 minutos. Posteriormente o pó foi peneirado, para obter partículas entre 45 a 63  $\mu\text{m}$  (Figura 9-a). Com o auxílio de uma espátula vibratória, é introduzido o pó dentro do tubo de alumina, contido em um forno tubular a uma temperatura de 1420  $^{\circ}\text{C}$ . O pó deposita-se em um coletor instalado na parte inferior do equipamento. Análises de granulometria por difração a laser no pó coletado mostraram que as microesferas

geradas possuíam diâmetro médio de 93  $\mu\text{m}$  (Figura 9-b). Segundo Souza (2015), as microesferas produzidas apresentaram um diâmetro médio maior do que o pó peneirado devido à aglomeração dos fragmentos que permaneceram unidos por forças de Van der Waals. Na Figura 9, pode-se visualizar as partículas vítreas antes da esferolização e após o processo.

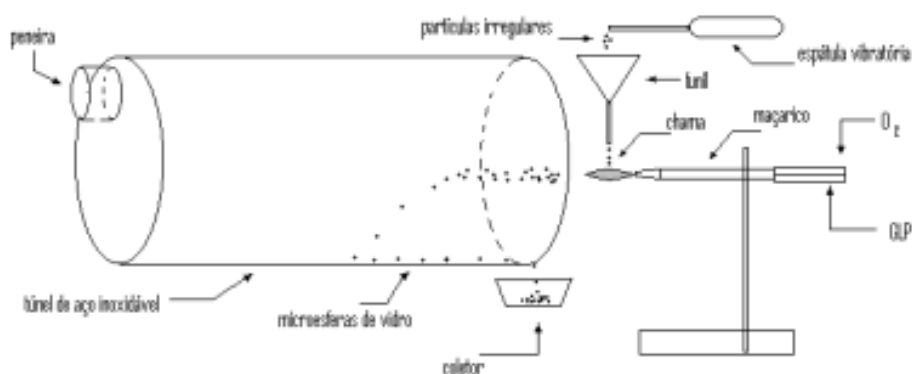
Figura 9 - Micrografia dos fragmentos vítreos irregulares (a); Micrografia dos fragmentos após processo de esferolização (método da queda gravitacional) (b).



Fonte: Adaptado Souza (2015).

- Método da chama horizontal: Neste método a fonte de calor é posicionada na horizontal, as partículas irregulares são lançadas sobre a chama, e por meio da pressão e temperatura da mesma, os fragmentos vítreos se deslocam horizontalmente ocorrendo a esferolização. Barros Filho (2012) produziu microesferas no aparato, representado pelo diagrama na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama do equipamento baseado no método da chama horizontal.



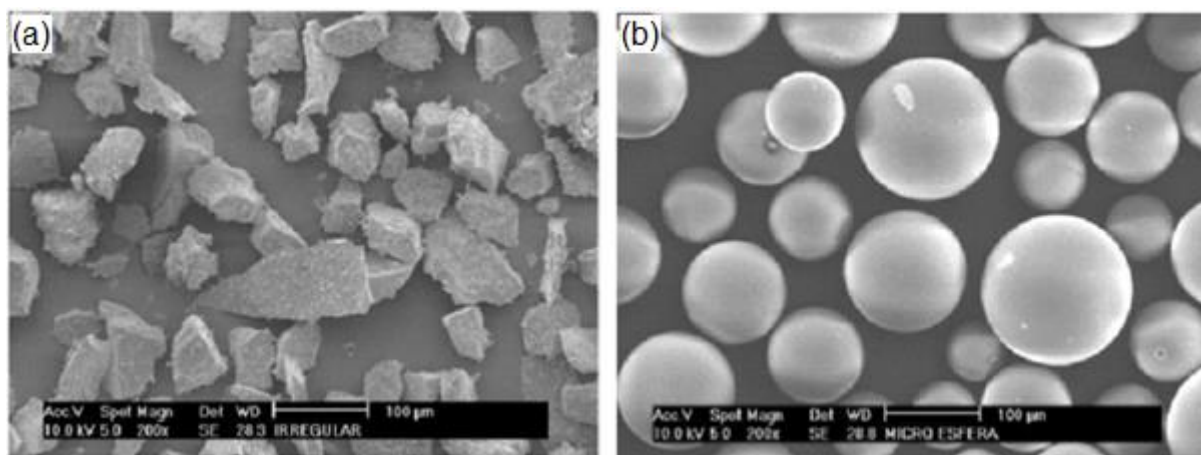
Fonte: BARROS FILHO (2012, p.43).

Neste estudo, foram utilizados fragmentos irregulares em diversas faixas granulométricas, dentro do intervalo de 0 a 106  $\mu\text{m}$ , moídos em um cilindro e um êmbolo de aço inoxidável acionado por um martelo. A chama foi composta por uma mistura, em diferentes proporções, entre uma fonte combustível (gás GLP) e uma fonte comburente (gás  $\text{O}_2$ ). Através do processo experimental, definiu-se a faixa granulométrica das partículas irregulares em 45 e 63  $\mu\text{m}$  (Figura 11-a).

Determinou-se também, que o ajuste das pressões dos gases em 1,35  $\text{kgf/cm}^2$  para o GLP e 2,5  $\text{kgf/cm}^2$  para o  $\text{O}_2$  ou 1,5  $\text{kgf/cm}^2$  para o GLP e 3,0  $\text{kgf/cm}^2$  para o  $\text{O}_2$ , tornava a chama mais quente (coloração azulada). Outro fator importante foi a posição em que as partículas eram depositadas após a passagem pela chama, constatou-se que quanto mais próximo da chama ficavam as partículas, menos tempo ela ficava em contato com a chama, e as que ficaram mais distantes tinham tempo de voo mais longos. Em análises de micrografia constatou-se que as partículas que permaneceram próximas da chama possuíam diâmetro médio maior do que as que se depositaram mais distantes.

Após o processo de passagem da chama, utilizou-se difração a laser para analisar a esfericidade das partículas. As microesferas geradas pelo processo apresentaram diâmetro médio de 116  $\mu\text{m}$ . É ilustrado na Figura 11 os fragmentos de vidro antes e após a passagem pela chama horizontal

Figura 11 - Micrografia dos fragmentos vítreos irregulares (a); Micrografia dos fragmentos após processo de esferolização (método da chama horizontal) (b).

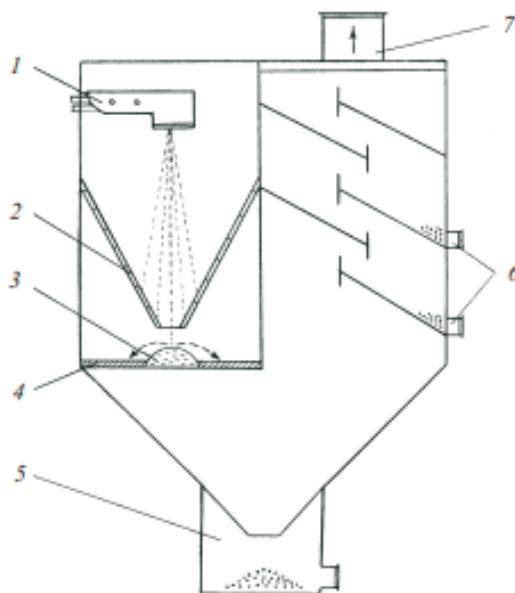


Fonte: Adaptado BARROS FILHO (2012).

- Pulverização de plasma: O método consiste em dispersar por pulverização fragmentos não esféricos, em um jato de gás. Após, as partículas são reunidas e

resfriadas. A elevada temperatura do plasma contribui para o avanço desta tecnologia para fabricação de microesferas (BESSMERTNYI et al, 2001). Na Figura 12 está representado o diagrama do aparato utilizado considerando este método.

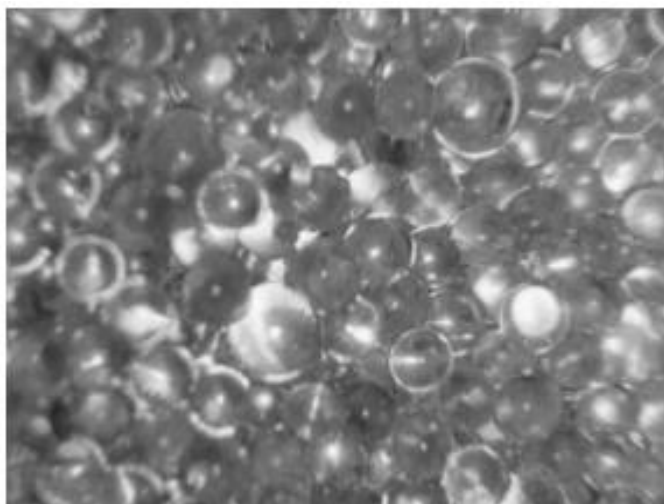
Figura 12 - Diagrama do equipamento baseado no método da pulverização de plasma.



Fonte: BESSMERTNYI *et al* (2001, p.269).

A produção neste método consiste em inserir fragmentos irregulares dentro do queimador de plasma, identificado na Figura 12 pelo número 1, onde, em razão da alta temperatura e do gás formador de plasma, são formadas as microesferas. Após, elas se resfriam enquanto se movem para um cone refratário. Depois, depositam-se em um hemisfério, que está sobre uma peneira vibratória. Este hemisfério separa as partículas esféricas das não padronizadas. As microesferas são acumuladas em um recipiente na parte inferior do equipamento. Os outros fragmentos são dispersados por aberturas nas laterais do aparato. Neste estudo, Bessmertnyi (2001), gerou microesferas com tamanhos variando entre 320 a 630  $\mu\text{m}$ . As microesferas geradas podem ser visualizadas na Figura 13.

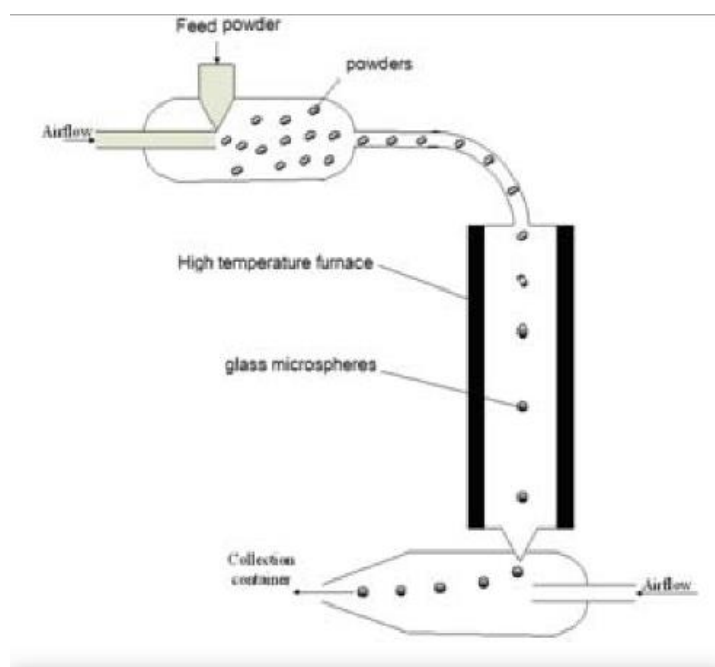
Figura 13 - Micrografia das microesferas produzidas pelo método da pulverização de plasma (aumento de 12x).



Fonte: BESSMERTNYI *et al* (2001, p.269).

● Método da flutuação de pós: Este método de fabricação consiste em insuflar as partículas irregulares vítreas utilizando um fluxo de ar em alta pressão, dentro de um forno aquecido em alta temperatura. Os fragmentos flutuam dentro do forno e ocorre a esferolização. Por fim, as microesferas encaminham-se para o fundo do aparato onde novamente são insufladas até o reservatório coletor (TONG *et al*, 2009). Na Figura 14 está representado o diagrama do aparato.

Figura 14 - Diagrama do equipamento baseado no método flutuação de pós.

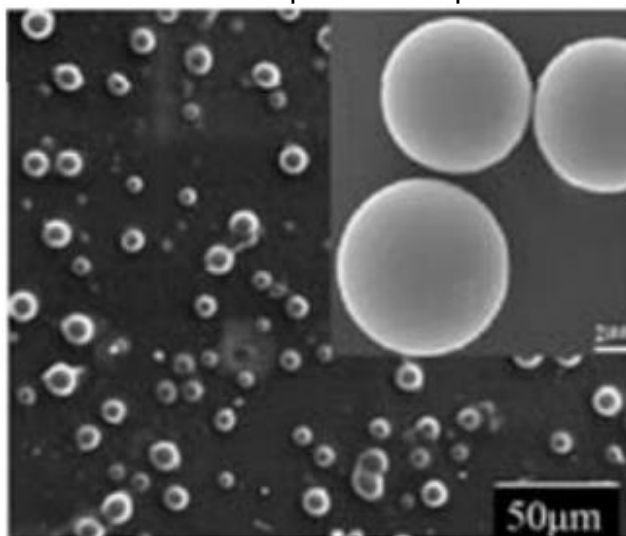


Fonte: TONG *et al* (2009).



