

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ACSIEL BUDNY**

***RETROFIT DO REVESTIMENTO INTERNO DE LUMINÁRIAS: COM TINTA,  
MICROESFERAS E CACOS DE VIDRO***

**Alegrete**

**2025**

**ACSIEL BUDNY**

***RETROFIT DO REVESTIMENTO INTERNO DE LUMINÁRIAS: COM TINTA,  
MICROESFERAS E CACOS DE VIDRO***

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

Orientador: Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes

**Alegrete**

**2025**

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

B927r Budny, Acsiel

RETROFIT DO REVESTIMENTO INTERNO DE LUMINÁRIAS: COM TINTA,  
MICROESFERAS E CACOS DE VIDRO / Acsiel Budny.

86 p.

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

"Orientação: Jacson Weber de Menezes".

1. Retrofit. 2. Iluminação. 3. Resíduo de Vidro. 4.  
Microesferas de vidro. 5. Sustentabilidade. I. Título.

**ACSIEL BUDNY**

**RETROFIT DO REVESTIMENTO INTERNO DE LUMINÁRIAS: COM TINTA, MICROESFERAS  
E CACOS DE VIDRO**

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

Dissertação defendida e aprovada em: 15/09/2025.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes  
Orientador  
(Unipampa)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Natalia Braun Chagas  
(Unipampa)

---

Prof. Dr. Luis Enrique Gomez Armas  
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2025, às 15:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **NATALIA BRAUN CHAGAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2025, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS ENRIQUE GOMEZ ARMAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/09/2025, às 18:24, 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 **1837447** e o código CRC **C0C16551**.

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Leandro e Francisca, ao meu irmão  
Jaelson, e à minha companheira Thalita.

## AGRADECIMENTO

Primeiramente, à Deus por ter fornecido toda saúde e motivação, para que eu conseguisse superar todas as dificuldades e desafios.

À toda minha família. Em especial, aos meus pais Leandro e Francisca que, mesmo com todas as dificuldades, sempre motivaram para que seus filhos seguissem o caminho dos estudos.

Agradeço ao meu irmão, Jaelson, e sua esposa, Raquel, que cederam espaço para que eu pudesse me abrigar em Alegrete. Agradeço também aos meus sobrinhos, Gustavo e Henrique que, mesmo crianças, contagiaram com sua alegria.

Agradeço imensamente a minha companheira Thalita que, com seu carisma, paciência, carinho e apoio incondicional, esteve ao meu lado em cada etapa desta jornada. Sua presença foi fundamental para que esta jornada pudesse ser realizada com serenidade e confiança.

À UNIPAMPA, que abriu suas portas para que eu pudesse ingressar e cursar o mestrado.

Ao Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI), que cedeu sua estrutura para a realização desta pesquisa, seja por meio de materiais quanto por meio de instrumentação.

Ao Grupo de Exploração Integrada de Recursos Energéticos (EIRE), que cedeu parte da instrumentação necessária para a realização da pesquisa.

Agradecimento mais que especial ao professor Dr. Jacson Weber de Menezes. Não somente pela orientação. Mas também pela confiança, acolhimento, persistência, amizade e paciência que teve durante toda essa trajetória acadêmica. Muito obrigado por ter transmitido parte do seu vasto conhecimento.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos, minha gratidão.

## RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis no setor de iluminação tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias de maior eficiência energética, com destaque para os sistemas baseados em diodos emissores de luz (LEDs). Paralelamente, o *retrofit* surge como estratégia para modernização de luminárias antigas, reutilizando estruturas consideradas obsoletas e reduzindo a destinação inadequada desses materiais. Neste contexto, a presente pesquisa propôs a aplicação do retrofit por meio da substituição das fontes convencionais por LEDs, aliada à modificação da superfície interna dos refletores. Foram incorporados materiais como tinta acrílica branca, microesferas de vidro e cacos de vidro, com o objetivo de avaliar o impacto sobre quatro parâmetros principais: distribuição de iluminância, temperatura superficial do refletor, área iluminada e consumo energético. O estudo adotou uma abordagem experimental, com variação controlada da densidade superficial (25 g/m<sup>2</sup>, 50 g/m<sup>2</sup> e 100 g/m<sup>2</sup>) e do diâmetro das partículas (300 µm < d < 425 µm, 180 µm < d < 212 µm e 90 µm < d < 125 µm). Os resultados mostraram que a simples aplicação da tinta acrílica já proporcionou uma distribuição de iluminância mais simétrica. A adição dos materiais ópticos possibilitou um aumento de até 14,3% na área iluminada em relação à amostra de referência, com padrão de distribuição próximo ao de luminárias comerciais LED. Também foi observada uma redução da temperatura superficial do refletor nas amostras com menor densidade de material óptico, indicando melhor dissipação térmica. Em termos de consumo energético, obteve-se uma economia de 12,5% de energia por metro quadrado, quando comparado com a amostra de referência, demonstrando a viabilidade da proposta como alternativa de *retrofit* sustentável para reaproveitamento e modernização de sistemas considerados ultrapassados.

**Palavras- Chave:** *Retrofit*. Iluminação. Resíduo de Vidro. Microesferas de vidro. Sustentabilidade

## ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in the lighting sector has driven the development of technologies with higher energy efficiency, with particular emphasis on systems based on light-emitting diodes (LEDs). In parallel, retrofit emerges as a strategy for modernizing outdated luminaires, reusing structures considered obsolete and reducing the improper disposal of these materials. In this context, the present study proposed the application of retrofit through the replacement of conventional light sources with LEDs, combined with the modification of the internal surface of reflectors. Materials such as white acrylic paint, glass microspheres, and glass shards were incorporated to evaluate their impact on four main parameters: illuminance distribution, reflector surface temperature, illuminated area, and energy consumption. An experimental approach was adopted, with controlled variation of surface density (25 g/m<sup>2</sup>, 50 g/m<sup>2</sup>, and 100 g/m<sup>2</sup>) and particle diameter (300 μm < d < 425 μm, 180 μm < d < 212 μm, and 90 μm < d < 125 μm). The results showed that the simple application of acrylic paint already provided a more symmetrical illuminance distribution. The addition of optical materials enabled an increase of up to 14.3% in the illuminated area compared to the reference sample, with a distribution pattern close to that of commercial LED luminaires. A reduction in reflector surface temperature was also observed in samples with lower optical material density, indicating improved thermal dissipation. In terms of energy consumption, a 12.5% reduction in energy per square meter was achieved compared with the reference sample, demonstrating the feasibility of the proposal as a sustainable retrofit alternative for the reuse and modernization of systems considered outdated.

**Keywords:** *Retrofit*. Lighting. Glass waste. Glass microspheres. Sustainability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Conceitos luminotécnicos .....	21
Figura 2- Iluminância de uma fonte de luz .....	23
Figura 3- Temperatura de Cor Correlata, dada em kelvin.....	26
Figura 4- Diagrama de Kruithof .....	27
Figura 5- Agradabilidade de diferentes iluminâncias e diferentes TCCs .....	28
Figura 6- Diagrama de análise <i>retrofit</i> .....	31
Figura 7- Aumento da eficiência luminosa com conjunto óptico eficiente.....	32
Figura 8- Luminária fechada com difusor transparente .....	33
Figura 9- Luminária aberta de embutir .....	34
Figura 10- Esquemática da emissão luminosa de uma luminária.....	35
Figura 11- Reflexão da luz.....	36
Figura 12- Mecanismo óptico em materiais retrorrefletivos.....	37
Figura 13- Cadeia do vidro: da produção ao reuso .....	39
Figura 14- Organograma do processo experimental .....	41
Figura 15- Projetor utilizado .....	42
Figura 16- Distribuição espectral da fonte luminosa.....	42
Figura 17- Tinta acrílica usada para revestimento da luminária .....	43
Figura 18- Peneiras utilizadas e faixas granulométricas .....	44
Figura 19- Microscópio óptico utilizado para analisar a morfologia das microesferas e cacos de vidro .....	45
Figura 20- Cenários avaliados.....	47
Figura 21- Disposição dos materiais na placa.....	48
Figura 22- Luxímetro .....	49
Figura 23- Esquema mostrando o posicionamento da fonte e os pontos em que foram feitos a coleta de dados .....	50
Figura 24- Sala utilizada para coleta de dados .....	50
Figura 25- Refletor MX50W.....	52
Figura 26- Câmera termográfica utilizada .....	53
Figura 27- Morfologia das microesferas e cacos de vidro .....	54
Figura 28- Distribuição da iluminância- REF. A distância entre os círculos concêntricos é de 20 cm.....	56
Figura 29- Distribuição da iluminância- REVB.....	57

Figura 30- Distribuição da iluminância considerando a inserção de 25 g/m <sup>2</sup> de cacos e microesferas de vidro, com faixas granulométricas respectivamente de: (a) e (b) 90 µm e 125 µm, (c) e (d) 180 e 212 µm e (e) e (f) 300 e 425 µm. ....	59
Figura 31- Distribuição da iluminância considerando a inserção de 50 g/m <sup>2</sup> de cacos e microesferas de vidro, com faixas granulométricas respectivamente de: (a) e (b) 90 µm e 125 µm, (c) e (d) 180 e 212 µm e (e) e (f) 300 e 425 µm. ....	61
Figura 32- Distribuição da iluminância considerando a inserção de 100 g/m <sup>2</sup> de cacos e microesferas de vidro, com faixas granulométricas respectivamente de: (a) e (b) 90 µm e 125 µm, (c) e (d) 180 e 212 µm e (e) e (f) 300 e 425 µm. ....	63
Figura 33- Área de iluminação média obtida para a amostra REF .....	66
Figura 34- Área de iluminação .....	67
Figura 35- Gráfico dos resíduos contra o tipo de material.....	70
Figura 36- Temperatura externa dos casos analisados .....	72
Figura 37- Distribuição de Iluminância e área de iluminação - MX50W .....	74
Figura 38-Distribuição de iluminância e área iluminada- 25REVBMV425-300.....	75
Figura 39- Comparação da figura de mérito entre diferentes condições e pesos de otimização .....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fluxos luminosos para diferentes tipos de lâmpadas .....	22
Tabela 2- Coeficientes de reflexão de algumas cores e materiais.....	25
Tabela 3- Placas analisadas.....	46
Tabela 4- Iluminância para a amostra REF considerando pontos fixos.....	55
Tabela 5- Iluminância para a amostra REVB considerando pontos fixos .....	57
Tabela 6- Área de iluminação com corte fixado em 100 lux .....	66
Tabela 7- Aplicação da ANOVA para o experimento.....	69
Tabela 8- Valor médio da temperatura da superfície da luminária para as superfícies sob presença de microesferas e cacos de vidro. ....	71
Tabela 9- Consumo energético por metro quadrado iluminado .....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

lm- lúmen

W- Watt

g- grama

m<sup>2</sup>- metro quadrado

µm- micrômetro

cd- candela

L- Luminância

E- Iluminância

g/m<sup>2</sup>- gramas por metro quadrado

lx- lux

K- Kelvin

°C - Graus Celsius

Hz – Hertz

Gl- graus de liberdade

SQ- Soma quadrática

QM- Média Quadrática

MV- Microesferas de vidro

CV- Cacos de vidro

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

CIE – *Commission Internationale de l'Éclairage*

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

EIRE – Grupo de Exploração Integrada de Recursos Energéticos

GOMNDI – Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos

IES- *Illuminating Engineering Society*

ISO - *International Organization for Standardization*

LED- *Light Emitter Diode*

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

TCC - Temperatura de Cor Correlata

VSAP- Vapor de Sódio de Alta Pressão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Conceitos Luminotécnicos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Fluxo Luminoso .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Intensidade Luminosa .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Iluminância .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Luminância.....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Temperatura de Cor .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Eficiência Energética.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3</b>	<b>Retrofit.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Sistemas de Iluminação .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Luminárias para ambientes comerciais, industriais e residenciais .....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Luminárias para iluminação pública .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5</b>	<b>Tipos de reflexão em superfícies .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Reflexão especular e difusa.....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Retrorreflexão .....</b>	<b>37</b>
<b>2.6</b>	<b>Resíduos de Vidro .....</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Etapa 1- Definição da luminária e fonte luminosa .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Etapa 2- Definição dos materiais.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Base de Revestimento.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Microesferas de Vidro e Cacos de Vidro .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3</b>	<b>Etapa 3- Confeção das Placas .....</b>	<b>45</b>

<b>3.4</b>	<b>Etapa 4- Coleta dos dados .....</b>	<b>48</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Iluminância e sua distribuição espacial.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Consumo energético .....</b>	<b>52</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Temperatura superficial do refletor.....</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Morfologia das microesferas e cacos de vidro .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2</b>	<b>Distribuição de Iluminância .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Área de Iluminação.....</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>Temperatura média da superfície da luminária.....</b>	<b>70</b>
<b>4.5</b>	<b>Consumo Energético.....</b>	<b>72</b>
<b>4.6</b>	<b>Comparativo entre o melhor caso e um sistema atual de iluminação .....</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescente processo de globalização, surge a necessidade em desenvolver tecnologias que proporcionem uma melhoria na qualidade cotidiana da sociedade. Ressalta-se que estas tecnologias devem estar ligadas a sustentabilidade, assunto que tomou ênfase nos últimos anos, visto que devem estar atrelados aos aspectos sociais, ambientais e econômicos (Da Silva, Budny e Pedrozo, 2022).

Com essa proposta, surge a necessidade de desenvolver técnicas cada vez mais limpas e eficientes que diminuam o consumo de matérias não-renováveis. Na década passada, por exemplo, a iluminação artificial foi responsável por cerca de 17% - 20% do uso de eletricidade (Zissis, 2016), podendo acarretar um acréscimo de 1,8 a 3,5 vezes a demanda de iluminação, até o ano de 2050 (Bergeses *et al.*, 2015).