Tong *et al* (2009), em seu estudo produziu microesferas de vidro com o equipamento baseado no método da flutuação de pós. Neste estudo, o vidro foi moído em fragmentos com granulometria abaixo de 35  $\mu\text{m}$  e foram introduzidos no equipamento, que estava a uma temperatura de 1600  $^{\circ}\text{C}$ . Tong *et al* (2009) obtiveram então microesferas de vidro com faixa granulométrica variando ente 1 e 30  $\mu\text{m}$ . A micrografia destas microesferas está demonstrada na Figura 15.

Figura 15 - Micrografia das microesferas produzidas pelo método da flutuação de pós.



Fonte: TONG *et al* (2009).

### 2.2.2 Fabricação de microesferas no laboratório do Grupo GOMNDI

O Grupo GOMNDI (Grupo de óptica, micro e nanofabricação de dispositivos), vem realizando pesquisas para otimizar a fabricação de microesferas retrorrefletoras para uso na sinalização horizontal. Silva (2020) realizou estudos em que utilizava cinza da casca de arroz, resíduo da produção de arroz, que possui alto teor de sílica, para a fabricação de vidros incolores, em sequência, gerou microesferas retrorrefletoras com este material.

A moagem do vidro foi realizada de forma manual com o pistilo e almofariz e após, o pó foi peneirado em um conjunto de peneiras de diferentes aberturas. O pó foi então submetido ao processo de esferolização pelo método da chama horizontal, apresentado na Figura 16.

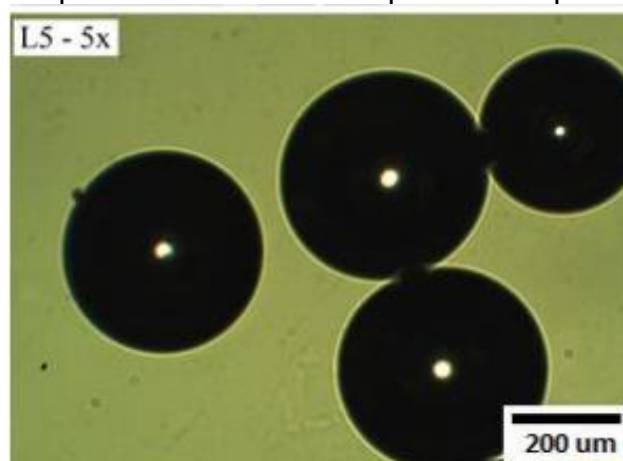
Figura 16 - Equipamento baseado no método da chama horizontal.



Fonte: Adaptado SILVA (2020, p.45).

A chama foi composta da mistura de um combustível (gás GLP), com pressão regulado em 1 kgf/cm<sup>2</sup> e um gás comburente (O<sub>2</sub>), com pressão regulada em 2 kgf/cm<sup>2</sup>. Através do funil, as partículas irregulares retidas em cada peneira foram lançadas separadamente, na chama, que devido à pressão e temperatura se deslocaram horizontalmente para a frente. O material era coletado por um recipiente e reintroduzido no aparato novamente. Ao todo, foram feitas três passagens na chama. Em cada passagem foram analisadas as formas das microesferas, utilizando um microscópio óptico. Na Figura 17 identifica-se as microesferas produzidas.

Figura 17 - Micrografia óptica das microesferas produzidas pelo autor.

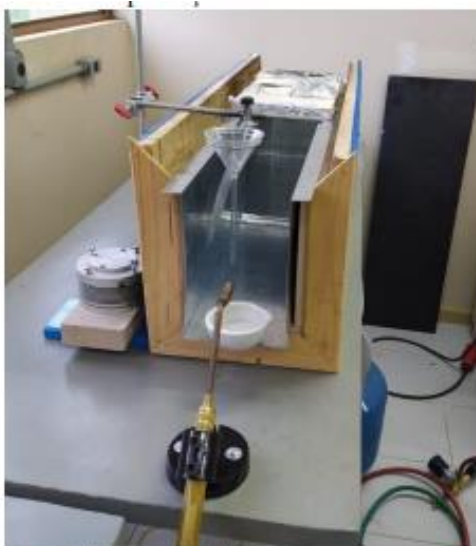


Fonte: SILVA (2020, p.63).

Após análise por micrografia óptica, ficou constatado que para os cacos retidos na faixa entre o fundo (menores que 75  $\mu\text{m}$ ) e a peneira de 300  $\mu\text{m}$ , obtinha-se um índice de elementos esféricos satisfatórios. Devido a problemas com o aparato experimental, as microesferas ficavam escuras, dificultando a sua aplicação na sinalização viária horizontal. Neste estudo não foi feita análise de retrorrefletividade.

Machado (2022) produziu microesferas do tipo IB, utilizando vidros de garrafas comerciais (com coloração incolor, azul, verde e marrom), e comparou a retrorrefletividade de cada uma delas com microesferas que são comercializadas atualmente, a fim de conhecer o efeito que a coloração do vidro interfere na retrorrefletividade. Neste trabalho também foi utilizado o método da chama horizontal, entretanto, o aparato foi melhorado, visto que o antigo possuía algumas desvantagens, como o escurecimento das microesferas. O aparato utilizado por Machado (2022) é demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Aparato baseado no método da chama horizontal utilizado pelo autor.

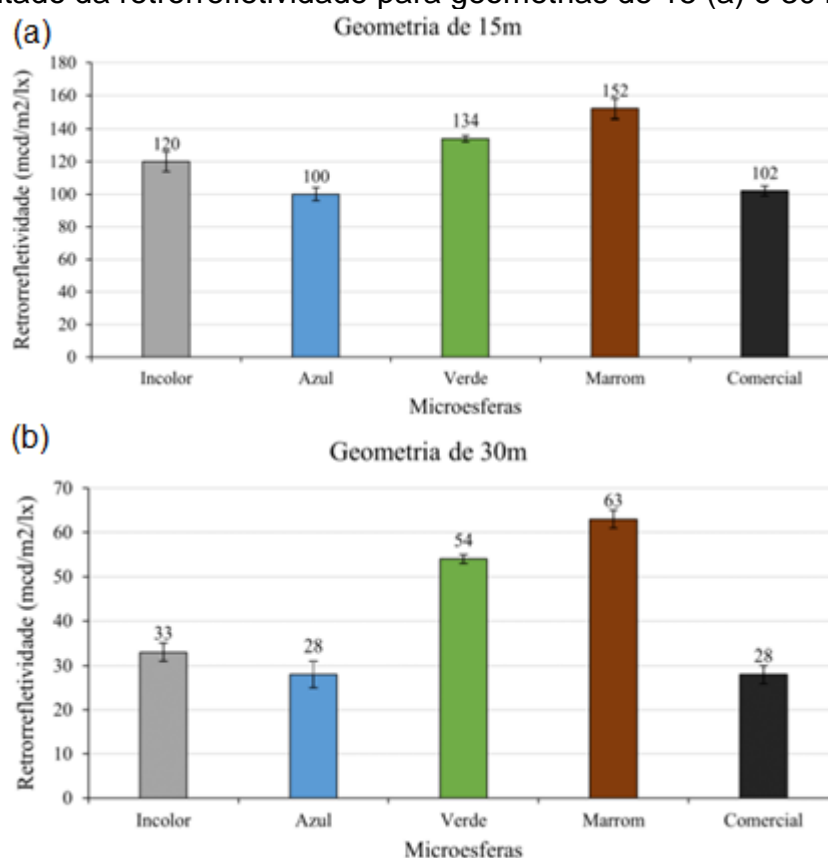


Fonte: MACHADO (2022, p.42).

Machado (2022), primeiramente as garrafas foram trituradas de forma manual com o pistilo e almofariz, os fragmentos resultantes de cada cor passaram por um conjunto de peneiras de aberturas de 150  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  e fundo (menores que 75  $\mu\text{m}$ ). Posteriormente, regulava-se as pressões do equipamento onde o gás combustível (GLP) era regulado em 1  $\text{kgf/cm}^2$  e o gás comburente ( $\text{O}_2$ ) regulado em 2  $\text{kgf/cm}^2$ . Os cacos, retidos na peneira de 75  $\mu\text{m}$ , eram lançados na chama por meio de um funil, e depositavam-se ao longo do aparato. Recolhia-se as partículas que passavam da marcação contida no dispositivo (cerca de 50 cm), e as lançava novamente à chama para acrescer o número de microesferas. O procedimento foi o mesmo para todas as cores estudadas. Com a ajuda de um microscópio óptico e o programa para visualização IsCapture, foram analisados os formatos, aparência e diâmetros das microesferas produzidas no laboratório e foi feita uma comparação com as de mesmo tipo comercialmente disponíveis no mercado.

Machado (2022), avaliou a retrorrefletividade com o refletômetro da Easylux, que apresenta dupla geometria. As microesferas foram distribuídas com proporção de 100g/m<sup>2</sup>. Para a geometria de 15 m (Figura 19-a), a retrorrefletividade das microesferas marrons apresentou o melhor resultado. Para a geometria de 30 m (Figura 19-b), as retrorrefletividades diminuíram, porém manteve-se os comportamentos das microesferas na geometria de 15m (MACHADO, 2022). Na Figura 19 estão os resultados para a retrorrefletividade obtidos neste trabalho. As medidas foram realizadas em fundo preto para coletar somente o efeito das microesferas.

Figura 19 - Resultado da retrorrefletividade para geometrias de 15 (a) e 30 m (b).



Fonte: Adaptado MACHADO (2022).

### 2.3 Retrorrefletividade

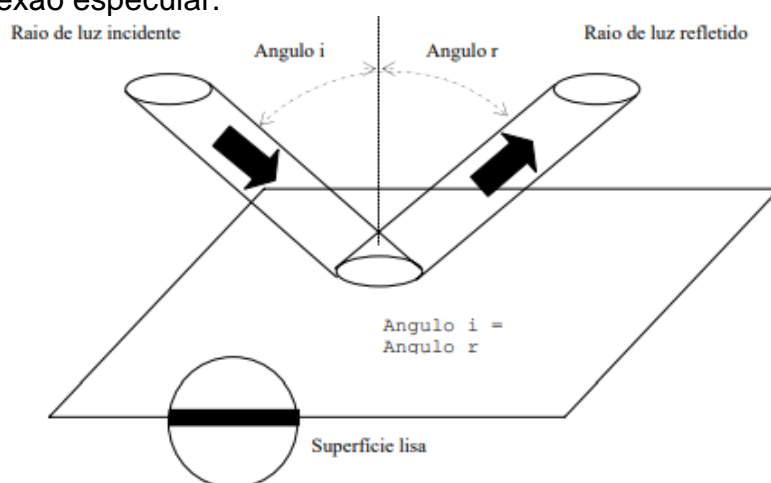
A Retrorrefletividade é um termo utilizado na sinalização horizontal que define a quantidade de luz, provinda dos faróis do veículo, que retorna aos condutores após ser refletidas pelas demarcações do pavimento. É considerado um fator de suma

importância para a segurança viária, pois transmite informações sobre a rodovia, principalmente no período noturno (MACHADO, 2019).

Schwab (1999) explica que a reflexão é um fenômeno natural da luz, em que um corpo usufrui a luz gerada por outra fonte. De acordo com o autor existem três tipos de reflexão:

- Reflexão especular: acontece quando a luz incide em uma superfície lisa e esta reflete na direção oposta, com mesmo ângulo de incidência. É ilustrado na Figura 20 este fenômeno.

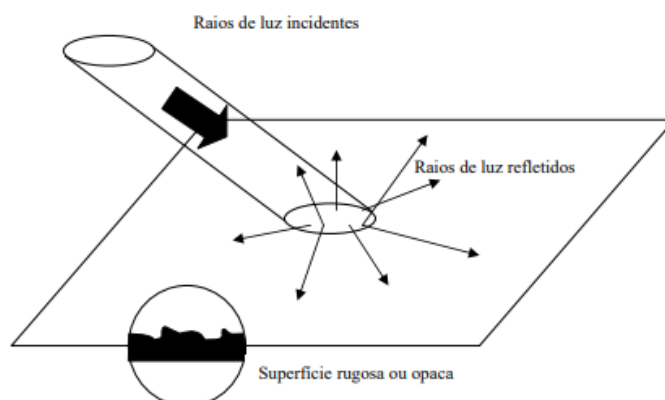
Figura 20 - Reflexão especular.



Fonte: SCHWAB (1999, p.48).

- Reflexão difusa: acontece quando a luz incide em uma superfície e é dispersada em qualquer direção. Esta reflexão é observada em superfícies rugosas ou opacas. A reflexão difusa é representada pela Figura 21.

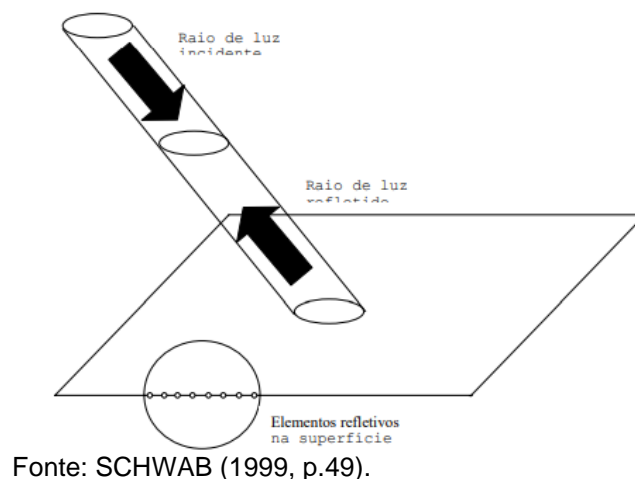
Figura 21 - Reflexão difusa.



Fonte: SCHWAB (1999, p.47).

- **Retroreflexão:** acontece quando a luz incide em uma superfície, e esta é direcionada para a fonte emissora. Fenômeno ilustrado pela Figura 22.

Figura 22 - Retroreflexão.



Para garantir que a demarcação viária tenha retrorefletividade, as microesferas são aplicadas sobre a superfície onde está a pintura. De acordo com Schwab (1999), a luz retrorefletida pelas microesferas depende de alguns fatores. A autora explica que é importante as microesferas possuírem esfericidade, pois atuam como lentes côncavas e concentram a luz num único ponto focal, demonstrado na Figura 23. Outro ponto citado é a forma de aplicação das microesferas, que devem ficar bem ancoradas nos materiais de demarcação. Quanto mais próximas de 60% do diâmetro forem ancoradas, maior será a retrorefletividade, e também ficarão aderidas a pintura por mais tempo, conforme a Figura 24.

Figura 23 - Retrorefletividade da microesfera de vidro.

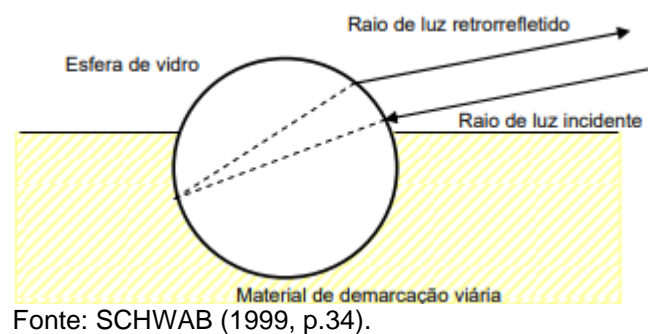
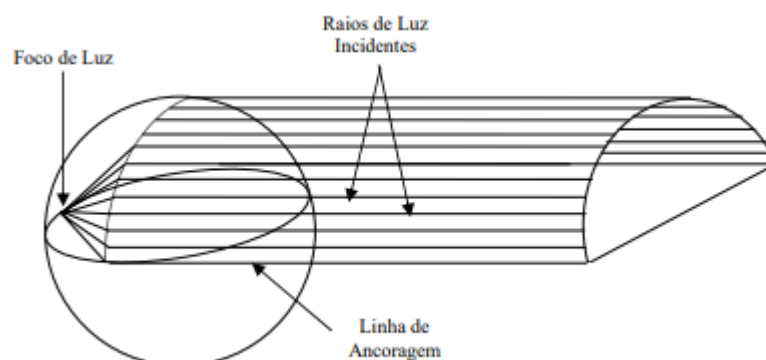


Figura 24 – Ancoragem e ponto focal das microesferas de vidro.



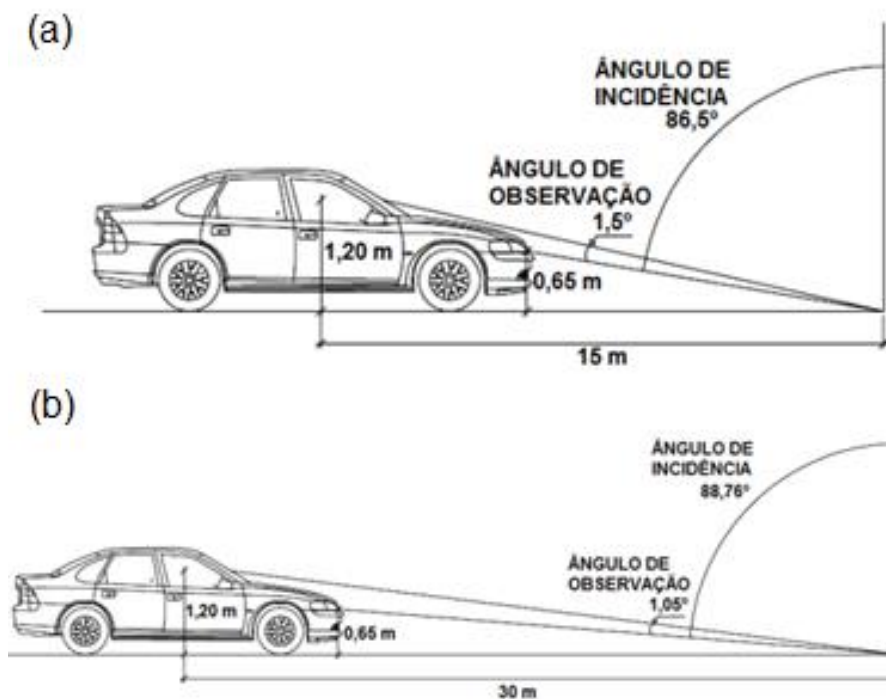
Fonte: SCHWAB (1999, p.39).

Um parâmetro importante nas medidas de retrorrefletividade é a quantidade de microesferas aplicadas sobre a pintura e expostas aos raios de luz; pouca quantidade pode ser insuficiente para permitir uma retrorreflexão satisfatória e grandes quantidades podem causar o efeito da reflexão difusa. (SCHWAB, 1999). A retrorrefletividade se altera em períodos de chuva já que a água forma uma película sobre o pavimento, recobrando as microesferas e causando a perda do efeito retro. Microesferas com diâmetros maiores podem ser utilizadas nessas condições, minimizando este problema. (BRANCO, 1999)

A avaliação da retrorrefletividade é feita por meio de equipamentos chamados de retrorrefletômetros. O equipamento emite uma luz sobre a pintura do pavimento em determinado ângulo de incidência, e posteriormente capta o quanto de luz voltou. O retrorrefletômetro realiza os testes em duas geometrias, 15 e 30 m, correspondendo a distâncias em que o condutor estaria do ponto analisado. Esta diferenciação ocorre com a mudança dos ângulos de incidência das luzes do equipamento (MACHADO 2019; HENZ, 2018).

É visualizado na Figura 25-a a geometria de 15 m, e na Figura 25-b a geometria de 30m, que são representadas por veículos distantes 15 e 30 metros, respectivamente do ponto de análise. É ilustrado também, os ângulos de incidência e observação para ambas geometrias.

Figura 25 - Detalhes da geometria de 15 e 30 m do equipamento Retrorefletômetro.



Fonte: Adaptado HENZ (2018).

O DNIT (2015), por meio do guia prático do programa BR-LEGAL, define que os procedimentos para análise da retrorefletância residual sejam feitos de acordo com a ABNT NBR 14723. Esta norma define a retrorefletividade inicial como sendo o valor da retrorefletividade da demarcação medido até 15 dias após a aplicação na via e, retrorefletividade residual como sendo o valor medido da retrorefletividade após a retrorefletividade inicial.

A retrorefletividade inicial mínima estabelecida para o programa é de 250 mcd/lx.m<sup>2</sup> para a cor branca e de 150 mcd/lx.m<sup>2</sup> para a cor amarela considerando a sinalização definitiva, já a sinalização de curta duração (provisória), a retrorefletividade inicial mínima estabelecida é de 150 mcd/m<sup>2</sup>/lx para a cor branca e de 100 mcd/m<sup>2</sup>/lx para a cor amarela. E para a retrorefletividade residual, sob qualquer condição de rodovia, a retrorefletividade mínima é 100 mcd/m<sup>2</sup>/lx para a cor branca e de 80 mcd/m<sup>2</sup>/lx para a cor amarela (DNIT, 2015).

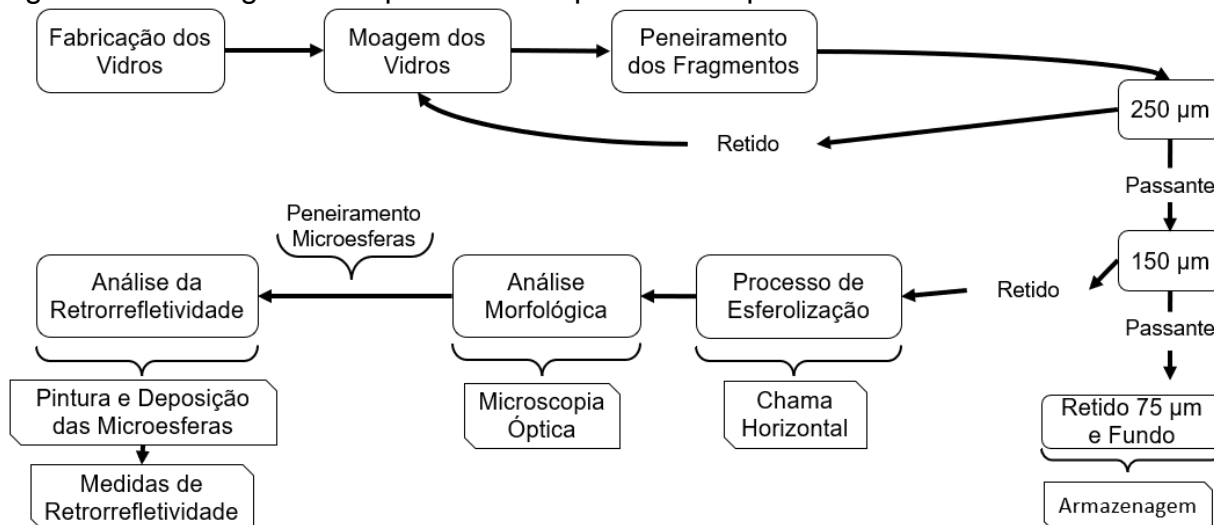
O DAER (2013) determina que os índices mínimos para a retrorefletividade inicial (até 48h após a aplicação) seja de 170 e 220 mcd/m<sup>2</sup>/lx para as cores amarela e branca, respectivamente. Para a sinalização residual (após as 48h iniciais), o valor mínimo é de 130 mcd/m<sup>2</sup>/lx para as cores amarela e branca.



### 3 METODOLOGIA

O procedimento experimental adotado neste trabalho foi realizado em etapas conforme pode ser observado na Figura 26, onde visualiza-se um fluxograma esquemático que ilustra a metodologia adotada. A sequência dos processos pode ser visualizada através do sentido das setas.

Figura 26 - Fluxograma esquemático do processo experimental.



Fonte: Elaboração Própria.

#### 3.1 Vidro

A fim de produzir microesferas retrorrefletoras do tipo IB (NBR 16184:2021), usadas principalmente misturadas à tinta na demarcação da sinalização horizontal viária, utilizou-se os vidros produzidos pelo Grupo GOMNDI, no laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos da Universidade Federal do Pampa, ambos localizados na cidade de Alegrete.

Para a fabricação dos vidros foram utilizadas as seguintes matérias-primas: carbonato de sódio, carbonato de cálcio, trióxido de boro ( $B_2O_3$ ), utilizado para diminuir a temperatura de fusão, e dióxido de silício ( $SiO_2$ ) (areia e cinza da casca de arroz). Neste trabalho, utilizou-se vidros com duas fontes distintas de dióxido de silício, uma provinda da areia e outra da cinza de casca de arroz (CCA).