Diante deste quadro, surgem propostas relacionadas à eficiência energética, cujas quais consistem no uso racional e inteligente da energia, mitigando desperdícios e otimizando o desempenho. Portanto, o conceito é atrelado a adoção de tecnologias mais modernas e eficientes, além de práticas operacionais que são capazes de reduzir o consumo de energia, sem comprometer o conforto e funcionalidade do local (Haddad, 2002).

Quando se cita a necessidade de desenvolvimento de técnicas voltadas à sustentabilidade e eficiência, é válido ressaltar as técnicas já desenvolvidas. No âmbito da iluminação artificial, é possível descrever o comparativo entre fontes de iluminação. Primordialmente, um dos sistemas de iluminação era composto pelas lâmpadas incandescentes, que apresentavam uma vida útil consideravelmente baixa (em torno de 1000 horas) e uma baixa eficiência (em torno de 10 a 20 lm/W), uma vez que convertiam apenas 5 % da eletricidade consumida em radiação visível, sendo que o restante era eliminado em forma de calor (Ferrari, 2012). Após, com o aprimoramento de técnicas construtivas, houve o desenvolvimento de novas fontes artificiais de iluminação: as lâmpadas de descarga, que funcionavam por meio da passagem de corrente elétrica através de um gás ou vapor, com ou sem a existência de filamento. Embora apresentem um rendimento melhor que as lâmpadas incandescentes, as lâmpadas de descarga fazem uso de componentes que podem tornar sua utilização um pouco comprometida, seja por meio da composição de mercúrio (no caso de lâmpadas fluorescentes), seja por meio da necessidade de aparelhagem auxiliar (reatores) (PUC Goiás, 2008).

Ainda, no âmbito das inovações, ressalta-se a utilização (cada vez em maior escala) das fontes LED. Apresentando elevada durabilidade e elevada eficiência luminosa, o LED é produzido com materiais atóxicos ao meio ambiente, o que desencadeia em uma destinação final mais acessível, se comparada às demais fontes que possuem mercúrio, por exemplo (Santos, *et al.*, 2015). Embora sejam uma das fontes mais promissoras, a sua durabilidade está relacionada à agentes externos, principalmente quanto à temperatura; avaliando o fluxo luminoso, Baumgartner *et al.* (2015) analisaram cinco tipos de lâmpadas LED que foram envelhecidas por 35 meses à temperatura ambiente e por 6 meses às temperaturas de 45°C e 60°C. Como resultado, constataram que um aquecimento de 45°C e 60°C durante seis meses pode reduzir a vida útil da lâmpada em um fator de 1,35 e 2,36 respectivamente. Exemplificando: se a vida útil de uma lâmpada - operando em temperatura ambiente - fosse de 50.000 horas, quando operada em temperatura de 45°C, esta teria uma vida útil de aproximadamente 37.000 horas; já quando ela estivesse em operação à uma temperatura de 60°C, esta apresentaria uma vida útil de aproximadamente 21.200 horas.

Ainda sob o aspecto de inovações, uma temática que tomou proporções nos últimos anos refere-se à modernização de sistemas já instalados, com tecnologias atuais. Para essa técnica, dá-se a nomenclatura de *retrofit*. Em sistemas de iluminação, essa tecnologia é utilizada para reduzir o uso de energia, mantendo ou até mesmo melhorando a qualidade de iluminação; o que se faz normalmente é substituir as lâmpadas existentes por outras mais eficientes (Cheng *et al.* 2021).

Nesta temática, estão sendo desenvolvidos estudos voltados à alteração da superfície interna de refletores, visando um menor consumo energético, paralelo à temática *retrofit*. Um estudo realizado por Cheng (2021), visou analisar o impacto de diferentes superfícies internas revestidas com elementos nano ópticos na distribuição da luz e iluminância dos ambientes. Os resultados indicam que superfícies refletivas e otimizadas geometricamente podem aumentar significativamente a eficiência da iluminação, reduzindo o consumo energético sem comprometer a qualidade luminosa.

Possuindo propriedades ópticas interessantes, as microesferas surgem como uma opção de material eficaz do ponto de vista óptico. Um estudo apresentado por Sandin, Nordin e Jonsson (2017) abordou o uso de microesferas termoplásticas ocas de ultrabaixa densidade como enchimento em revestimentos elásticos. Como

resposta, o estudo concluiu que as microesferas ocas auxiliam a refletir a radiação solar, o que acaba interferindo em uma redução da temperatura interna de ambientes.

No presente estudo, foi avaliada a modificação da superfície interna dos refletores, elemento fundamental na condução e distribuição da luz. Neste contexto, foram avaliados experimentalmente os efeitos da incorporação de materiais como tinta branca, microesferas de vidro sólidas e cacos de vidro na superfície interna de refletores. Para isso, foram analisados os impactos dessas alterações sobre quatro parâmetros principais: distribuição de iluminância, temperatura superficial do refletor, área iluminada e consumo energético. As variáveis experimentais incluem a incorporação da tinta, a variação da densidade superficial dos materiais (cacos e microesferas) ( $25 \text{ g/m}^2$ ,  $50 \text{ g/m}^2$  e  $100 \text{ g/m}^2$ ) e de seus respectivos diâmetros ( $300 \mu\text{m} < d < 425 \mu\text{m}$ ,  $180 \mu\text{m} < d < 212 \mu\text{m}$  e  $90 \mu\text{m} < d < 125 \mu\text{m}$ ). Com esta abordagem, buscou-se identificar qual material apresenta maior desempenho luminotécnico e térmico, contribuindo com soluções sustentáveis e eficientes para o setor de iluminação.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho da iluminação gerada por uma fonte de luz LED incorporada a um refletor metálico quando este sofrer alteração da sua superfície interna, por meio da incorporação de materiais como tinta, microesferas de vidro e cacos de vidro.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Construir um *setup* capaz de avaliar o desempenho de um refletor metálico e sua fonte do ponto de vista de iluminância bem como área de iluminação;
- Alterar a superfície interna do refletor por meio do revestimento interno com tinta branca, microesferas de vidro sólidas e cacos de vidro sólidos, preservando a fonte luminosa;
- Avaliar e comparar a iluminância para os seguintes casos: amostra referência, revestimento com tinta branca, com cacos de vidro e com

microesferas, alterando a densidade de material e granulometria (casos microesferas e cacos de vidro);

- Avaliar e comparar a área de iluminação para os mesmos casos citados acima, alterando a densidade de material e granulometria (casos microesferas e cacos de vidro);
- Avaliar a temperatura da superfície da luminária para os mesmos casos citados acima, alterando a densidade de material e granulometria (casos microesferas e cacos de vidro);
- Avaliar o consumo energético para o melhor caso e comparar com as amostras de referência e revestida com tinta
- Comparar a iluminância, a área de iluminação e o consumo energético entre o melhor caso e um refletor de LED atual com mesma potência

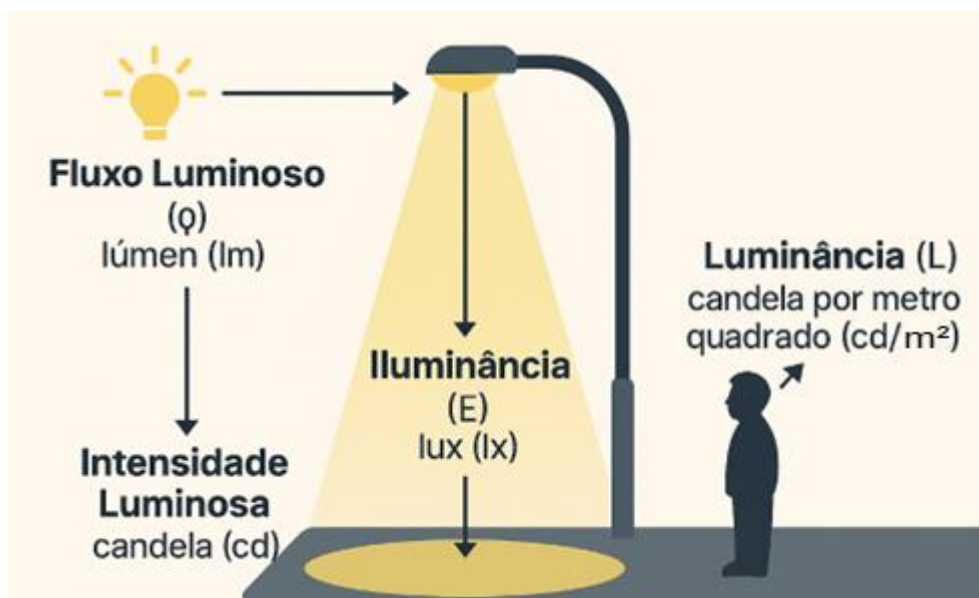
## 2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo, são apresentados os principais tópicos relacionados com a pesquisa, os quais possibilitam compreender a definição de conceitos luminotécnicos pertinentes à dissertação, tipologias de luminárias usualmente empregadas, terminologias relacionadas à eficiência energética, além da abordagem acerca dos materiais que serão empregados, bem como suas propriedades.

### 2.1 Conceitos Luminotécnicos

Conforme Campos, Santos e Roberto (2007), quando são realizados estudos envolvendo a iluminação, é necessário ir além da eficiência e qualidade da iluminação: antes da comercialização e distribuição, devem ser avaliados os níveis regulamentares de iluminação, que funcionam como uma caracterização do material. Na Figura 1 estão apresentados de forma esquemática, os termos associados a luz desde a sua emissão até atingir um alvo. Mais especificamente, os conceitos envolvidos são: fluxo luminoso, Intensidade luminosa, iluminância, luminância e temperatura de cor. Nos próximos subitens são descritos cada um destes conceitos.

Figura 1- Conceitos luminotécnicos



Fonte: Adaptado de SurrIDGE (2024).

### 2.1.1 Fluxo Luminoso

Expresso em lúmens, o fluxo luminoso corresponde à quantidade de luz emitida por uma fonte em sua tensão nominal de funcionamento (Viana et al.,2021). Vale ressaltar também que, a depender do tipo de lâmpada e sua potência, o fluxo luminoso pode ser alterado, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Fluxos luminosos para diferentes tipos de lâmpadas

Fluxo Luminoso	Incandescente	Fluorescente	LED
90 lm	15 W	---	1 W
450 lm	40 W	13 W	6 W
1100 lm	75 W	20 W	15 W
2600 lm	150 W	40 W	25 W

Fonte: Adaptado de UFPR (s.d)

### 2.1.2 Intensidade Luminosa

Sendo expressa em candela, a intensidade luminosa é apresentada como sendo a densidade de fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido em uma direção específica (Choudhury,2014). Ainda, conforme Simons e Bean (2001), a unidade de intensidade luminosa é a candela que é definida como a intensidade luminosa em uma determinada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz com intensidade radiante de  $1/683$  W por esterradiano. De maneira genérica, a equação que descreve essa propriedade encontra-se apresentada na Equação 1.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1)$$

Onde:

$\Phi$  = fluxo luminoso, expresso em lúmens

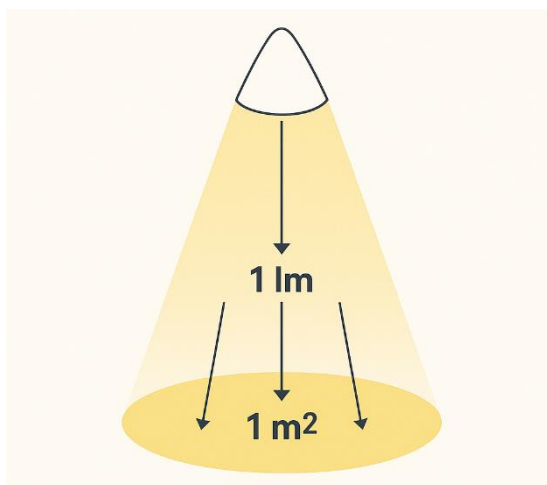
$\Omega$  = ângulo sólido, expresso em esterradiano

### 2.1.3 Iluminância

A iluminância, também conhecida como iluminamento, é uma grandeza fotométrica que descreve a quantidade de luz incidente sobre uma superfície, sendo

expressa em lux. Esta unidade é definida como a iluminância produzida por um fluxo luminoso de 1 lúmen (lm) uniformemente distribuído sobre uma área de 1 metro quadrado, cuja incidência ocorre perpendicularmente à superfície (Figura 2). Na prática, a medição da iluminância é realizada com o auxílio de um luxímetro, instrumento essencial para avaliar as condições de iluminação em diversos ambientes.

Figura 2- Iluminância de uma fonte de luz



Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2007).

Contudo, no contexto real de aplicação, a distribuição do fluxo luminoso raramente é homogênea. Fatores como a geometria do espaço, a posição das luminárias e as propriedades refletoras das superfícies interferem na uniformidade da iluminância. Como resultado, variações nos níveis de iluminância dentro de uma mesma área podem ocorrer, impactando diretamente a percepção visual e o desempenho das atividades humanas. Segundo a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013, essas variações influenciam a qualidade do ambiente visual, podendo provocar contrastes inadequados, fadiga ocular e aumento da propensão a erros em tarefas visuais.

A referida normativa estabelece que, em condições usuais de iluminação, uma iluminância mínima de 20 lux é necessária para permitir o reconhecimento adequado das características faciais, evidenciando a importância de se manter níveis adequados de iluminância para garantir conforto visual e eficiência nas atividades. Essa relação entre iluminância e percepção visual foi objeto de estudo prático conduzido por Boyse

(2014), o qual investigou a influência dos níveis de iluminância sobre o conforto visual e a produtividade em ambientes de trabalho. No experimento, dois grupos foram expostos a diferentes condições de iluminação artificial, sendo que o primeiro grupo permaneceu sob uma iluminância constante de 110 lux, enquanto o segundo foi submetido a uma redução gradual de iluminância, iniciando em 110 lux e decrescendo em etapas de 11 lux. Inicialmente ambos os grupos apresentaram uma melhora na produção, porém, quando a iluminância do segundo grupo atingiu 33 lux, os integrantes relataram desconforto na visão, causando um déficit na produção.