Primeiramente, foi aferida em balança analítica as massas dos componentes constituintes citados anteriormente. Após a pesagem, adicionou-se os materiais em um cadinho de platina, o qual suporta altas temperaturas. O cadinho foi introduzido

em um forno Muffa, inicialmente desligado, o qual foi aquecido com passos de  $10^{\circ}$  /min até uma temperatura de  $1000^{\circ}\text{C}$ . O material permaneceu nesta temperatura por 1h para decomposição dos carbonatos de sódio e cálcio. Em seguida, a temperatura foi elevada para  $1200^{\circ}\text{C}$  e deixou-se a amostra nesta temperatura por 2h. Com a fusão completa dos componentes, o líquido foi vertido em uma chapa metálica, com ajuda de uma pinça. O vidro formado foi levado de volta a um outro forno que estava a uma temperatura de  $450^{\circ}\text{C}$ , ficando por 1h nesta temperatura, e depois desligou-se o forno de forma que o vidro produzido se resfriou até a temperatura ambiente. Este processo foi necessário para evitar tensões internas e deixar o vidro mais estável mecanicamente.

### 3.2 Moagem dos vidros

Para a produção das microesferas, primeiramente os vidros produzidos foram moídos manualmente com o auxílio do almofariz e pistilo. Para facilitar o procedimento, com o uso do pistilo, foi aplicado golpes nos vidros para parti-los em porções menores. A partir disso, executou-se movimentos circulares com o intuito de fragmentá-los nos diâmetros necessários. Na Figura 27, são visualizados o pistilo e o almofariz, além dos vidros inteiros e já moídos em fragmentos menores.

Figura 27 – Vidros que foram moídos (a); Fragmentos irregulares após moagem manual (b).



Fonte: Elaboração Própria.

A verificação dos diâmetros se deu por meio das peneiras de análise granulométrica. De acordo com a NBR 16184:2021, as microesferas IB possuem

diâmetros, em sua maioria, entre 63 e 212  $\mu\text{m}$ . Logo formou-se o conjunto com as peneiras de 250  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  e fundo, mostradas na figura 28.

Figura 28 – Conjunto de peneiras utilizadas.



Fonte: Elaboração Própria.

As peneiras, devidamente limpas, foram encaixadas em ordem crescente a partir do fundo, formando o conjunto de peneiramento. O vidro, uma vez moído, foi colocado na peneira superior; promoveu-se então o agitação do conjunto durante alguns minutos, alternando entre movimentos laterais e circulares. Após, retirou-se o material retido em cada uma das peneiras.

Os fragmentos retidos na peneira de 250  $\mu\text{m}$  voltavam para o almofariz para serem fragmentados até passarem por essa peneira, conforme a aplicação desejada (microesferas do Tipo IB).

Na Figura 29 é mostrado o armazenamento dos fragmentos utilizados para a produção das microesferas.

Figura 29 - Armazenamento de fragmentos irregulares após o peneiramento.



Fonte: Elaboração Própria.

### 3.3 Produção de microesferas

Com a obtenção dos fragmentos, realizou-se a fabricação de microesferas no equipamento baseado no método da chama horizontal. O equipamento é composto por uma caixa em formato “U” aberta nas extremidades, de compensado plastificado. Dentro do aparato, nas laterais, possuem tijolos refratários que são revestidos por uma chapa de aço galvanizado em formato “U”. Na parte posterior, com o intuito de delimitar o espaço para deposição de microesferas, é colocado uma chapa retangular transversalmente, que pode ser retirada para recolhimento do material. A coleta é feita em um recipiente retangular de aço galvanizado acoplado na parte inferior do equipamento. Na parte superior é colocada uma chapa de aço galvanizado no sentido longitudinal, utilizada para evitar perdas de microesferas. É possível visualizar na Figura 30-a o equipamento baseado no método da chama horizontal utilizado, e nas Figuras 30-b e 30-c as chapas de aço colocada na parte superior e posterior, respectivamente, do aparato para evitar perdas de material. Na Figura 31 é apresentado o recipiente utilizado para a coleta das microesferas.

Figura 30 – Equipamento utilizado(a); Chapas de aço para evitar perdas de microesferas (b e c).



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 31 - Recipiente retangular para coleta das microesferas produzidas.

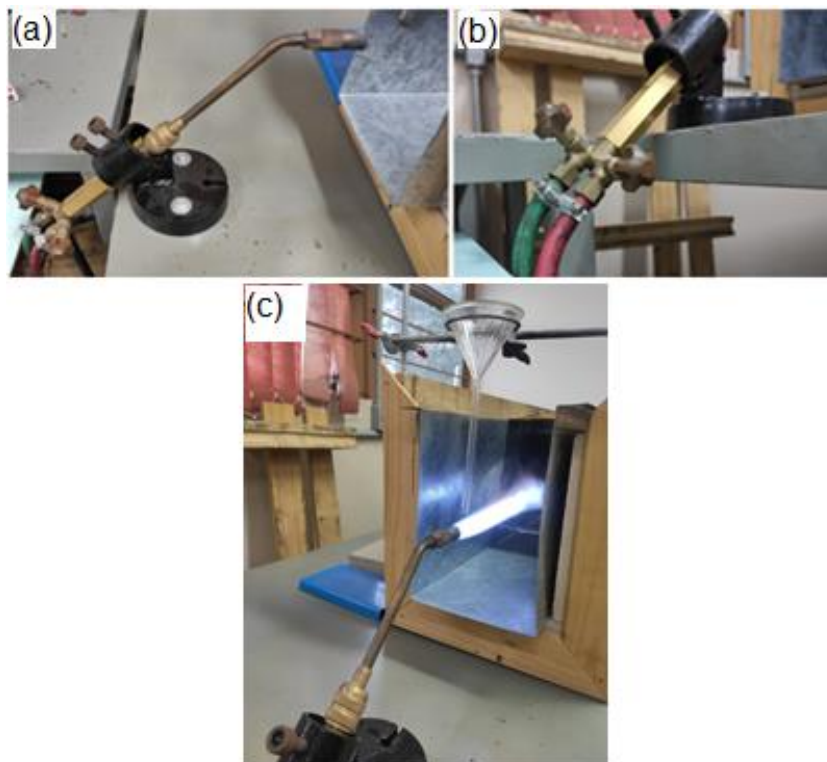


Fonte: Elaboração Própria.

Na parte frontal do equipamento fica um maçarico controlado por dois registros, o qual está fixado na mesa (Figura 32-a). O maçarico é ligado, através de duas mangueiras, ao cilindro de gás GLP (mangueira vermelha) e do gás oxigênio (mangueira verde) (Figura 32-b). Na frente do maçarico, é colocado um suporte para o funil que fica posicionado de forma transversal, acima da chama produzida (Figura

32-c); é neste funil que o pó de vidro é colocado para formar as microesferas. O processo é demonstrado na Figura 32.

Figura 32 - Maçarico (a); Registros do maçarico (b); Funil (c).



Fonte: Elaboração Própria.

A produção iniciou-se com a verificação da limpeza do dispositivo; se necessário utilizou-se um pincel para limpar o aparato. Em seguida colocou-se um marcador a 50 cm da parte frontal, para separação de fragmentos esféricos e não esféricos. Este marcador foi colocado uma vez que foi verificado que as partículas que se depositam antes desta marca possuem alta porcentagem de elementos não esféricos. Já as partículas que superam esta marca, possuem elevado índice de esfericidade. Também foram colocadas as chapas de delimitação na parte superior e posterior, além da caixa de coleta das microesferas. Abaixo do funil, onde se coloca o pó de vidro, foi posto um almofariz para recolher o vidro moído que cai diretamente para baixo. No processo de produção das microesferas, utilizou-se as pressões do gás GLP em 1 kgf/cm<sup>2</sup> e o gás oxigênio em 2 kgf/cm<sup>2</sup>, verificadas nos manômetros instalados nos tubos, através de registros que os recipientes possuem. Os cilindros de gás Oxigênio e gás GLP, estão apresentados na Figura 33.

Figura 33 - Gás Oxigênio (a); Gás GLP (b).



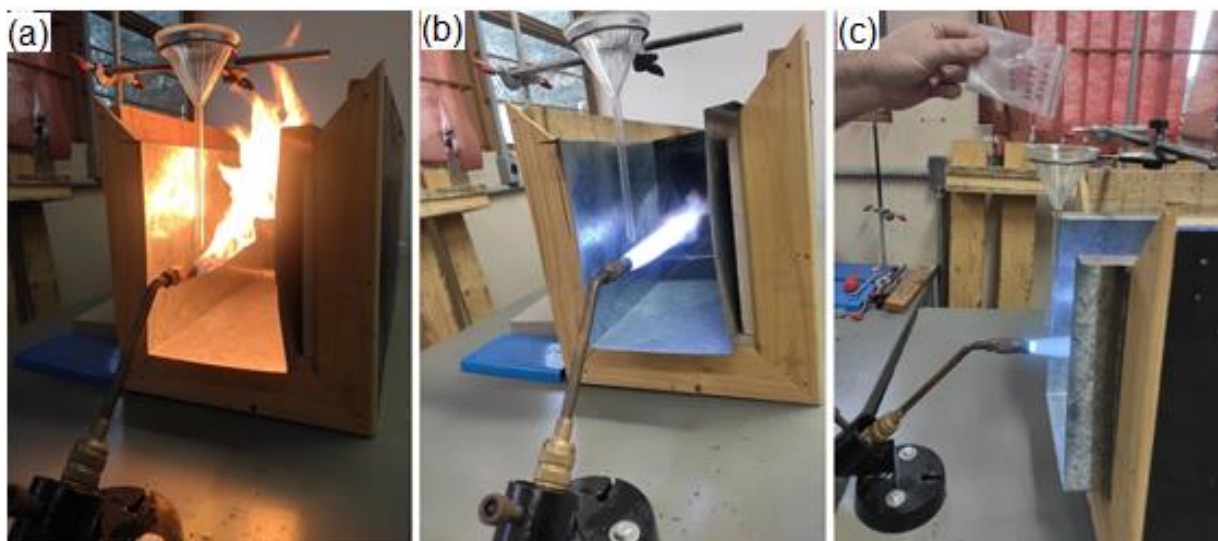
Fonte: Elaboração Própria.

Posteriormente, abriu-se o registro do gás GLP no maçarico e acendeu-se a chama (Figura 34-a). Com cuidado liberou-se o gás oxigênio e o ajustou até formar uma chama num tom azulado (Figura 34-b e 34-c).

Uma vez configurado o equipamento, as partículas resultantes do peneiramento foram lançadas sobre a chama de forma contínua em pequenas quantidades, com o apoio do funil (Figura 34-c). Devido a temperatura e pressão da chama, os fragmentos são lançados para frente e depositaram-se ao longo do dispositivo. Concluída esta etapa, fechou-se o registro do gás oxigênio e depois do gás GLP no maçarico. Retirou-se as chapas superior e posterior e coletou-se, com o auxílio do pincel, o material que se posicionou após a marca de 50 cm, que é composto majoritariamente por partículas esféricas (Figura 35). O material que não alcançou a marcação foi recolhido e reservado, este material pode ser colocado novamente na chama se necessário. Finalizada a produção, fechou-se os registros dos tubos, e liberou-se o gás contido nas mangueiras.

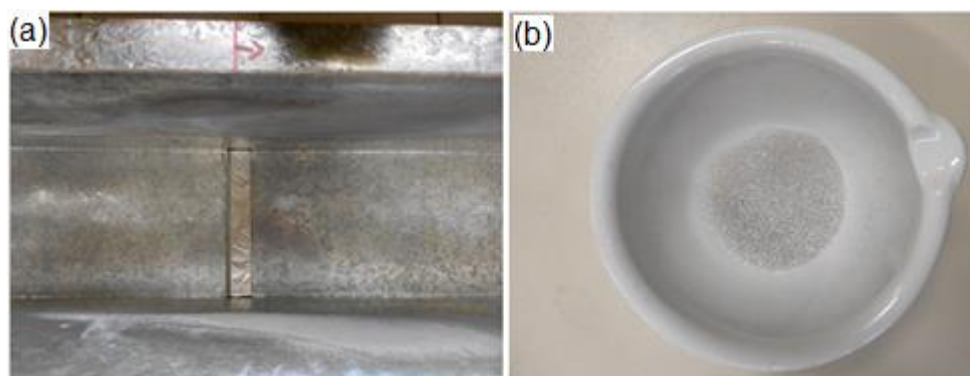
O procedimento de acendimento da chama e lançamento das partículas vítreas irregulares estão ilustrados na Figura 34. Em sequência na Figura 35, é demonstrada a deposição das partículas após a esferolização pelo método da chama horizontal.

Figura 34 - Chama com o gás GLP acendido (a) Liberação do gás Oxigênio (b); Lançamento dos fragmentos irregulares (c).



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 35 - Marca de 50 cm para recolhimento das microsferas (a) Microesferas produzidas (b).



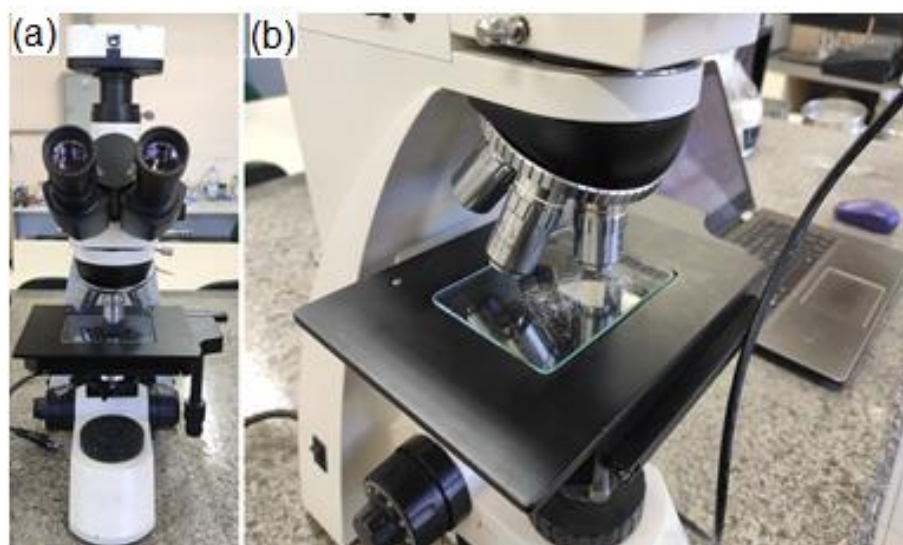
Fonte: Elaboração Própria.

### 3.4 Avaliação morfológica das Microesferas

A avaliação da morfologia dos fragmentos que passaram pelo processo de esferolização pelo método da chama horizontal foi feita através da contagem de 1000 partículas por amostragem produzida, utilizando um microscópio óptico trinocular, marca Laborana (Figura 36) modelo MTM-3030, localizado no grupo GOMNDI. Este dispositivo propiciou a visualização das imagens em um programa virtual (IsCapture) através da utilização de uma câmera CCD. Na Figura 36 é possível visualizar o microscópio óptico.



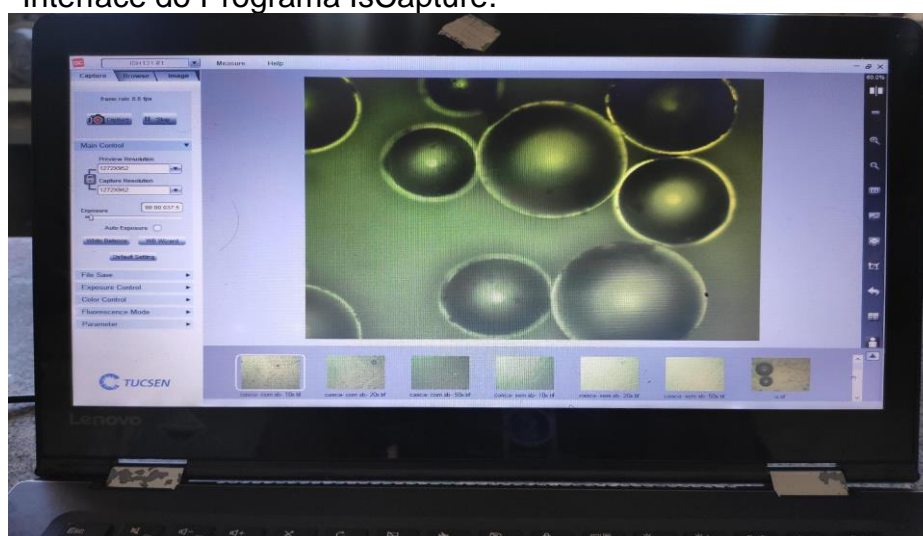
Figura 36 - Microscópio Óptico (a); Distribuição das microesferas na lâmina do microscópio (b).



Fonte: Elaboração Própria.

Para a avaliação do formato e do diâmetro das partículas foi utilizado o microscópio óptico (MO), onde distribuiu-se as microesferas uniformemente sobre uma lâmina de vidro do MO. A análise das imagens foi realizada no modo transmissão e utilizou-se as lentes objetivas de aumento 5X e 10X. Para a coleta das imagens, conectou-se a câmera do microscópio ao notebook com um cabo USB, inicializando o programa IsCapture, que permitiu a visualização e coleta de dados em tempo real. A interface do programa IsCapture é visualizada na Figura 37.

Figura 37 - Interface do Programa IsCapture.



Fonte: Elaboração Própria.

Para a calibração da medição de imagens no MO de cada lente objetiva, usou-se o coeficiente de conversão mostrado na Tabela 2. Este coeficiente é multiplicado pela quantidade de pixels e o resultado é dado em micrômetros. Uma vez calibrado, as medidas de comprimento foram realizadas utilizando a ferramenta “linha” do programa ISCapture.

Tabela 2 - Coeficiente de multiplicação para cada aumento da lente objetiva do microscópio.

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

Fonte: PEREZ e MENEZES (2016).

Realizado esta etapa, foi possível quantificar o formato e diâmetro de 1000 partículas que estavam sobre a lâmina do microscópio, realizando a captura de imagens e utilizando as ferramentas de medição do IsCapture. Com o auxílio do programa Excel, anotou-se os diâmetros das microesferas totalmente esféricas bem como a quantidade de microesferas ovoides, fundidas ou fragmentos de vidro. Assim foi determinada a porcentagem de microesferas em relação a partículas defeituosas bem como o diâmetro médio das microesferas.

### **3.5 Avaliação da Retrorrefletividade das Microesferas**

A retrorrefletividade das microesferas de vidro foi avaliada por meio do Equipamento da Easylux Horizontal Clássico, na Universidade Federal de Santa Maria, disponibilizado pelo Prof. Dr. Deividi Pereira. O equipamento permite medir a retrorreflexão noturna e a visibilidade diurna, em duas geometrias (15 e 30 m) simultaneamente. O aparelho cumpre todas as exigências internacionais de marcação viária, de acordo com a fabricante. Na Figura 38 é visualizado o equipamento utilizado para tomada de medidas de Retrorrefletividade.

Figura 38 - Retrorrefletômetro Horizontal Clássico.



Fonte: EasyLux (2015).

Para realizar as medidas, foi construído uma superfície composta de uma placa de fibras de média densidade (MDF) nas dimensões de 60 cm X 15,3 cm, revestida com uma placa de fórmica pintada de preto para evitar que o material influencie nas medidas de retrorefletividade das microesferas (Figura 39). Na região de medida do dispositivo em MDF, dimensionada de acordo com a região de medida do equipamento, foi feito um recorte, onde encaixou-se uma peça de etileno acetato de vinila (EVA) amarelo, que foi pintada com tinta de demarcação viária, possuindo mesma dimensão da abertura (34 cm X 10 cm).

Na Figura 39 é possível visualizar a superfície de medida e o EVA amarelo que foi pintado com tinta branca.

Figura 39 - Superfície para medidas de retrorefletividade.

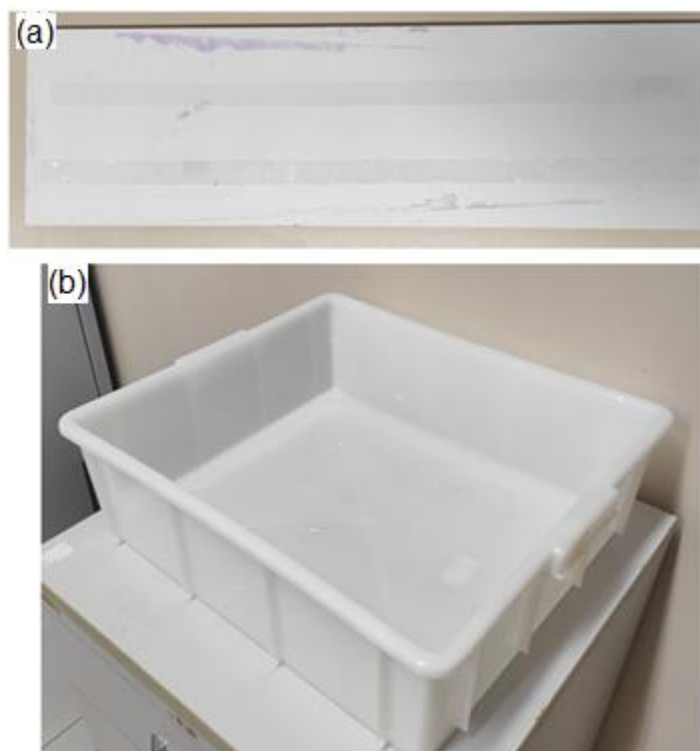


Fonte: Elaboração Própria.

A pintura foi realizada com a tinta para demarcação viária à base de resina acrílica da marca ICD Vias na cor Viaflex branca. Primeiramente a tinta foi misturada, deixando-a homogeneizada e, com auxílio de um rolo de pintura de espuma de

poliéster de 9 cm, aplicou-se a tinta sobre o EVA, que estava fixo em uma placa de MDF (Figura 40-a) por uma fita dupla face. A tinta formou uma camada uniforme com espessura próxima de 6 mm, conforme prevê a norma. As microesferas foram depositadas de forma manual, deixando-as cair, por gravidade, sobre a pintura. Para evitar perdas de microesferas durante a deposição, a superfície pintada foi colocada dentro de uma caixa de plástico. Com isso, as microesferas não depositadas na tinta foram recolhidas e depositadas novamente, até a completa finalização (Figura 40-b). Esta etapa foi necessária para garantir a densidade desejada das microesferas sobre a tinta.

Figura 40 - Placa de MDF para suporte da superfície a ser pintada (a); Caixa plástica retangular (b).



Fonte: Elaboração Própria.

O estudo da retrorrefletividade foi feito em microesferas de diferentes diâmetros e diferentes densidades, considerando sempre as microesferas do tipo IB. Os diferentes diâmetros foram selecionados a partir das diferentes peneiras (retidas em 150  $\mu\text{m}$ , retidas em 75  $\mu\text{m}$  e menores que 75  $\mu\text{m}$ ) enquanto que as diferentes densidades foram avaliadas a partir da massa das microesferas e a área de medida do retrorrefletômetro. No caso, foram avaliadas as seguintes densidades, 50  $\text{g}/\text{m}^2$  (equivalente a 1,7 g) e 100  $\text{g}/\text{m}^2$  (equivalente a 3,4 g). Para as medidas de

retroreflexão, foram realizadas 10 medidas, tomando o valor médio dessas 10 medidas.