Desta maneira, o estudo apresentado por Boyce (2014) evidencia a importância de considerar a iluminância como um fator determinante para o conforto visual e a eficiência operacional em ambientes em geral, e não somente um requisito técnico. Compreender a interação entre a distribuição da luz e a percepção visual é fundamental para o desenvolvimento de soluções de iluminação que conciliem eficiência energética e qualidade ambiental.

#### 2.1.4 Luminância

A luminância (L) é uma grandeza fotométrica que descreve a intensidade do brilho percebido por um observador ao olhar para uma superfície iluminada. Diferentemente da iluminância, que mede a quantidade de luz incidente sobre uma superfície, a luminância está relacionada à luz que é refletida ou transmitida pela superfície em direção ao campo de visão do observador, considerando o ângulo de observação (Ferreira, 2010). Sua unidade de medida é a candela por metro quadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), expressando, portanto, a densidade do fluxo luminoso visível numa determinada direção, representada abaixo pela equação 2.

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

Onde:

I= Intensidade luminosa, expressa em candelas

A= Área projetada, em  $\text{m}^2$

$\alpha$ = Ângulo considerado, em graus

Um dos parâmetros que interfere na descrição do brilho percebido está relacionado ao material da superfície iluminada, visto que cada um apresenta um coeficiente de reflexão específico. Ressalta-se também que o coeficiente de reflexão é dado por meio da relação entre o fluxo luminoso refletido e o fluxo luminoso incidente em uma determinada superfície. Abaixo, na Tabela 2 encontram-se apresentados alguns materiais e cores, e seus respectivos coeficientes de reflexão.

Tabela 2- Coeficientes de reflexão de algumas cores e materiais

Material/Cor	Coeficiente de Reflexão ( $\rho$ )
Vidro transparente	$6\% \leq \rho \leq 8\%$
Madeira Clara	$\rho = 40\%$
Madeira Escura	$15\% \leq \rho \leq 20\%$
Gesso	$\rho = 80\%$
Branco	$70\% \leq \rho \leq 80\%$
Bege	$25\% \leq \rho \leq 35\%$
Cinza Escuro	$10\% \leq \rho \leq 15\%$
Cinza Claro	$40\% \leq \rho \leq 45\%$

Fonte: Adaptado de OSRAM (s. d.)

### 2.1.5 Temperatura de Cor

Sendo uma propriedade que caracteriza uma lâmpada, a temperatura de cor refere-se à tonalidade que a luz emitida pela fonte empresta ao ambiente (ELETROBRAS, 2011). Podendo ser apresentada na forma de temperatura de cor quente (tons mais claros como o branco e azul), fria (tons mais avermelhados) ou neutra, a temperatura de cor deve ser levada em consideração para cada caso, uma vez que tons quentes estão associados à sensação de relaxamento intensificado, enquanto tons frios geram uma sensação de maior atividade (Camelo *et al.*, 2010).

A Temperatura de Cor Correlata (TCC) refere-se a uma característica da luz que define sua tonalidade predominante, variando entre matizes quentes (mornas),

como amarelo e vermelho, e frios, como azul. De modo geral, fontes luminosas com TCC inferior a 3300 K são percebidas como mornas. Já as fontes que estão no intervalo de  $3300\text{ K} \leq \text{TCC} < 5000\text{ K}$  podem ser caracterizadas como neutras, enquanto aquelas com valores iguais ou superiores a 5000 K apresentam uma aparência fria (ELETROBRAS, 2011). Na Figura 3 são apresentadas algumas faixas típicas de TCC, ilustrando visualmente a transição entre as tonalidades quentes, neutras e frias, e permitindo compreender como a temperatura de cor impacta na percepção visual do espaço.

Figura 3- Temperatura de Cor Correlata, dada em kelvin



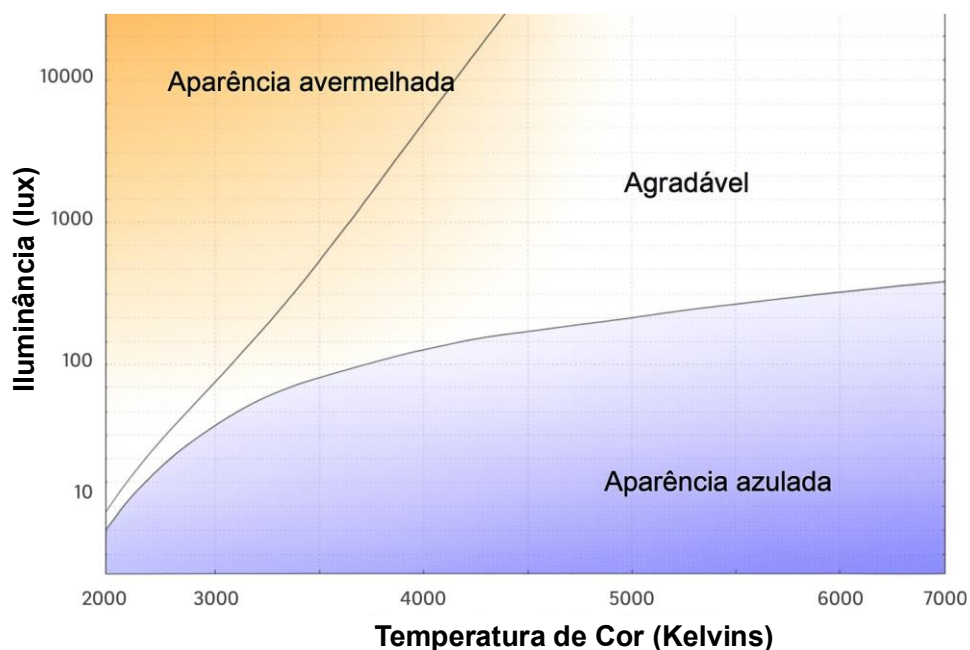
Fonte: Adaptado de Sylvania (2020).

Sob um contexto histórico, a implementação de sistemas de iluminação pública e industrial era fortemente dominada pelo uso de lâmpadas de vapor de sódio que, apesar de apresentarem elevada eficiência luminosa, dependiam de equipamentos auxiliares (reatores e ignitores) para seu funcionamento. A presença do sódio em sua composição conferia a essas lâmpadas uma temperatura de cor típica de aproximadamente 2100 K, resultando em uma tonalidade alaranjada característica (Mendonça, 2008). Com o advento da tecnologia LED, tornou-se possível flexibilizar a escolha da TCC sem comprometer a eficiência energética, permitindo o desenvolvimento de soluções de iluminação mais versáteis e ambientalmente adequadas.

Ainda que seja uma característica relevante de uma fonte de luz, a TCC tende a andar em paralelo com a iluminância: efeitos psicológicos da variação da TCC e da iluminância sugerem que o uso de lâmpadas com altos valores de TCC em baixas iluminâncias transpareçam a ideia de um ambiente frio e escuro, enquanto lâmpadas com baixos valores de TCC em altas iluminâncias transpareçam a ideia de um

ambiente artificial e excessivamente colorido (IESNA, 2000). Tal analogia também é apresentada no Diagrama de Kruithof, na Figura 4. Nele, encontram-se apresentadas as combinações entre TCC e iluminância, e como elas são percebidas como agradáveis ao olho humano.

Figura 4- Diagrama de Kruithof



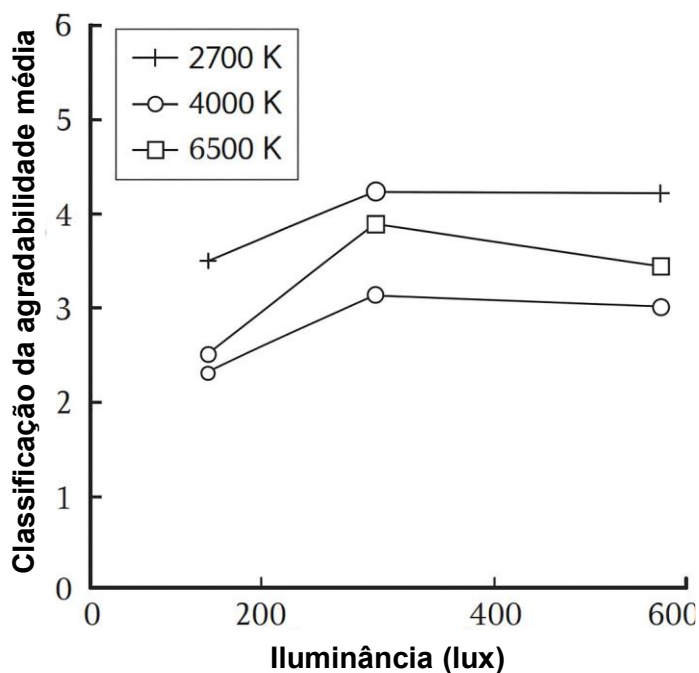
Fonte: Adaptado de Ashdown e Design (2015).

Embora o Diagrama de Kruithof seja amplamente reconhecido como uma referência histórica na relação entre a TCC e iluminância, sua aplicabilidade em contextos contemporâneos vem sendo objeto de reavaliação. Em uma revisão crítica, Fotios (2017) destacou que, para cada TCC, existem faixas específicas de iluminância dentro das quais a luz é percebida como agradável ao observador. Iluminâncias abaixo dessa faixa tendem a transmitir sensações de ambientes frios ou mal iluminados, enquanto valores acima do limite superior podem resultar em ambientes visualmente desconfortáveis, com tonalidades artificialmente saturadas.

Embora estejam apresentadas a influência da iluminância e da TCC sob o aspecto de conforto visual, surgem limitações quanto a relação da TCC com a iluminância. Neste contexto, Boyce (2014) traz alguns estudos mais recentes, empregando tecnologias mais modernas (como o uso de LEDs) e considerando outras variáveis perceptuais. Um destes estudos, realizado por Vienot *et al.* (2009), avaliou

três níveis de iluminância (150, 300 e 600 lux) em três TCCs diferentes (2700, 4000 e 6500K) para a realização de tarefas visuais; embora apresentem os resultados de maneira qualitativa, conforme mostrado na Figura 5, foi possível concluir que tem-se efeitos significativos da iluminância e da TCC na agradabilidade, mas eles não seguem as condições de contorno de Kruithof. Enquanto o modelo de Kruithof propõe que a luz de TCC=6500K deve ser mais agradável acima de 600 lux, observou-se que esta é a menos agradável em todas as três iluminâncias (150, 300 e 600 lux) e; enquanto a fonte de luz de 2700K deve ser mais agradável a 150 lux (modelo de Kruithof), observou-se que é a mais agradável tanto em 150 lux quanto em 600 lux.

Figura 5- Agradabilidade de diferentes iluminâncias e diferentes TCCs



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

## 2.2 Eficiência Energética

A eficiência energética constitui um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, sendo entendida como o processo de aprimoramento do uso da energia, com o objetivo de maximizar o desempenho dos sistemas enquanto se minimiza o consumo e os desperdícios. Trata-se, portanto, da capacidade de realizar as mesmas funções, com igual ou superior qualidade, utilizando uma quantidade reduzida de energia (GCCE, 2024).

No cenário brasileiro, a eficiência energética ganhou relevância normativa a partir da promulgação da Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que instituiu a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Esta legislação emergiu como uma resposta à crise energética vivenciada no país no início dos anos 2000, estabelecendo diretrizes para a utilização eficiente dos recursos energéticos, priorizando a redução dos impactos ambientais e promovendo a sustentabilidade do setor elétrico (Brasil, 2001).

A referida legislação estabelece níveis máximos de consumo e mínimos de eficiência energética para máquinas, equipamentos e edificações, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e fomentando a adoção de práticas sustentáveis em diversos setores. No campo da iluminação artificial, tais diretrizes não se limitam à substituição de fontes luminosas, mas abrangem também aspectos relacionados ao projeto luminotécnico, incluindo a otimização de superfícies refletoras e dispositivos de controle óptico, os quais desempenham papel crucial na eficiência global do sistema (Brasil, 2001).