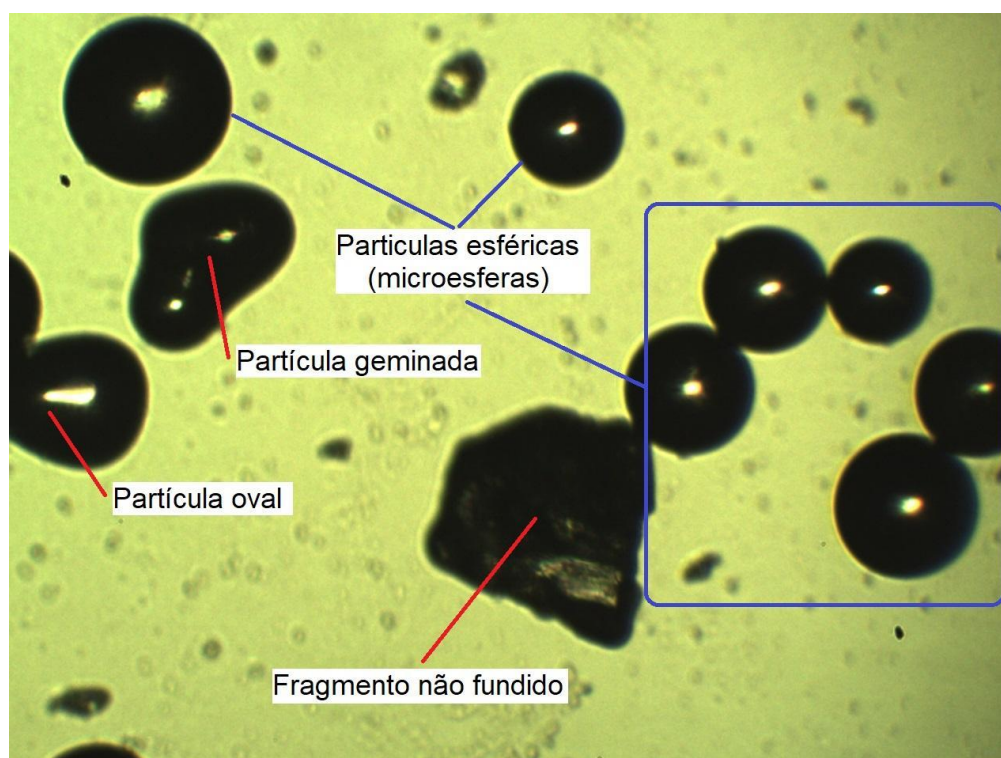
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são mostrados os resultados obtidos neste trabalho. Os resultados estão apresentados em duas seções, primeiramente, os resultados referentes a morfologia das microesferas produzidas e após, os resultados da retrorrefletividade destas microesferas.

### 4.1 Avaliação morfológica das microesferas

Como descrito na seção 3.4 do capítulo 3, foi analisado o formato das partículas (esféricas, ovoides e fragmentos de vidro) após o processo de esferolização. Na Figura 41, é observado os diferentes formatos que são encontrados ao analisar as partículas.

Figura 41 - Partículas encontradas no processo de microscopia óptica.



Fonte: Elaboração Própria.

A partir da contagem das partículas, analisou-se o rendimento das microesferas, ou seja, a porcentagem de partículas totalmente esféricas presentes nas amostras produzidas. Conjuntamente, verificou-se os percentuais de defeitos presentes nestas amostras. Na Tabela 3 é mostrada a quantidade de elementos

contados e o percentual das diferentes morfologias encontradas e os valores limites da NBR 16184:2021.

Tabela 3 - Resultados percentuais para cada classificação das partículas contidas nas amostras analisadas.

Microesferas	Esféricas		Geminadas		Cacos		Total	
	n°	%	n°	%	n°	%	n°	%
<b>CCA</b>	7045	86,05	1020	12,46	122	1,49	8187	100,00
<b>Areia</b>	1686	83,88	268	13,33	56	2,79	2010	100,00
<b>NBR 16184:2021</b>	-	77,00	-	20,00	-	3,00	-	100,00

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados mostram que as microesferas produzidas atendem todos os limites especificados pela NBR 16184:2021 para aparência e defeitos, destacando-se às microesferas do vidro da cinza da casca de arroz, que possuem os melhores resultados, tanto do ponto de vista de maior percentual de partículas esféricas quanto menores percentuais de partículas geminadas e cacos.

A contagem das microesferas também permite a avaliação dos aspectos referentes à granulometria das partículas geradas. Na tabela 4 são visualizados os diâmetros mínimos, máximos, valores médios e desvios padrões dos diferentes tipos de microesferas após o processo de contagem.

Tabela 4 - Diâmetro mínimo, máximo, valor médio e desvio padrão das microesferas.

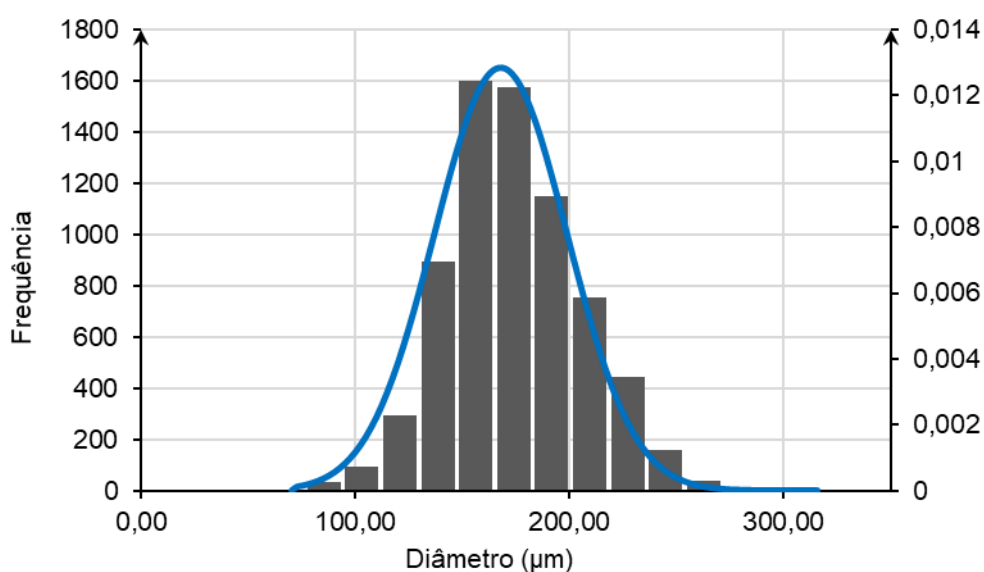
Microesferas	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )			
	Mínimo	Máximo	Médio	Desvio Padrão
<b>CCA</b>	67,80	315,90	165,46	31,01
<b>Areia</b>	81,50	263,70	165,92	28,47

Fonte: Elaboração Própria.

Ao analisar os dados da Tabela 4, verifica-se que os diâmetros médios das microesferas fabricadas no laboratório (CCA e Areia) são semelhantes e com desvios padrões próximos. O método de produção adotado é satisfatório, visto que, gerou amostras de microesferas padronizadas, levando em consideração a utilização de fragmentos vítreos na mesma faixa granulométrica. O diâmetro médio mostra que as microesferas produzidas são caracterizadas como sendo do TIPO IB.

A contagem dos diâmetros nos permite realizar os histogramas e a curva de distribuição normal para os tipos de microesferas, com CCA e com areia na composição. Na Figura 42 é apresentado o histograma de barras e a curva de distribuição normal para as microesferas produzidas com o vidro da cinza da casca de arroz.

Figura 42 - Histograma (cinza escuro) e curva de distribuição normal (azul) para as microesferas produzidas com o vidro da CCA.



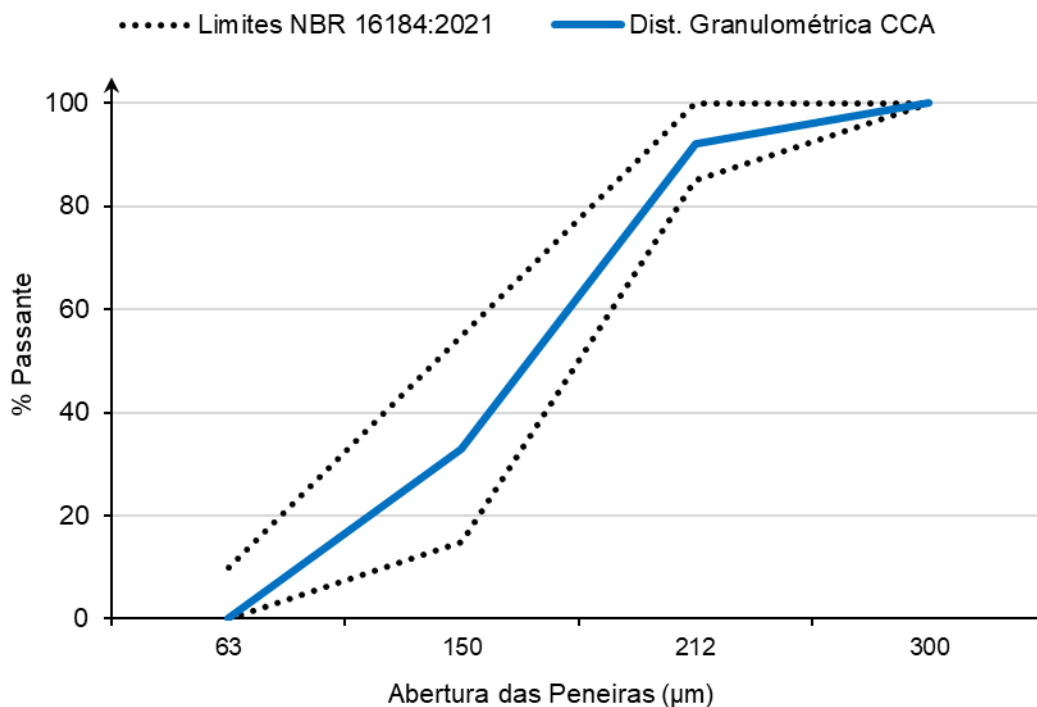
Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 42, percebe-se que as microesferas estão contidas no intervalo de 67,8 µm e 315,9 µm. Entre 63 µm e 150 µm, o percentual de microesferas é cerca de 32,8%, e para o intervalo de 150 µm e 212 µm cerca de 59,2%. Logo, a porcentagem passante da peneira de abertura 212 µm é de 92,1%, caracterizando como uma granulometria uniforme conforme limites determinados pela NBR 16184:2021.

Para melhor visualização, na Figura 43 é possível visualizar a granulometria das microesferas tendo CCA na composição. As linhas pontilhadas em preto delimitam os limites inferior e superior de granulometria, estipulados pela NBR 16184:2021. Como pode ser observado, as microesferas produzidas estão de acordo com a norma.



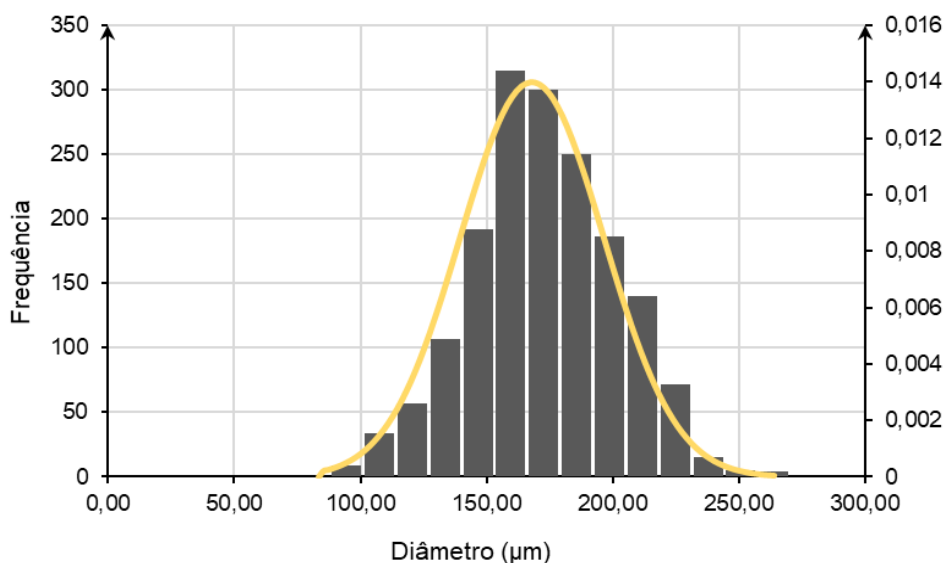
Figura 43 - Granulometria das microesferas produzidas com o vidro de CCA.



Fonte: Elaboração Própria.

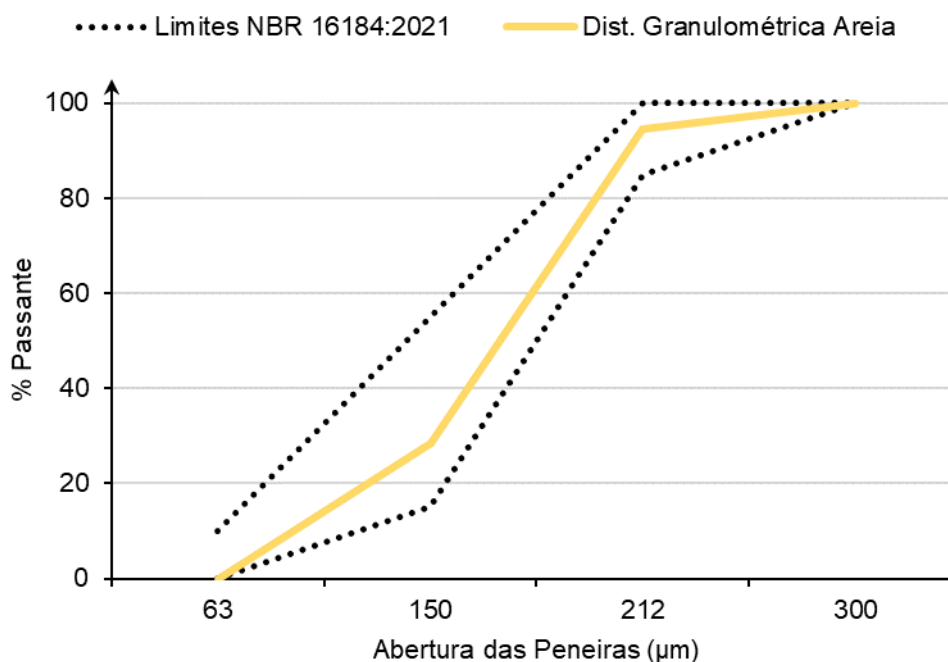
Nas Figuras 44 e 45, são apresentados o histograma de barras (e a curva de distribuição normal) bem como a granulometria para as microesferas produzidas com o vidro tendo areia na composição.