### **2.3 Retrofit**

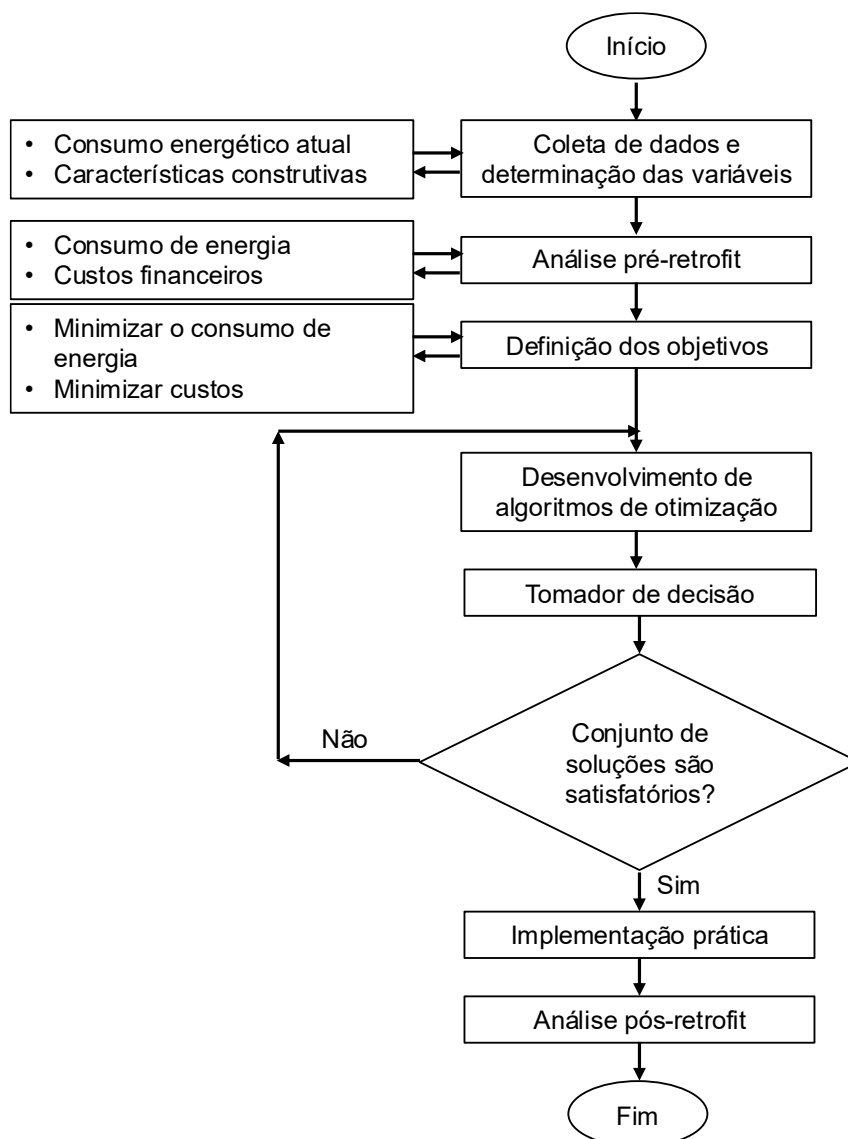
No contexto da eficiência energética, o retrofit consiste na modernização de sistemas e estruturas de edificações existentes, com o objetivo de melhorar seu desempenho energético sem que seja necessário demolir ou reconstruir o edifício (Alm *et al.*, 2005). Em outros termos, o *retrofit* envolve a incorporação de novos recursos ou tecnologias em edificações existentes, os quais não foram previstos no projeto original, com o objetivo de modernizar seus sistemas e torná-los mais eficientes (OED, 2017).

Nesse contexto, a escassez de combustíveis fósseis e o aumento dos custos energéticos intensificaram a busca por alternativas que mantivessem o conforto térmico e visual das edificações, sem comprometer a viabilidade econômica. Esse cenário favoreceu o desenvolvimento de tecnologias e estratégias associadas ao *retrofit*. No entanto, é importante destacar que o êxito desses sistemas também depende dos usuários: ainda que a tendência seja de maior eficiência, o modo como os ocupantes interagem com o ambiente exerce influência significativa sobre o desempenho: Shaikh *et al.* (2017) abordou alguns dos desafios enfrentados na implementação do sistema *retrofit* em edifícios, conforme apresentado abaixo:

- Período: o tempo de investimento e tempo de retorno oferecem a viabilidade do sistema;
- Prioridades de partes interessadas: diferentes consumidores teriam diferentes preferências para requisitos específicos de energia;
- Análise de risco: preocupação entre os consumidores devido a retornos de longo prazo;
- Disponibilidade de tecnologia: a disponibilidade da tecnologia e seu avanço são fatores-chave, devido aos benefícios finais da modernização que seriam alcançados pela tecnologia implementada;
- Políticas governamentais de incentivo;
- Previsão de desempenho energético.

Em síntese, o procedimento de implementação do sistema *retrofit* segue as etapas apresentadas por Shaikh *et al.* (2017), conforme ilustrado na Figura 6. Inicialmente tem-se a coleta de dados pertinentes e determinação das variáveis (consumo energético atual, características construtivas e afins), seguidas da análise das condições antes do *retrofit*; na sequência, tem-se a determinação dos objetivos (minimizar o consumo de energia, minimizar custos, maximizar o conforto e afins) levando em consideração as normativas técnicas, restrições arquitetônicas e orçamentárias. Após, é desenvolvido o algoritmo de otimização (para encontrar soluções ideais ou próximas do ideal), cujo qual é escolhido pelo tomador de decisão que avalia se os resultados tendem a ser satisfatórios. Em caso positivo, dá-se seguimento na implementação do sistema, que é avaliado posteriormente, por meio da análise pós-*retrofit*.

Figura 6- Diagrama de análise *retrofit*



Fonte: Adaptado de Shaikh *et al.* (2017)

## 2.4 Sistemas de Iluminação

Para que a energia elétrica seja convertida em luz visível, faz-se necessário o uso das lâmpadas, que são os únicos componentes de iluminação com tal capacidade. Entretanto, para que essa luz possa ser produzida e distribuída, se faz necessária a utilização de reatores (a depender do tipo de lâmpada) e de luminárias, que servem para direcionar e distribuir a luz para a superfície de interesse (Ghisi, 1997).

Inicialmente, a funcionalidade das luminárias era exclusivamente para servir de sustentação e interface de conexão entre a lâmpada e a rede elétrica. Nestes

modelos, as fontes luminosas estavam expostas às intempéries e a outros agentes externos, além de não promover o direcionamento adequado do fluxo luminoso (COPEL, 2012). Com o crescente avanço populacional e tecnológico, fez-se necessário o desenvolvimento de medidas que objetivassem a otimização destes sistemas, com o melhor aproveitamento dos recursos. Rosito (2009) cita que, inicialmente os sistemas de iluminação eram compostos por fontes que continham sódio e mercúrio em sua composição; embora desempenhassem o principal objetivo (iluminar), estes sistemas apresentavam algumas limitações, das quais é possível citar a menor eficiência (para o caso das lâmpadas a vapor de mercúrio) e a necessidade de componentes extras para o seu funcionamento (uso de reatores para o funcionamento das lâmpadas de vapor de sódio).

A fim de melhorar a eficiência da luminária, começou-se o desenvolvimento e incrementação de conjuntos ópticos, responsáveis por direcionar o fluxo luminoso para locais de interesse, reduzindo assim a poluição luminosa, causada pela dispersão de luminosidade, conforme pode ser observado na Figura 7. Nesta figura, estão apresentadas diferentes distribuições de feixes luminosos, e como eles atuam na qualidade visual: enquanto o primeiro caso da esquerda aborda um feixe amplo e difuso (iluminando uma grande área, mas com baixa intensidade), o quarto caso aborda um feixe mais concentrado e direcionado (focando a luz em uma área menor, mas com maior intensidade). Além disso, houve a incrementação de materiais poliméricos, vítreos e metálicos, a fim de desenvolver equipamentos fechados, que protegem ainda mais as luminárias, além de atuarem no redirecionamento da luz, a fim de formar uma distribuição mais controlada e eficiente (COPEL,2012).

Figura 7- Aumento da eficiência luminosa com conjunto óptico eficiente



Fonte: COPEL (2012).

A depender da finalidade e local de instalação, existem algumas tipologias de luminárias, cada uma apresentando uma melhor funcionalidade para determinado

ambiente. Abaixo, encontram-se apresentadas alguns tipos de luminárias, classificadas de acordo com o local de instalação.

#### **2.4.1 Luminárias para ambientes comerciais, industriais e residenciais**

Para ambientes comerciais, industriais e residenciais, as luminárias mais utilizadas são as que possuem lâmpadas fluorescentes tubulares em sua interface. Normalmente estas luminárias apresentam um sistema de controle de luz, a fim de proporcionar uma melhor proteção visual por meio da redução de luminância da luminária em direções que poderiam causar ofuscamento (Lighting, 1981). Embora a lâmpada empregada esteja se tornando cada vez mais obsoleta, principalmente pela disseminação da tecnologia LED, estes modelos de luminárias ainda são utilizados, e podem se apresentar no formato de luminárias fechadas ou abertas.

Apresentando um rendimento moderado, as luminárias fechadas, são caracterizadas por possuírem difusores - responsáveis por distribuir a luz de forma mais uniforme, reduzindo a sensação de ofuscamento- podendo ser estes de vidro temperado ou acrílico (Van Bommel, 2013). Podem ser herméticas (completamente fechadas, evitando a entrada de ar) ou equipadas com elementos de controle de luz. Apresentam uma manutenção mais complexa e podem ser instaladas em ambientes residenciais (sobre a superfície do teto ou embutidas) (ELETROBRAS, 2011). Abaixo, a Figura 8 apresenta um modelo de luminária fechada com difusor acrílico transparente, normalmente utilizada em iluminação comercial e residencial.

Figura 8- Luminária fechada com difusor transparente



Fonte: RT Iluminação (2025).

Já as luminárias abertas, quando comparadas às luminárias fechadas, apresentam um maior rendimento. Podendo ou não apresentar controlador de luz, essas luminárias apresentam uma facilidade adicional no momento da manutenção, pelo fato de não possuírem difusores (Bakman, 2018). Assim sendo, a Figura 9 traz o exemplo de uma luminária aberta, que é normalmente utilizada em iluminação comercial e residencial.

Figura 9- Luminária aberta de embutir



Fonte: Leroy Merlin (2025).

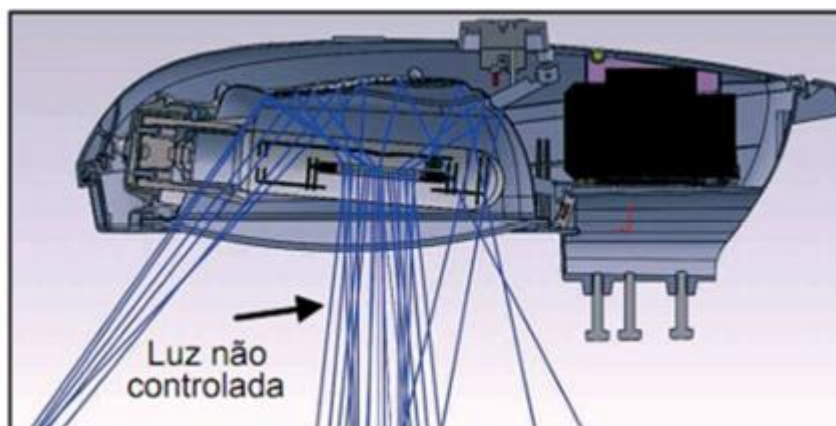
#### **2.4.2 Luminárias para iluminação pública**

Como ambientes públicos possuem, em sua maioria, uma grande área livre, as mesmas requerem uma iluminação adequada capaz de suprir as necessidades de conforto e segurança para os usuários (Maggi, 2013). Para que estas necessidades sejam atendidas, faz-se necessário o uso de fontes que apresentem uma alta eficácia: neste aspecto, é comum o uso de lâmpadas do tipo VSAP (Vapor de Sódio de Alta Pressão) em conjunto com luminárias, cujas quais são responsáveis por direcionar a luz gerada de acordo com o tipo de distribuição desejada. Todavia, este controle de direcionamento de luz torna-se um pouco complexo, o que acaba por resultar em poluição luminosa, desperdício de energia e baixo índice de reprodução de cor (Sanchez, 2016).

Devido ao seu tamanho, e por atingirem elevadas temperaturas, as lâmpadas de VSAP não permitem o uso de controladores de luz iguais aos citados para luminárias para ambientes comerciais, industriais e residenciais. A solução é o uso de refletores acoplados à luminária, que permitem uma luminosidade mais uniforme.

Embora auxilie, somente uma parcela da luz que incide sobre o refletor pode ser modificada, conforme apresentado na Figura 10. Diante disso, uma gama de materiais pode ser empregada, dentre os mais usuais estão o vidro espelhado, plástico espelhado e alumínio anodizado (este último, o mais utilizado por apresentar alta refletância, baixo custo, leveza e boa resistência) (Maggi, 2013).

Figura 10- Esquemática da emissão luminosa de uma luminária



Fonte: Maggi (2013).

Dessa forma, Maggi (2013) também cita que a incrementação da tecnologia LED em iluminação pública é um fator que deve ser analisado, uma vez que eles são caracterizados pela alta eficiência, compactidade, longa vida útil e são ecologicamente corretos, visto que não possuem metais pesados em sua construção. Entretanto, grande parte das lâmpadas LED apresentam uma distribuição luminosa simétrica, o que acarreta em áreas consideradas de pouca distribuição luminosa. Dessa maneira, uma opção é fazer uso de luminárias e refletores dotados de elementos ópticos secundários que, colocados sobre os emissores de luz, são capazes de direcionar grande parte dos raios luminosos emitidos pela fonte.

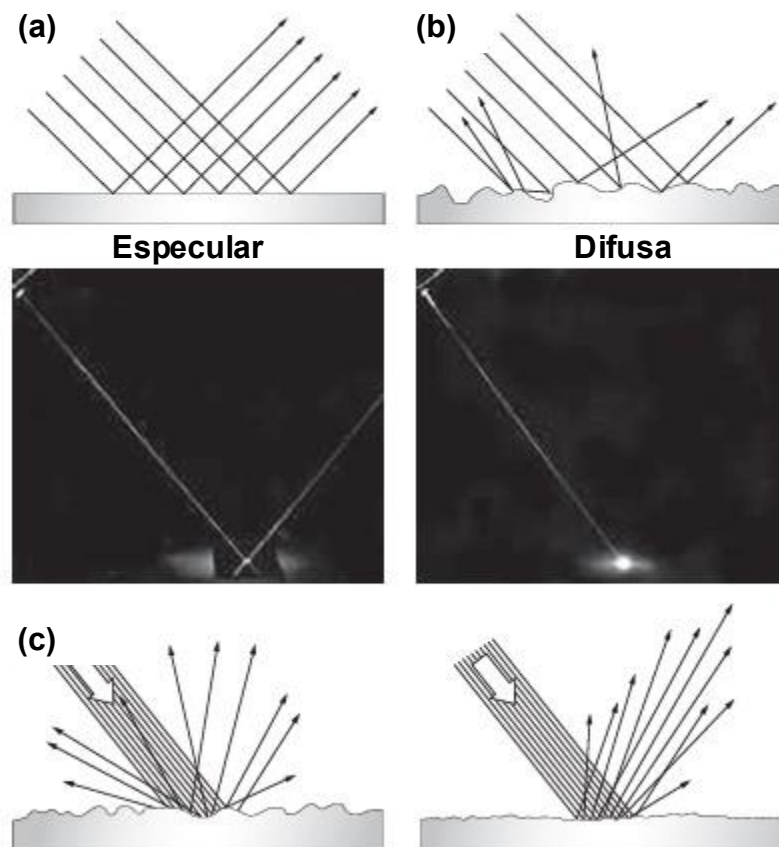
## 2.5 Tipos de reflexão em superfícies

Basicamente existem três tipos de reflexões da luz quando esta interage com uma superfície: reflexão especular, reflexão difusa e retrorreflexão. A última envolve também o conceito de refração. Abaixo tais conceitos estão descritos em mais detalhes.

### 2.5.1 Reflexão especular e difusa

Refere-se ao fenômeno no qual a luz incide em uma superfície, e retorna ao meio sem ser absorvida. A reflexão pode ser classificada como especular - quando a luz incide sobre uma superfície lisa ou polida, e reflete em ângulo bem definido -, conforme mostrado na Figura 11 (a) e, difusa - quando a luz incide em uma superfície rugosa, refletindo a luz em múltiplas direções -, conforme mostrado na Figura 11(b). Para ambos os casos, as leis da reflexão regem e estabelecem os ângulos de reflexão: para a reflexão especular, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão, enquanto para a reflexão difusa surgem múltiplos ângulos de reflexão, resultando em uma distribuição angular mais homogênea da luz, conforme Figura 11(c) (Hecht, 2017).

Figura 11- Reflexão da luz



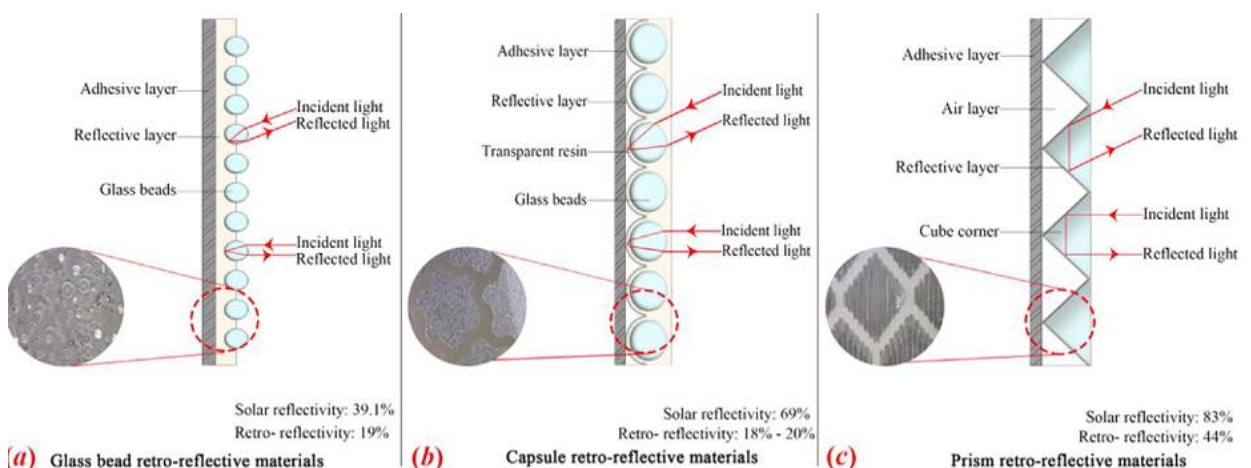
Fonte: Adaptado de Hecht (2017).

## 2.5.2 Retrorreflexão

A retrorreflexão pode ser definida como a capacidade de refletir a radiação ao longo da direção incidente, ou seja, de volta para a fonte, diferente do que acontece na reflexão especular e difusa (Wang *et al.*, 2021). A retrorreflexão ocorre devido a um efeito combinado entre reflexão e refração. Como exemplo, em esferas sólidas de vidro, primeiramente a luz é refratada ao interagir na superfície ar-vidro. A refração consiste na passagem da luz de um meio para o outro, reduzindo a velocidade de propagação da luz e normalmente alterando o ângulo de propagação da luz dentro do material (ângulo de refração) em relação ao ângulo de incidência (USP, 2013). Ao interagir novamente com a superfície vidro-ar, a luz é refletida e refratada de volta para a fonte, portanto, sendo de forma geral retrorrefletida.

Inicialmente, materiais com propriedades retrorrefletivas eram empregados para melhoria da visibilidade noturna e refletir a fonte de iluminação o máximo possível (Grosjes, 2008), mas atualmente já vem sendo empregados em outras áreas como medida de mitigar as ilhas de calor, por exemplo, por meio da incorporação em tintas para pintura de paredes (Wang *et al.*, 2021). A depender da diferença do mecanismo óptico, os materiais retrorrefletivos podem ser classificados em três categorias: tipo esfera de vidro, tipo cápsula e tipo prisma. Desta maneira, a Figura 12 aborda o mecanismo da retrorreflexão nas três categorias citadas.

Figura 12- Mecanismo óptico em materiais retrorrefletivos



Fonte: Wang *et al.*, (2021)

Normalmente, as microesferas de vidro sólidas são produzidas com vidro do tipo soda-cal-sílica, apresentando uma superfície livre de irregularidades (lisa e polida), elevada resistência à corrosão, com diâmetro inferior a 1000 µm, sendo aplicada principalmente na sinalização viária (ABNT, 2021). Tendo como matéria-prima o vidro, as microesferas vítreas são apresentadas como substância amorfa, estável, isotrópico e homogênea (Ortiz, 1999).

## **2.6 Resíduos de Vidro**

O vidro é um material 100% reciclável, porém quando este é disposto de maneira irregular em aterros sanitários, não ocorre a sua interação com o solo nem com o meio ambiente. Além disso, por serem compostos por minerais, leva-se muitos anos para que seja degradado (ABIVIDRO, 2022).

Sendo classificado pela NBR 10004:2004 como um resíduo de classe IIA, inerte e não perigoso, o vidro é amplamente utilizado no cotidiano, e possui como cadeia produtiva inicial a extração da matéria-prima (areia), que é composta por sílica. A Figura 13 apresenta todo o ciclo do vidro, desde a extração da matéria-prima até o seu reuso. Ressalta-se neste ciclo que, o vidro pós-consumo pode seguir diferentes caminhos, desde o descarte irregular (que gera impactos sociais e ambientais), descarte convencional e a coleta seletiva, rota pela qual o vidro continua seu ciclo, podendo ser reaproveitado como matéria-prima secundária para outros setores da indústria (Batista, de Alcantara e de Castro, 2022).

Figura 13- Cadeia do vidro: da produção ao reuso



Fonte: Batista, de Alcantara e de Castro (2022).

Como um dos grandes desafios da contemporaneidade refere-se à concepção ambiental e sustentável, tem-se uma necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias e materiais que façam o reaproveitamento de resíduos (Gebremichael, Jadidi e Karakouzian, 2023). Nesta analogia, alguns estudos vêm sendo desenvolvidos, demonstrando as possibilidades do reuso destes recursos na indústria vidreira sustentável (De Lima, 2023).

Bertolo (2025) buscou produzir espumas vítreas sustentáveis, com a incrementação de materiais sustentáveis, dentro dos quais o vidro reciclado foi um dos constituintes. Adicionado juntamente com carbonato de cálcio e cinza da casca de arroz, a espuma vítrea atuou de forma eficaz no isolamento térmico ao qual foi proposto, mostrando ser uma alternativa ambientalmente correta, capaz de contribuir com a redução de resíduos, diminuindo a demanda de energia e matérias primas de origem natural.

Dias (2022) estudou o efeito da utilização do resíduo de vidro como fonte de silício, para fins de análise do processo de síntese de sílica gel (polímero inorgânico).

Inicialmente, o processo de obtenção iniciou-se com a lavagem do vidro em solução ácida; após, os resíduos foram tratados em uma solução de NaOH para a produção de silicato de sódio, sendo este titulado com sulfato de sódio para a formação do gel. Após processos de caracterização da amostra, fez-se possível a sintetização de sílica gel relativamente pura, mostrando que o resíduo de vidro foi eficaz para o procedimento estudado.

Calovi e Rossi (2023) avaliaram o potencial uso de microesferas de vidro ocas produzidas a partir de vidro reciclado no que tangencia o comportamento térmico de tintas à base de água. No estudo, foram avaliadas três dimensões diferentes do material, e as suas respectivas resistências no que tangencia a dureza, abrasão e degradação acelerada. Como conclusão, foram apresentados os prós e os contras do uso de esferas de vidro ocas como enchimento multifuncional para tinta, apresentando que o tamanho da microesfera é um parâmetro chave, visto que, quando totalmente incorporadas na matriz polimérica, são capazes de reduzir a condutividade térmica do revestimento, evitando fenômenos de acúmulo local de calor.

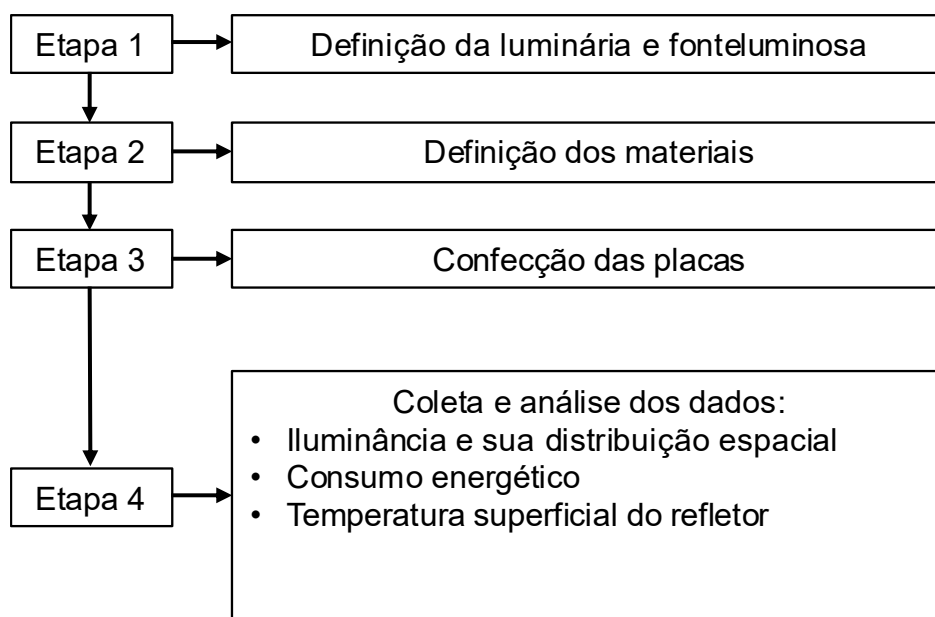
Tomás (2024) buscou utilizar o vidro reciclado para a produção e caracterização de microesferas de vidro de diferentes cores (verde, âmbar e transparente) com diâmetros compreendidos entre 63 $\mu$ m e 212 $\mu$ m, sendo posteriormente analisadas quanto a sua retrorrefletividade para serem aplicadas na sinalização horizontal. As microesferas produzidas foram comparadas com as microesferas comerciais, e mostraram que as três cores poderiam ser fabricadas e comercializadas para fins de demarcação viária, pois apresentaram retrorrefletividade similar às comerciais.

Desta maneira, nota-se que o resíduo de vidro possui grande aplicabilidade, em virtude das suas propriedades. É válido, portanto, o crescente desenvolvimento de estudos que visam a incorporação deste material em outros setores, usufruindo de suas propriedades físicas, mecânicas e ópticas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas utilizadas no desenvolvimento da pesquisa, bem como as metodologias utilizadas. O estudo está segmentado em 4 etapas, conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14- Organograma do processo experimental



Fonte: Elaboração própria (2025).

Primeiramente, foi realizada a definição da luminária a ser utilizada. Após, deu-se o processo de definição dos materiais que seriam empregados para revestir a superfície interna do refletor. Com os materiais e modelo de luminária definidos, deu-se o processo de confecção das placas. Por último, realizou-se a coleta e análise de dados referentes a iluminância, dissipação de calor da luminária, distribuição espacial da iluminância e consumo energético. Abaixo estão descritas as etapas em mais detalhes.

#### 3.1 Etapa 1- Definição da luminária e fonte luminosa

O projetor escolhido no estudo trata-se de um refletor parabólico de alumínio para lâmpadas de descarga (vapor metálico, sódio e similares), normalmente

empregado em ambientes industriais, iluminação pública, quadras esportivas e afins. A estrutura do refletor encontra-se apresentada na Figura 15.

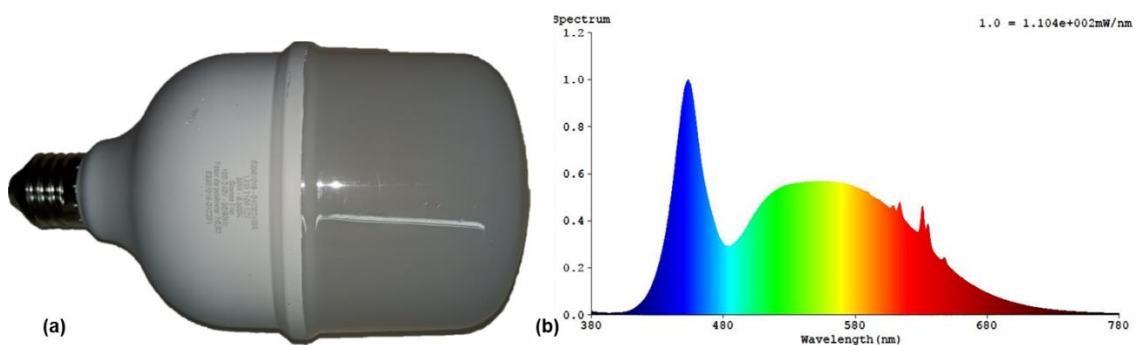
Figura 15- Projetor utilizado



Fonte: Elaboração própria (2025).