Figura 44 - Histograma e curva de distribuição normal para as microesferas produzidas com o vidro de areia.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 45 - Granulometria das microesferas produzidas com o vidro de areia.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 45, visualiza-se que as microesferas estão contidas no intervalo de 81,5 µm e 263,7 µm. Entre 63 µm e 150 µm, o percentual de microesferas é cerca de 28,5%, e para o intervalo de 150 µm e 212 µm cerca de 66,1%. Logo, a porcentagem passante da peneira de abertura 212 µm é de 94,5%, também caracterizando como uma granulometria uniforme conforme limites determinados pela NBR 16184:2021. Na Figura 50, é observado que a distribuição granulométrica dessas microesferas também está de acordo com os limites inferiores e superiores apresentados na Tabela 1, sendo caracterizadas como sendo microesferas do tipo IB.

#### 4.2 Avaliação da retrorrefletividade das microesferas

A avaliação da retrorrefletividade seguiu os procedimentos descritos na seção 3.5 do capítulo 3. Foram consideradas as sete amostras descritas na tabela 5, a fim de analisar o efeito entre os tipos de vidro (areia, CCA ou sem microesferas (SEM ME)), densidades distintas e faixas granulométricas diferentes nas medidas de retrorrefletividade. Na Tabela 5, é possível visualizar as amostras confeccionadas com as especificações distintas entre elas.

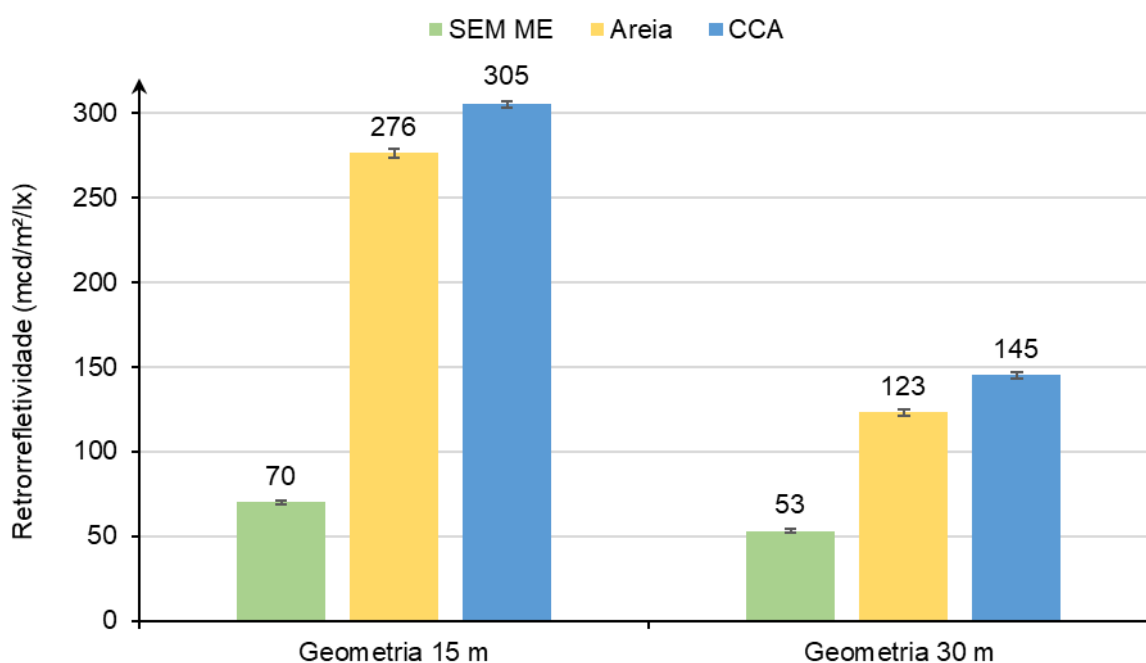
Tabela 5 - Amostras realizadas para análise.

Código	Amostra	Massa de Microesfera (g)	Densidade (g/m <sup>2</sup> )	Peneira Retida (μm)
1	SEM ME	-	-	-
2	AREIA	3,4	100	150
3	AREIA	1,7	50	150
4	AREIA	1,7	50	75
5	CCA	3,4	100	150
6	CCA	1,7	50	150
7	CCA	1,7	50	75

Fonte: Elaboração Própria.

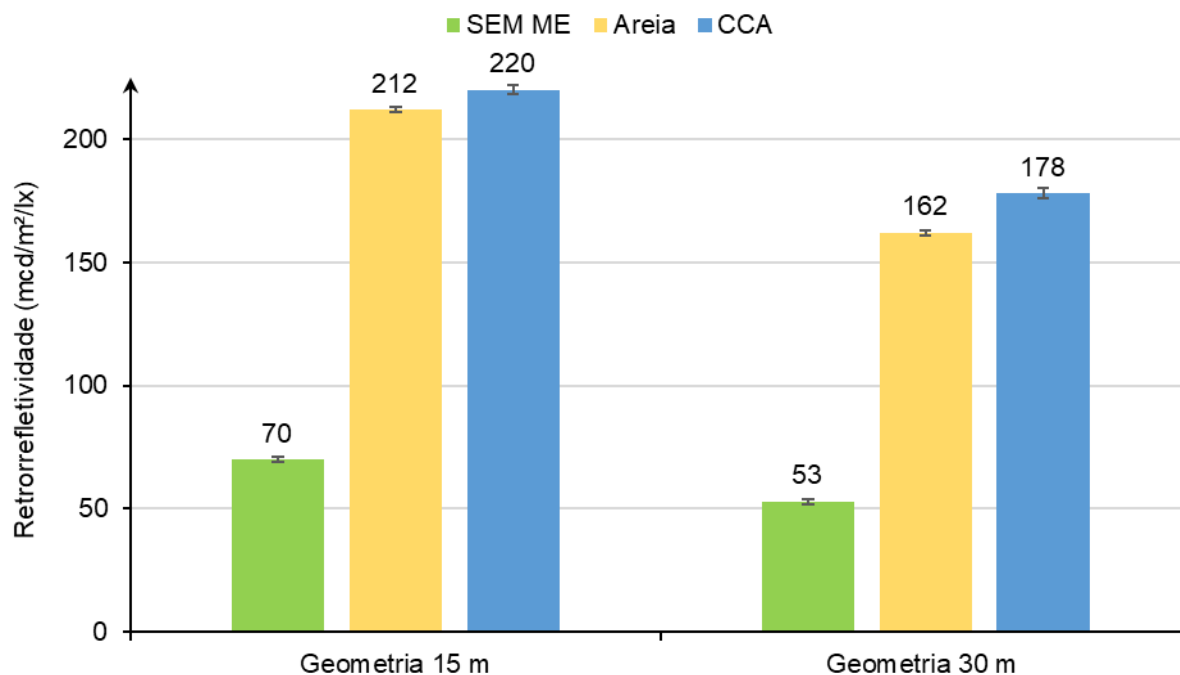
Nas Figuras 46, 47 e 48 são observados os comparativos entre as microesferas com areia na composição do vidro, cinza da casca de arroz na composição do vidro e amostra de referência, para as geometrias de 15 e 30 m. Na figura 46, a comparação é feita entre as amostras 1, 2 e 5 da tabela 5. Na figura 47, a comparação é feita entre as amostras 1, 3 e 6 da tabela 5. Na figura 48, a comparação é feita entre as amostras 1, 4 e 7 da tabela 5. Como pode ser observado, a presença das microesferas faz muita diferença nas medidas de retrorrefletividade.

Figura 46 - Comparativo entre as amostras 1, 2 e 5 para as geometrias de 15 e 30 m.



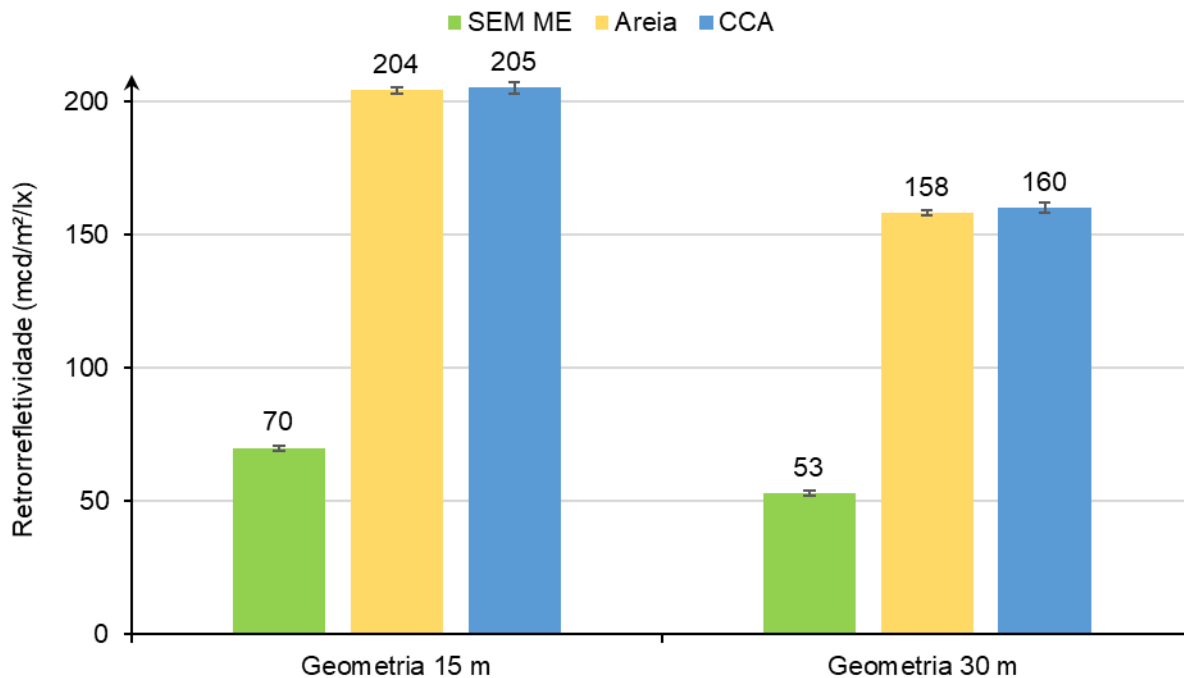
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 47 – Comparativo entre as amostras 1, 3 e 6 para as geometrias de 15 e 30 m.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 48 – Comparativo entre as amostras 1, 4 e 7 para as geometrias de 15 e 30 m.