Quanto à fonte luminosa a ser empregada, foi utilizada uma fonte LED com potência de 50W, com temperatura de cor de 6.500K. Como adendo, a fabricante da fonte luminosa disponibilizou a distribuição espectral da fonte, conforme encontra-se apresentada na Figura 16.

Figura 16- Distribuição espectral da fonte luminosa



Fonte: Blumenau Iluminação (2025).

Conforme ilustrado, nota-se que a fonte apresenta forte emissão de luz azul (na faixa de 450 nm e 470 nm), indo de acordo com a especificação inicial, cuja qual informa que a temperatura de cor é de 6.500K. Evidencia-se também uma menor intensidade, porém contínua, na faixa verde. Ainda, tem-se uma emissão na região do vermelho (>600 nm), mas sem pico dominante, indicando a prevalência de uma temperatura de cor mais fria.

## 3.2 Etapa 2- Definição dos materiais

Quanto aos materiais a serem empregados e analisados para o estudo do *retrofit*, foram utilizadas tinta branca como base de revestimento, as microesferas de vidro e os cacos de vidro. Como referência, foi utilizado a luminária normal (parede interna de alumínio) para avaliação da iluminância, área de iluminação análise da eficiência da luminária e temperatura superficial do refletor. As alterações da superfície interna da luminária foram feitas com a incorporação do sistema *retrofit* por meio do revestimento interno com tinta acrílica, microesferas de vidro e cacos de vidro.

### 3.2.1 Base de Revestimento

Como a área interna da luminária é de alumínio, ela foi tomada como sendo a referência para as análises. Partindo disso, a primeira alteração foi simplesmente realizar a pintura da superfície interna de alumínio com a inserção de tinta acrílica da cor branca da marca Aquaflex (Figura 17), tinta esta que é comumente empregada na sinalização viária. Esta opção de revestimento justifica-se pela capacidade de aderência com a superfície original. Para essa etapa, a tinta acrílica foi aplicada nas placas com auxílio de um rolo de espuma. Buscou-se aplicar três demãos de tinta, a fim de assegurar que a superfície original fosse devidamente coberta de forma homogênea, além de garantir uma espessura mínima de aderência para as microesferas e cacos de vidro.

Figura 17- Tinta acrílica usada para revestimento da luminária

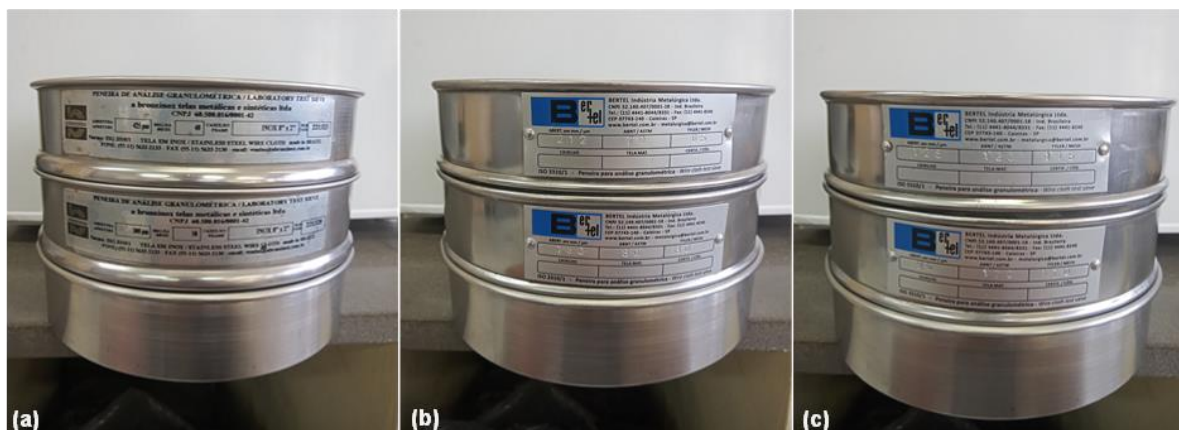


Fonte: Elaboração própria (2025).

### 3.2.2 Microesferas de Vidro e Cacos de Vidro

Quanto às microesferas de vidro e cacos de vidro, foram avaliados 3 (três) intervalos de granulometria, utilizando peneiras granulométricas da marca Bertel, classificados por peneiramento, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18- Peneiras utilizadas e faixas granulométricas



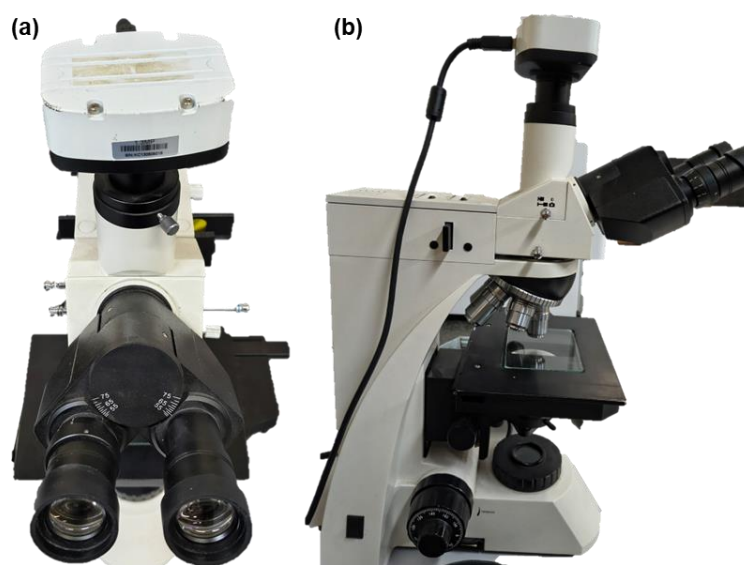
Fonte: Elaboração própria (2025).

Tanto para as microesferas de vidro quanto os cacos de vidro, foi empregado o peneiramento manual. Primeiramente, fez-se a limpeza da malha das peneiras, a fim de eliminar qualquer resíduo anterior presente na malha. Após, uma massa de aproximadamente 100 gramas de material foi colocada na peneira de limite superior (450  $\mu\text{m}$ ), onde fez-se a agitação deste material por aproximadamente 5 minutos. Sucessivamente o material passante e retido no respectivo grupo foi reservado, e as peneiras foram novamente limpas. O mesmo procedimento foi realizado por mais 4 vezes, de forma a garantir a homogeneidade dos grupos granulométricos. Ressalta-se que as peneiras seguem conforme preconização normativa NM ISO 3310-1 e, no presente estudo, foram responsáveis por separar as seguintes granulometrias:

- Material passante na peneira de abertura 425  $\mu\text{m}$  e retido na peneira de abertura 300  $\mu\text{m}$ ;
- Material passante na peneira de abertura 212  $\mu\text{m}$  e retido na peneira de abertura 180  $\mu\text{m}$ ;
- Material passante na peneira de abertura 125  $\mu\text{m}$  e retido na peneira de abertura 90  $\mu\text{m}$ .

Foram escolhidas estas granulometrias de forma a não ter sobreposição entre as faixas. A morfologia das microesferas e dos materiais foi analisada por meio da microscopia óptica, utilizando um microscópio trinocular da marca Laborana (Figura 19). Este microscópio óptico é equipado com uma lente ocular de 10x, além de 5 lentes objetivas (5x, 10x, 20x, 50x e 80x) e uma câmera CCD que permite transferir as imagens para o computador. Este equipamento encontra-se disponível no laboratório do Grupo de Óptica Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI), da Unipampa, Campus Alegrete.

Figura 19- Microscópio óptico utilizado para analisar a morfologia das microesferas e cacos de vidro



Fonte: Autoria Própria (2025).

### 3.3 Etapa 3- Confeção das Placas

Dada a definição e separação dos materiais, foi realizada a preparação das amostras a serem posteriormente analisadas. Para tal, foram empregadas 3 densidades distintas para 3 granulometrias distintas, conforme apresentado na Tabela 3, neste caso, considerando como material base a superfície de alumínio da luminária com a tinta acrílica branca. A densidade foi determinada considerando a área interna da luminária e com isso foi utilizado as massas representadas na Tabela 3.

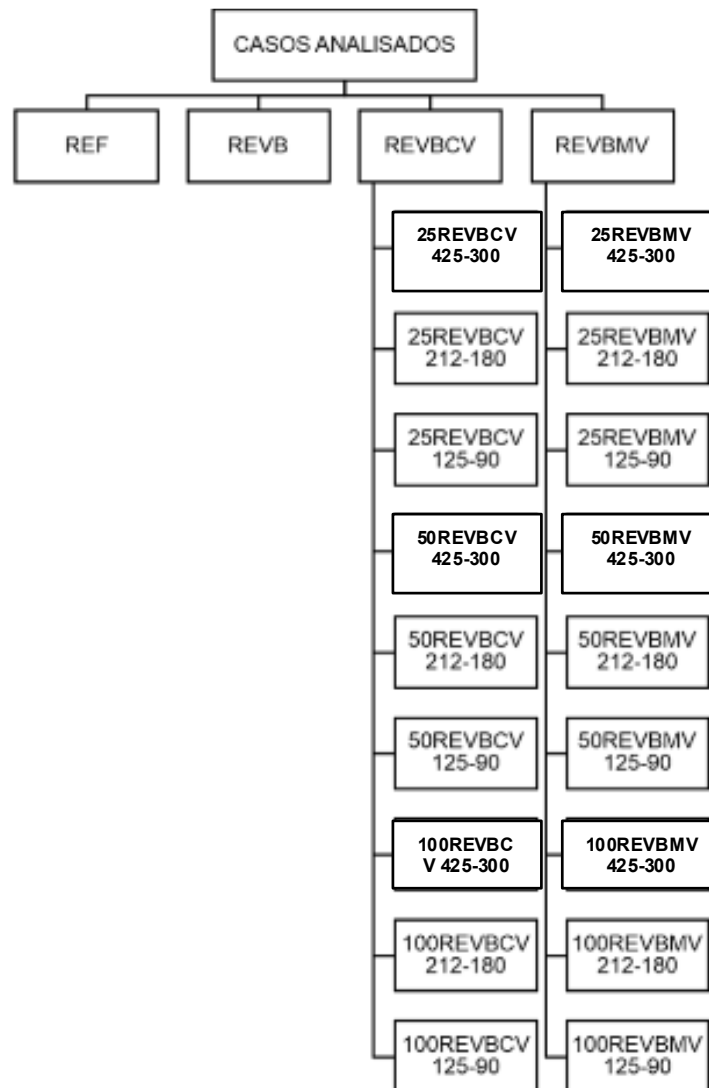
Tabela 3- Placas analisadas

Densidade (g/m <sup>2</sup> )	Diâmetro (µm)	Quantidade de material (g)
25	300µm < d < 425µm	2,90
	180µm < d < 212µm	
	90µm < d < 125µm	
50	300µm < d < 425µm	5,80
	180µm < d < 212µm	
	90µm < d < 125µm	
100	300µm < d < 425µm	11,60
	180µm < d < 212µm	
	90µm < d < 125µm	

Fonte: Elaboração própria (2025).

De forma a auxiliar na referência dos casos estudados, a Figura 20 apresenta os 20 cenários que foram avaliados na pesquisa.

Figura 20- Cenários avaliados



Fonte: Elaboração própria (2025).

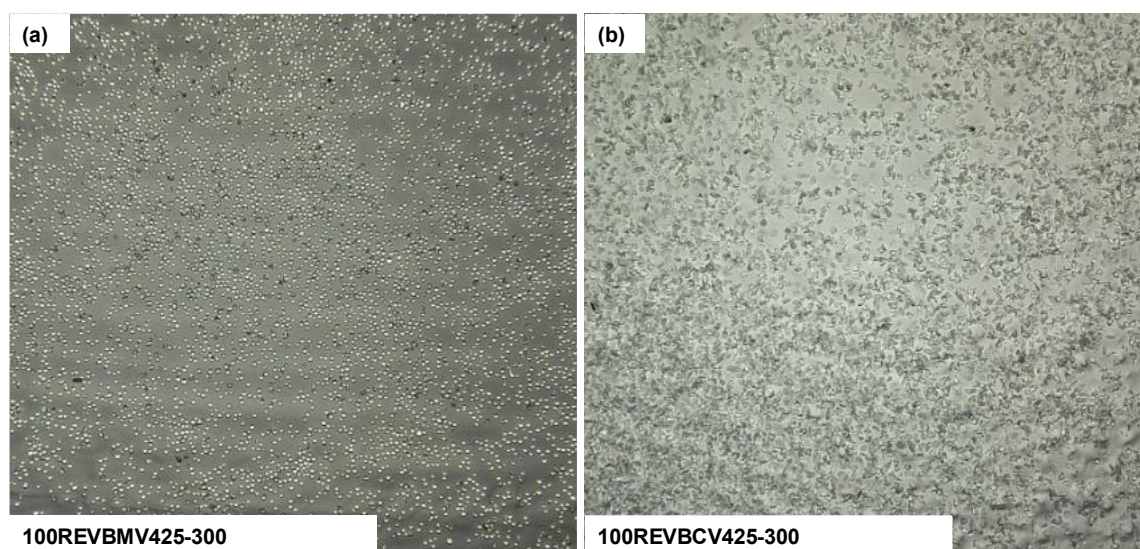
onde:

- REF: refere-se à superfície natural do refletor, assim chamada de referência;
- REVB: refere-se à superfície referência revestida com tinta acrílica branca;
- REVBCV: refere-se à superfície referência revestida com tinta acrílica branca com deposição de cacos de vidro. Neste caso, a nomenclatura conta com um prefixo que sinaliza a densidade do material aplicado, em  $\text{g/m}^2$ , e também de um sufixo, que sinaliza a faixa granulométrica do material, em  $\mu\text{m}$ .
- REVBMV: refere-se à superfície referência revestida com tinta acrílica branca com a deposição de microesferas de vidro. Neste caso, a nomenclatura também conta

com um prefixo que sinaliza a densidade do material aplicado, em  $\text{g/m}^2$  e um sufixo, que sinaliza a faixa granulométrica do material, em  $\mu\text{m}$ .

Tanto as microesferas quanto os cacos foram aspergidos sobre a tinta logo após a pintura. A Figura 21(a) e Figura 21(b) mostra exemplos de superfícies utilizadas na luminária após a pintura e deposição das microesferas (a) e cacos de vidro (b). Para este exemplo foram usados as microesferas e cacos de vidro de granulometria  $300\mu\text{m} < d < 425\mu\text{m}$  com uma densidade de  $25 \text{ g/m}^2$ .

Figura 21- Disposição dos materiais na placa



Fonte: Elaboração própria (2025).

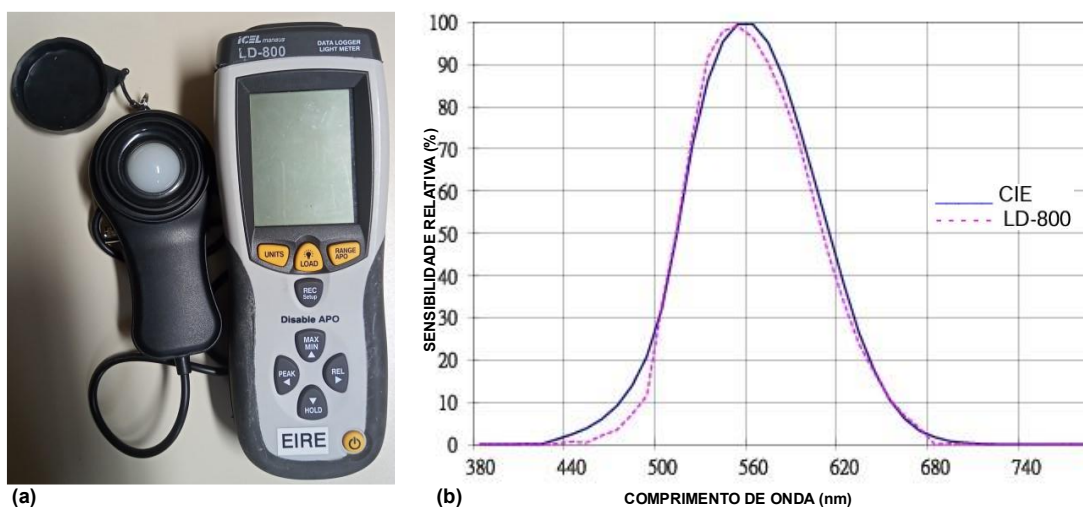
As amostras foram feitas em duplicatas. Para a realização das medidas, a construção do dispositivo onde se posiciona as placas (amostras) foi feita de forma a permitir girar as placas de 180 graus, tornando possível a realização de 4 medidas por amostra.

### 3.4 Etapa 4- Coleta dos dados

#### 3.4.1 Iluminância e sua distribuição espacial

A avaliação da iluminância foi realizada através da utilização de um luxímetro digital, modelo LD-800, apresentado na Figura 22. Este instrumento conta com um sensor que é capaz de medir a iluminância em até 4 escalas (400 Lux, 4000 Lux, 40k Lux e 400 k Lux).

Figura 22- Luxímetro

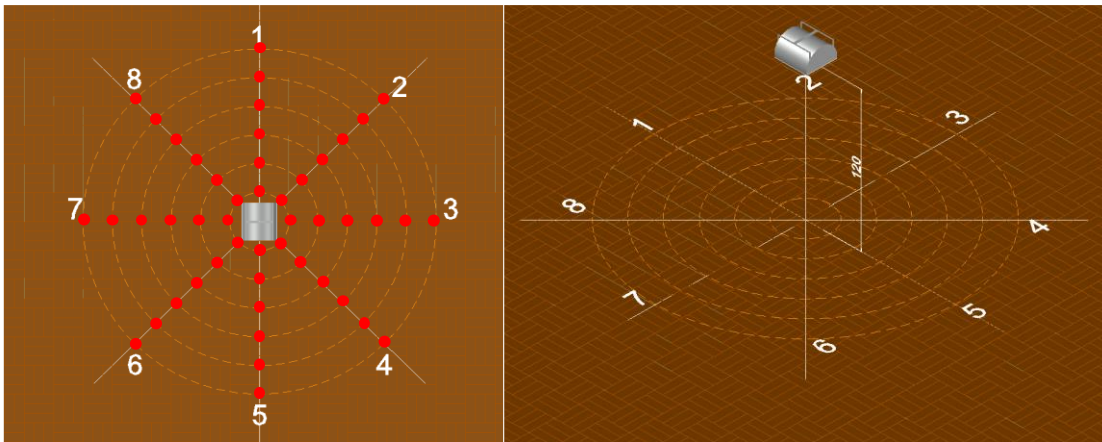


Fonte: Adaptado de Icel Manaus (2013).

O luxímetro digital conta com um sensor, responsável por detectar a luz incidente Figura 22(a). Conforme pode ser observado na curva espectral representada na Figura 22(b), nota-se que o instrumento apresenta uma resposta muito similar à estabelecida pela ISO/CIE 23539 (2023), que é a normativa que estabelece fundamentos científicos e técnicos da fotometria, ou seja, da medição da luz segundo a sensibilidade visual do olho humano, o que representa confiabilidade e precisão em seus resultados.

Para avaliar a iluminância considerando toda a área iluminada pela luminária, esta foi posicionada a uma altura de 120 cm. Foram avaliados com o luxímetro 48 pontos, dispostos conforme mostra a Figura 23. Do centro da fonte (lâmpada projetada no chão) até a borda foram avaliados 6 pontos igualmente espaçados e de forma radial foram avaliadas 8 diferentes direções.

Figura 23- Esquema mostrando o posicionamento da fonte e os pontos em que foram feitos a coleta de dados



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para a avaliação das diferentes condições da superfície da luminária, foi utilizada uma sala localizada na área interna da Unipampa, Campus Alegrete, cuja qual possui uma proteção contra a incidência de iluminação externa. Este foi um fator importante, pois este ambiente reduz uma das variáveis (iluminação externa) que poderia interferir no levantamento dos dados. Ressalta-se que essa sala possui piso revestido com madeira, do tipo *parquet* e embora apresente objetos fixos (mesas e cadeiras), possui uma área livre que possibilitou o levantamento dos dados conforme apresentado anteriormente. A Figura 24 representa uma imagem da sala onde foram feitas as medições.

Figura 24- Sala utilizada para coleta de dados



Fonte: Elaboração própria (2025)

A partir dos dados de iluminância, que foram armazenados em uma planilha eletrônica, foi realizado o mapeamento desta iluminância quando a fonte estava a uma altura de 120 cm. Por meio da visualização gráfica gerada em *Python*, foi possível identificar a distribuição da iluminância ao longo das 8 direções radiais.

Os dados de iluminância foram apresentados em formato de *heatmap radial*, com a finalidade de auxiliar na visualização dos mesmos. Para isso, foram considerados 2 cenários de avaliação:

- Cenário 1 (considerando os pontos fixos): Neste cenário, a avaliação da iluminância foi realizada considerando uma malha fixa de pontos previamente definidos, distribuídos de forma regular no plano de medição. Os valores de iluminância coletados em cada ponto foram utilizados para comparar o desempenho luminoso dos diferentes tratamentos superficiais (referência, microesferas de vidro e cacos de vidro), sem considerar um critério mínimo de iluminância.
- Cenário 2 (considerando uma iluminância de corte): Com a iluminância de corte estabelecida em 100 lux, foi gerada a respectiva área de iluminação: para cada uma das direções, foi coletada a distância compreendida entre o centro da luminária projetada na superfície até o local que apresenta a iluminância fixada em 100 lux. Foram realizadas 4 leituras por amostra e sequencialmente as referidas distâncias foram redesenhadas no *software* Autodesk AutoCAD, que permitiu gerar uma área compreendendo os limites de cada direção. Assim, a área iluminada para cada caso foi representada graficamente em um gráfico “Área iluminada vs configuração”.

Para ambas as avaliações e com o objetivo de comparar os melhores casos, também foi considerado um refletor de LED comercial atual. Como fonte atual, foi considerado um refletor MX 50 W, cujo qual apresenta um fluxo luminoso de 3750 lúmens e uma temperatura de cor de 6500K. Ressalta-se que a potência deste refletor está equivalente a potência da lâmpada de LED utilizada para os sistemas retrofit avaliados neste trabalho. A Figura 25 mostra uma imagem do refletor comercial.

Figura 25- Refletor MX50W



Fonte: Elaboração própria (2025).

### 3.4.2 Consumo energético

Neste trabalho, a avaliação do consumo energético foi realizada considerando os cenários 1 e 2 mostrados anteriormente. Para isso foi estimado uma quantidade de 10 luminárias com 50 W (totalizando 500 W) cada e a correspondente iluminância e área de iluminação (com contornos limitados pelo corte de 100 lux). O consumo energético foi considerado pela razão potência sobre área de iluminação. No caso em que a modificação da superfície externa resultar em aumento de área iluminada ou melhoria da distribuição luminosa, pode haver a possibilidade de redução do número de luminárias necessárias, implicando em um consumo energético total menor para o mesmo nível de desempenho. Essa análise permitiu quantificar a eficiência potencial dos materiais aplicados (microesferas e cacos de vidro) do ponto de vista energético. A comparação foi feita primeiramente entre todas as amostras produzidas neste trabalho. Posteriormente, o melhor caso foi comparado com o refletor de LED atual comercialmente disponível no mercado.

### 3.4.3 Temperatura superficial do refletor

Como a fonte de luz utilizada neste estudo é do tipo LED, torna-se essencial considerar o controle da temperatura como um parâmetro de avaliação. A temperatura influencia diretamente na eficiência luminosa e na vida útil do LED, podendo comprometer seu desempenho ao longo do tempo. Estudos indicam que a distribuição térmica da luminária exerce papel relevante nesse processo, podendo reduzir significativamente a durabilidade da fonte luminosa quando não bem gerenciada,

conforme apresentado por Baumgartner et al. (2015). Como a fonte está acoplada a um refletor, tem-se uma necessidade em averiguar a distribuição térmica gerada pela fonte, para o meio externo. Neste trabalho, este parâmetro foi avaliado considerando a temperatura superficial do refletor. Para tal, foi utilizada a câmera termográfica Flir T420 (Figura 26). Tal instrumento é capaz de capturar imagens térmicas na faixa de -20 °C até 650 °C, com precisão de 2°C, conforme especificação do fabricante. Inicialmente o sistema (fonte + luminária) ficou em atividade durante o período de 30 minutos (considerado pela normativa IES LM-79/2019 como o tempo padrão para testagem de desempenho de luminárias) em temperatura ambiente controlada de 25 °C (também definida pela normativa IES LM-79/2019). A partir dela, foi realizada a aferição da temperatura com auxílio da câmera termográfica. Na sequência, a mesma aferição foi realizada com as demais amostras. Para fins de comparação, a amostra “REF” foi usada como referência.

Figura 26- Câmera termográfica utilizada



Fonte: Elaboração própria (2025).

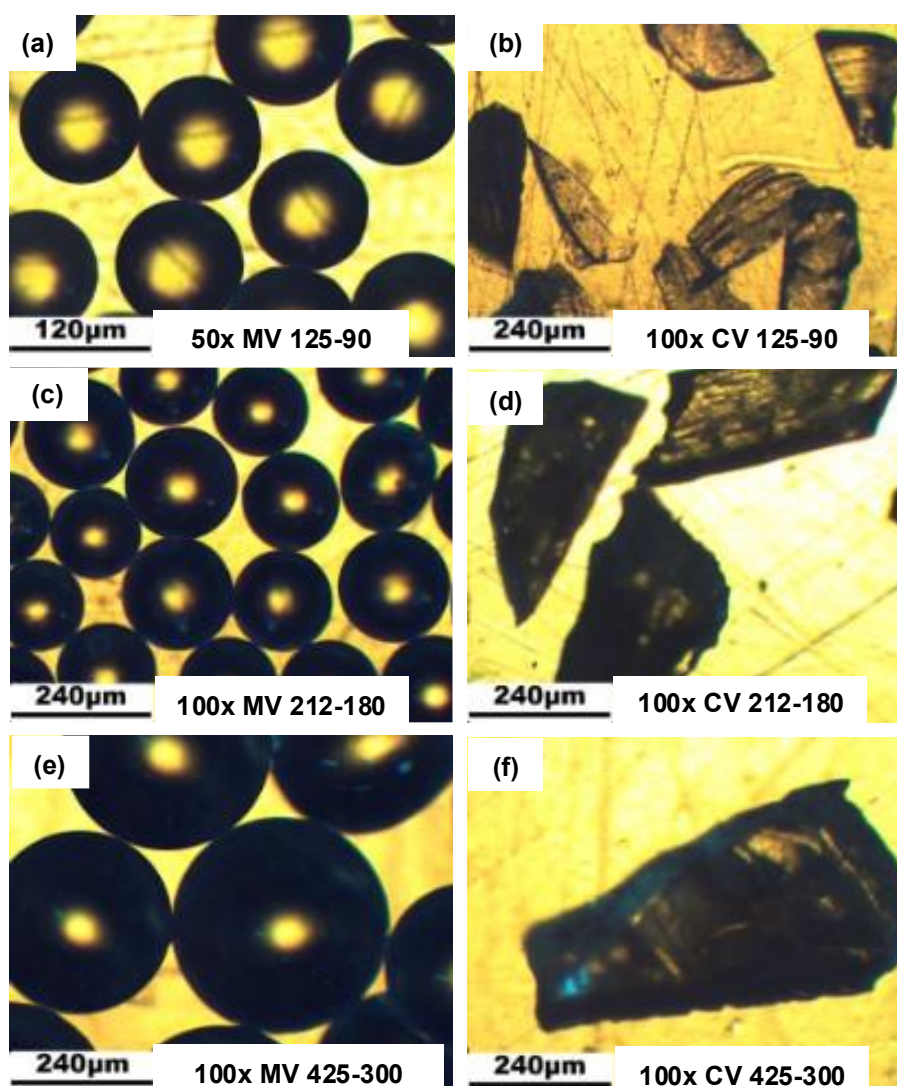
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo encontram-se apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa, bem como a discussão acerca dos mesmos.