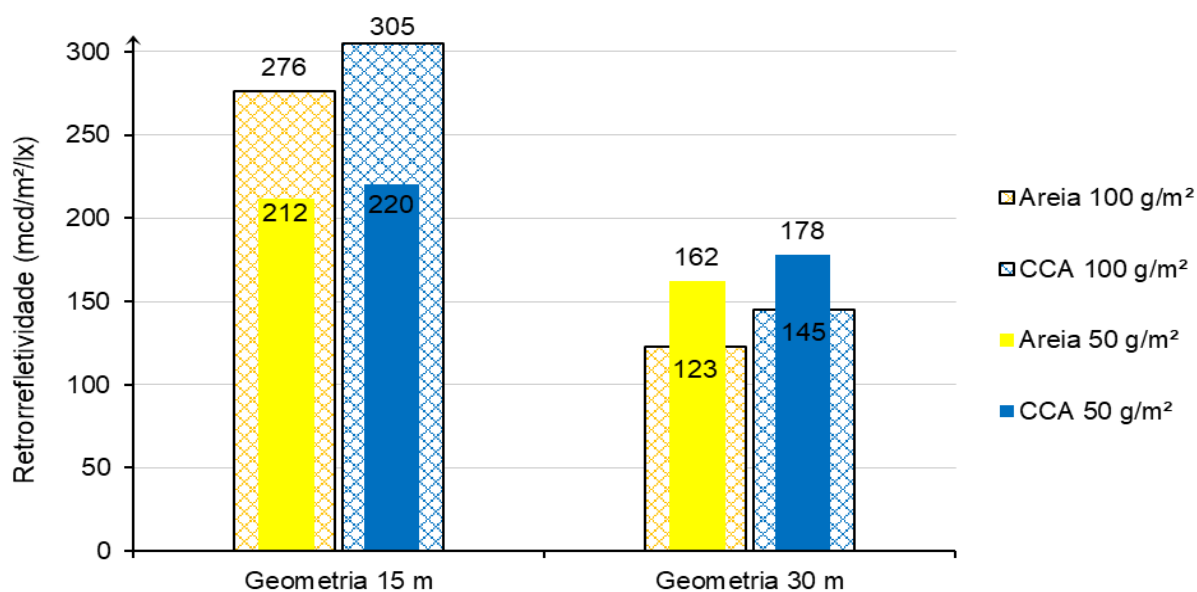
Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se também que as medidas de retrorrefletividade são sempre maiores para a geometria de 15 m, quando comparada com a geometria de 30 m, em acordo com os resultados mostrados por outros autores (DE SALLES, 2015; DE SALLES, 2016).

Para a geometria de 15 m, por exemplo, as amostras com microesferas têm uma retrorrefletividade aproximadamente quatro vezes maior do que a amostra sem microesferas. Isto se observa também, com um fator menor, para a geometria de 30 m. Por outro lado, comparando as amostras com microesferas, observa-se uma ligeira vantagem de retrorrefletividade para as amostras com microesferas fabricadas a partir da cinza da casca de arroz. Esse aumento pode estar relacionado com o maior percentual de esferas, menos elementos geminados e menos cacos dos vidros fabricados com a CCA quando comparados com os fabricados com areia. Esta comparação foi mostrada na Tabela 3.

Na Figura 49 é mostrado uma comparação entre as amostras de códigos 2 e 5 (tabela 5), com as amostras de código 3 e 6. A mudança está na densidade. Para as amostras 2 e 5 tem-se uma densidade de 100 g/m<sup>2</sup> enquanto que para as amostras 3 e 6 tem-se uma densidade de 50 g/m<sup>2</sup>. As microesferas utilizadas foram as retidas na peneira de 150 µm e as medidas foram feitas para as geometrias de 15 e 30 m. Observa-se que o aumento da densidade favoreceu as medidas para a geometria de 15 m, porém, este aumento causa uma diminuição das medidas de retrorrefletividade para a geometria de 30 m.

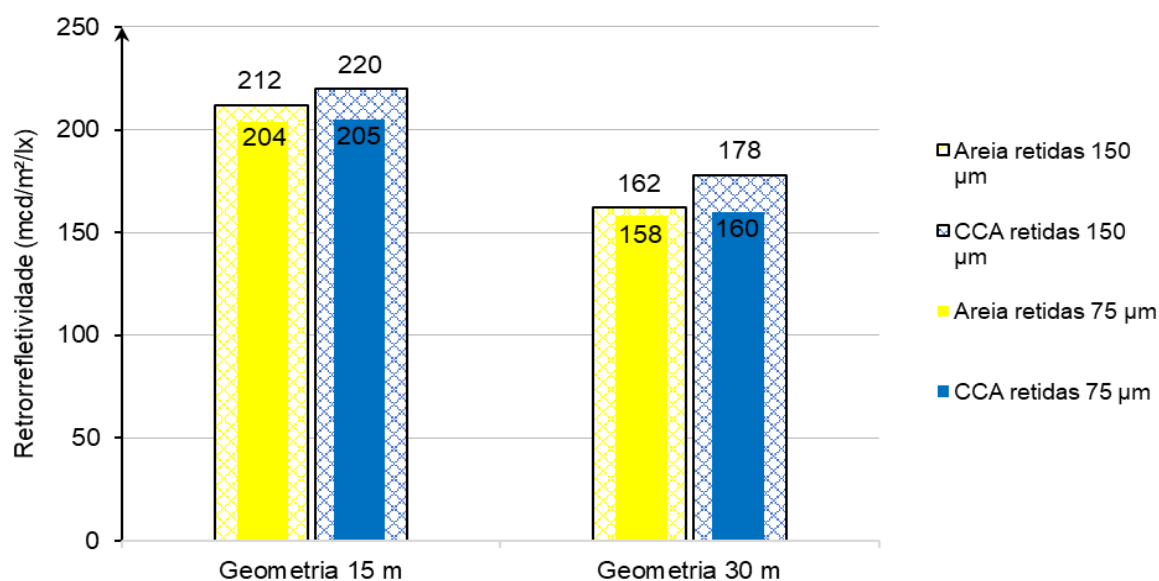
Figura 49 - Comparativo entre as amostras 2 e 5 com as amostras 3 e 6, para as geometrias de 15 e 30 m.



Fonte: Elaboração Própria.

Na Figura 50 é mostrado uma comparação entre as amostras de códigos 3 e 6 (que possuem microesferas de areia e CCA respectivamente, com densidade de 50 g/m<sup>2</sup> retidas na peneira de 150 µm), com as amostras 4 e 7 (que possuem microesferas de areia e CCA respectivamente, com densidade de 50 g/m<sup>2</sup> retidas na peneira de 75 µm). Também, as medidas foram feitas para as geometrias de 15 e 30 m. Para este caso as medidas para ambas as composições (areia e CCA) se mostraram equivalentes para ambas as geometrias, 15 e 30 m.

Figura 50 – Comparativo entre as amostras 3 e 6 com as amostras 4 e 7, para as geometrias de 15 e 30 m.



Fonte: Elaboração Própria.

Para facilitar a comparação entre as medidas, na Tabela 6 são observadas as medidas de retrorrefletividade de todas as amostras fabricadas, para as geometrias de 15 e 30 m.

Tabela 6 - Resultado das medidas de retrorrefletividade para cada amostra.

Código	Retrorrefletividade Geometria 15 m (mcd/m²/lx)	Desvio Padrão	Retrorrefletividade Geometria 30 m (mcd/m²/lx)	Desvio Padrão
1	70	1	53	1
2	276	3	123	2
3	212	1	162	1
4	204	1	158	1
5	305	2	145	2
6	220	2	178	2
7	205	2	160	2

Fonte: Elaboração Própria.

As normas brasileiras determinam que os resultados mínimos devem ser aferidos com a geometria de 15 m. Tendo em vista os valores mínimos de retrorrefletividade residual, levando em consideração ambos os departamentos (DAER e DNIT), citados no capítulo 2, item 2.3, os valores de retrorrefletividade devem ser superiores a 130 mcd/m²/lux. Sendo assim, todas as amostras com microsferas satisfazem o limite mínimo. Além disso, de acordo com as comparações

realizadas neste trabalho e considerando as normas para a geometria de 15m, as microesferas de densidade 100 g/m<sup>2</sup> retidas nas peneiras de 150 µm são as mais adequadas para serem utilizadas na sinalização viária. Mais do que isso, os resultados mostram que microesferas produzidas a partir da cinza da casca de arroz podem ser utilizadas na sinalização viária horizontal uma vez que os resultados são superiores às microesferas de vidro tradicionais, fabricadas a partir de areia na composição. Isto sugere que microesferas fabricadas a partir de vidros feitos da cinza da casca de arroz podem substituir as microesferas produzidas de forma tradicional, abrindo mais uma possibilidade de utilização deste resíduo industrial, ajudando no fechamento do ciclo produtivo do arroz.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho permitem as seguintes conclusões:

- a) Microesferas sólidas foram produzidas com sucesso pelo método de chama horizontal, sendo classificadas como do Tipo IB;
- b) As microesferas foram produzidas tendo cinza da casca de arroz e areia na composição do vidro e foi realizada uma comparação em termos de rendimento e morfologia para ambas as amostras tendo a norma NBR 16184:2021 como referência. Os resultados mostraram que ambas as amostras obtiveram resultados semelhantes e estavam de acordo com a norma;
- c) Foram avaliados os níveis de retrorreflexão nas geometrias de 15 e 30 m das amostras produzidas com a utilização de tinta branca, considerando densidades e diâmetros diferentes e os resultados se mostraram semelhantes entre as amostras tendo CCA e areia na composição;
- d) Conforme as normas brasileiras, as microesferas produzidas tiveram resultados de retrorrefletividade adequados, tendo níveis superiores ao mínimo estabelecidos por estas normas;
- e) Ainda referente aos resultados de retrorrefletividade, para a geometria de 15m, as microesferas retidas na peneira de 150  $\mu\text{m}$  com densidade de 100  $\text{g}/\text{m}^2$  apresentaram desempenho numérico superior quando comparado com as outras, de diâmetros menores e densidades menores, mostrando ser a melhor condição entre as opções descritas neste trabalho.

Em suma, pensando em termos de sustentabilidade, os resultados mostram que microesferas produzidas a partir da cinza da casca de arroz podem ser utilizadas na sinalização viária horizontal, dando um fim adequado para este resíduo industrial, ajudando no fechamento do ciclo produtivo do arroz.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14723**: Sinalização horizontal viária — Medição de retrorrefletividade 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.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL BRASIL. **Anuário mineral brasileiro. na**, 2010.
- BARBOZA, Ana CR; DE PAOLI, Marco A. Polipropileno carregado com microesferas ocas de vidro (glass bubbles™): obtenção de espuma sintática. **Polímeros**, v. 12, p. 130-137, 2002.
- 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 Nucleares - 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.
- BRANCO, A. M. **Segurança Viária**. 1 ed. São Paulo/SP: Editora CL-A, 1999. 109 p.
- CÓDIGO DE TRÂNSITO BRASILEIRO – **CTB** – LEI Nº 9.503, DE 23 DE SETEMBRO 1997. Conselho Nacional De Trânsito. 2021.
- CONTRAN - CONTRAN CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Sinalização horizontal**: 1ª edição. Brasília/DF: Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, 2007. 128 p.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER/RS). Instrução de Serviço para Estudos e Projetos CREMA IS-112/13. Rio Grande do Sul, 2013.
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de resíduos Agro-industriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica**. *Cerâmica Industrial*, v. 10, n. 2, p. 22-25, 2005.
- 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 E TRANSPORTE. **Guia Prático: Programa Nacional de Segurança e Sinalização Rodoviária BR-LEGAL**: 1ª Edição. 2015. 82p.

DE SALLES, Lucio Salles *et al.* Avaliação retrorrefletiva de pintura de demarcação horizontal: peculiaridades e considerações sobre a norma e os requisitos mínimos nacionais. **TRANSPORTES**, v. 23, n. 3, p. 5-17, 2015.

DE SALLES, Lucio Salles *et al.* **Road Markings Retroreflectivity Experimental Assessment: Observations on Rainfall, Dirt, Retroreflectometer Geometry and Minimum Requirements**. 2016.

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.

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

GONÇALVES, Jaderson Luis dos Santos. **Fabricação de vidros utilizando sílica proveniente da cinza da casca do arroz**. Orientador: Jacson Weber de Menezes. 2019. 65p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, 2019, Alegrete.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Areia industrial**. 2008.

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.

MACHADO, José Vinicius Marks. **Geração de microesferas vítreas a partir de garrafas de vidro de diferentes cores e avaliação da retrorrefletividade**. 2022.

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

POTTERS, Industries LLC. **High Performance Solid Glass Polymer Additives**. 2013.

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.

SILVA, Laureano *et al.* **Utilização de microesferas ocas de vidro na aditivação de concreto**. Orientador: Antônio Hortêncio Munhoz Júnior. 2013. 109 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2013, São Paulo.

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.

SOUZA, Juliana Pereira de. **Estudo da sinterização de vidros aluminossilicatos por calorimetria exploratória diferencial**. Orientador: Eliana Navarro dos Santos Muccilo. 2015. 74 p. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências de Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2015, São Paulo.

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

UN, Transforming Our World: The 2030 **Agenda for Sustainable Development** (UN, New York, 2015). Disponível em: <<http://bit.ly/TransformAgendaSDG-pdf>>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

WATKINS, Ignacio Gana; PRADO, Miguel. **Mechanical properties of glass microspheres**. Procedia Materials Science, v. 8, p. 1057-1065, 2015.