### 4.1 Morfologia das microesferas e cacos de vidro

Com o auxílio do microscópio trinocular, foi possível avaliar a morfologia das microesferas e cacos de vidro utilizados na pesquisa. A Figura 27 retrata a análise realizada com o equipamento para as três faixas granulométricas definidas. Ressalta-se que para tal análise, foram empregadas as lentes objetivas de 5x e 10x, resultando em uma ampliação final de 50x e 100x, respectivamente.

Figura 27- Morfologia das microesferas e cacos de vidro



Fonte: Elaboração própria (2025).

Para as amostras voltadas às microesferas de vidro (Figura 27a, Figura 27c e Figura 27e), observa-se uma morfologia esférica, com contornos bem definidos. Os materiais encontram-se dentro de uma distribuição regular compreendido dentro da faixa granulométrica dada pelas peneiras. Já para os cacos de vidro (Figura 27b, Figura 27d e Figura 27f), verifica-se uma morfologia irregular, com partículas de formatos variados e contornos assimétricos. A superfície dos materiais é rugosa e os fragmentos apresentam formato pontiagudo ou laminado, com variação de comprimento e espessura. Tal característica justifica-se pelo fato de os cacos de vidro serem obtidos por meio do processo mecânico sem o controle de forma. Por outro lado, o tamanho dos cacos também está dentro da faixa granulométrica dada pelas peneiras, o que permite uma comparação no contexto das luminárias já que os cacos e as microesferas possuem morfologias diferentes, mas com tamanhos semelhantes.

## 4.2 Distribuição de Iluminância

Para a coleta da intensidade luminosa, considerando a malha radial com pontos fixos, descrito no capítulo anterior, foram coletados 48 pontos para cada amostra analisada, sendo estes distribuídos em 8 direções, cada uma com 6 pontos de leitura, espaçados entre si em 20 cm. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a amostra REF (sem tinta e sem microesferas ou cacos). Os resultados estão expressos em lux.

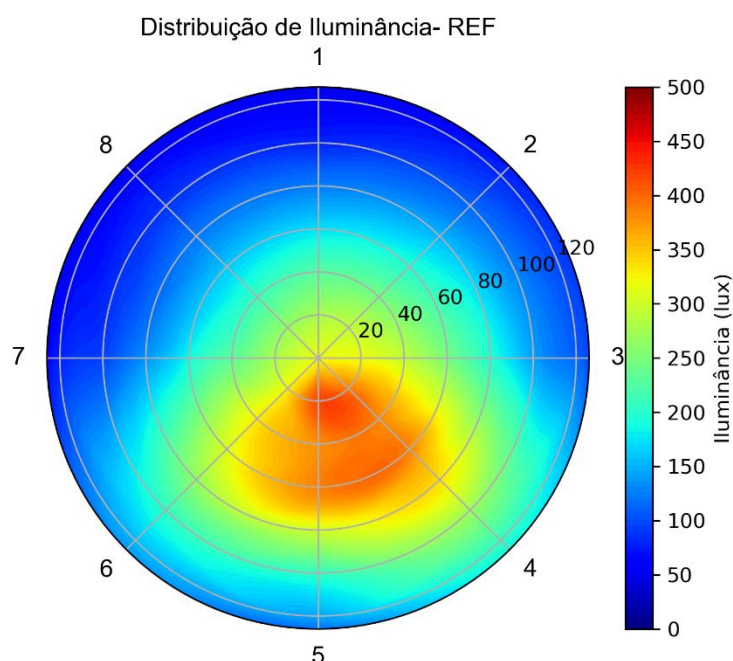
Tabela 4- Iluminância para a amostra REF considerando pontos fixos

Ponto Direção	1	2	3	4	5	6
1	274	221	164	116	73	46
2	290	241	189	143	105	75
3	317	288	240	185	131	98
4	391	381	376	326	253	188
5	415	378	382	283	186	118
6	326	329	303	251	191	138
7	276	228	177	128	92	63
8	263	204	154	115	82	59

Fonte: Elaboração própria (2025).

De posse dos dados vinculados ao conjunto original, fez-se possível a representação gráfica dos resultados, com o objetivo de facilitar a sua visualização, conforme encontra-se apresentado na Figura 28. Nela, os resultados encontram-se expressos em formato *heat map* radial, com escala fixada entre 0 e 500 lux.

Figura 28- Distribuição da iluminância- REF. A distância entre os círculos concêntricos é de 20 cm



Fonte: Elaboração própria (2025).

Por meio da visualização gráfica, nota-se uma maior iluminância na região compreendida entre as direções 4 e 6, enquanto uma menor iluminância (predominância de cores azuis e cianas) nas direções opostas. Essa característica se justifica devido ao desalinhamento da fonte luminosa em relação ao centro do refletor.

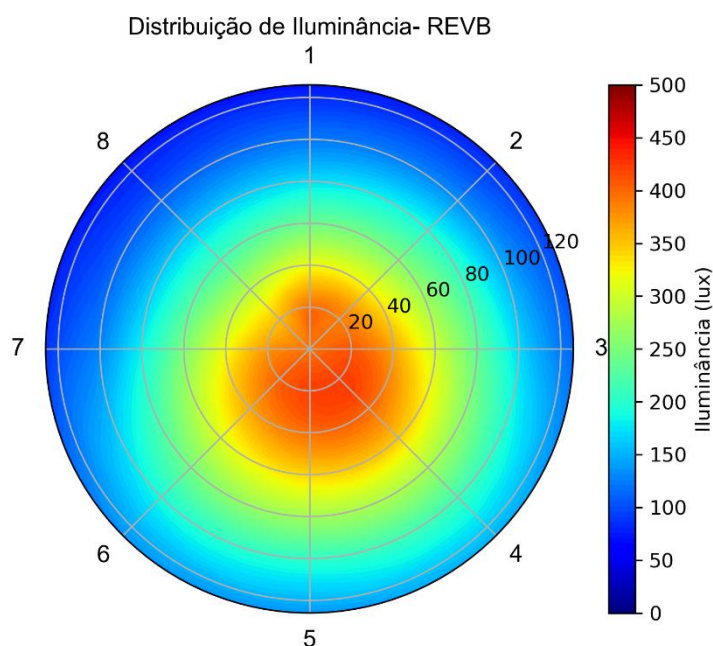
A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para a amostra REVB, que se refere a alteração da superfície interna do refletor com tinta acrílica branca, considerando o mesmo cenário anterior e a Figura 29 correspondente *heat map* radial.

Tabela 5- Iluminância para a amostra REVB considerando pontos fixos

Ponto Direção	1	2	3	4	5	6
1	391	308	228	160	112	72
2	387	318	244	180	122	82
3	407	359	290	219	156	111
4	422	395	335	263	199	150
5	420	391	331	258	188	136
6	401	360	298	234	178	134
7	371	312	239	171	121	87
8	352	279	207	148	101	71

Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 29- Distribuição da iluminância- REVB



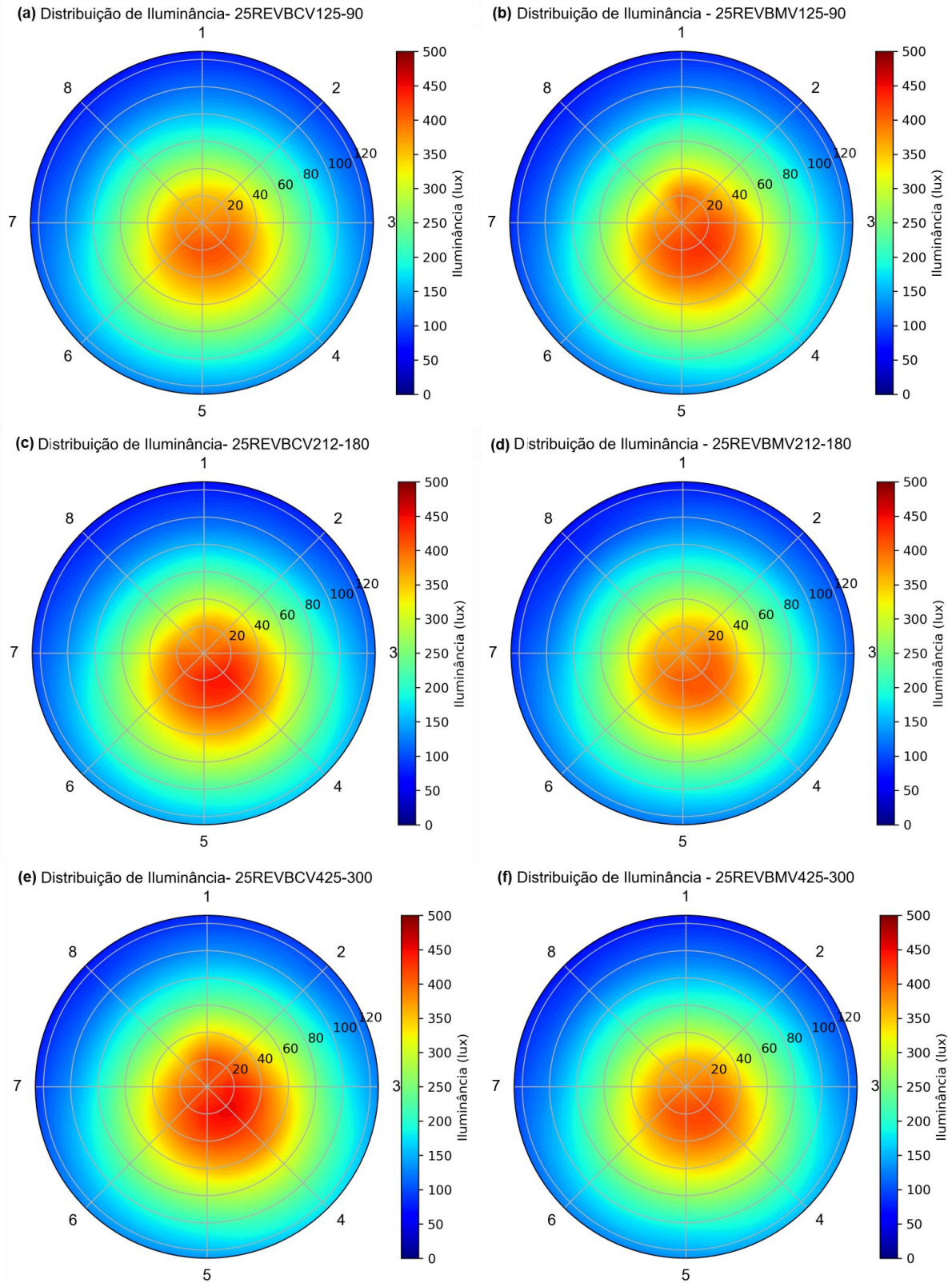
Fonte: Elaboração própria (2025).

Enquanto inicialmente, em REF, a superfície interna apresentava uma reflexão especular da luz, o simples revestimento da superfície metálica com tinta acrílica branca inseriu irregularidades na superfície, devido a própria pintura, passando de uma reflexão especular para uma reflexão com um certo grau difuso. Pensando do

ponto de vista de distribuição de luz projetada em torno do centro, observa-se que o revestimento da superfície interna interveio positivamente neste sentido, atuando como um mecanismo de distribuição mais uniforme de luz em todas as direções (padrão mais isotrópico), quando comparado com a referência. Ainda neste sentido, nota-se que a região compreendida entre as direções 7, 8 e 1 teve um acréscimo na iluminância para o ponto mais extremo (círculo concêntrico 6, localizado a 120 cm do centro projetado da luminária) de 38%, 20% e 56%, respectivamente, quando comparada com a referência. Além disso, tomando um valor médio global das medidas, observa-se um aumento percentual de iluminância média de 14% com a simples inserção da tinta, quando comparado com a referência.

A distribuição de iluminância foi avaliada da mesma forma, considerando a incorporação das microesferas e cacos de vidro com diferentes densidades e faixas granulométricas. Os anexos A e B apresentam os resultados numéricos obtidos para todas as demais amostras. A Figura 30 apresenta os resultados em formato *heatmap* para as amostras com cacos de vidro ((a), (c) e (e)) e microesferas ((b), (d) e (f)) aspergidas sobre a tinta, considerando uma densidade fixa de 25 g/m<sup>2</sup> e variando a faixa granulométrica, conforme mostrado na descrição das imagens. Em detalhes, nas imagens (a) e (b) da Figura 30, a granulométrica está compreendida entre 90 µm e 125 µm; nas imagens (c) e (d), a granulométrica está compreendida entre 180 e 212 µm; nas imagens (e) e (f), a granulométrica está compreendida entre 300 µm e 425 µm.

Figura 30- Distribuição da iluminância considerando a inserção de 25 g/m<sup>2</sup> de cacos e microesferas de vidro, com faixas granulométricas respectivamente de: (a) e (b) 90  $\mu\text{m}$  e 125  $\mu\text{m}$ , (c) e (d) 180 e 212  $\mu\text{m}$  e (e) e (f) 300 e 425  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaboração própria (2025).

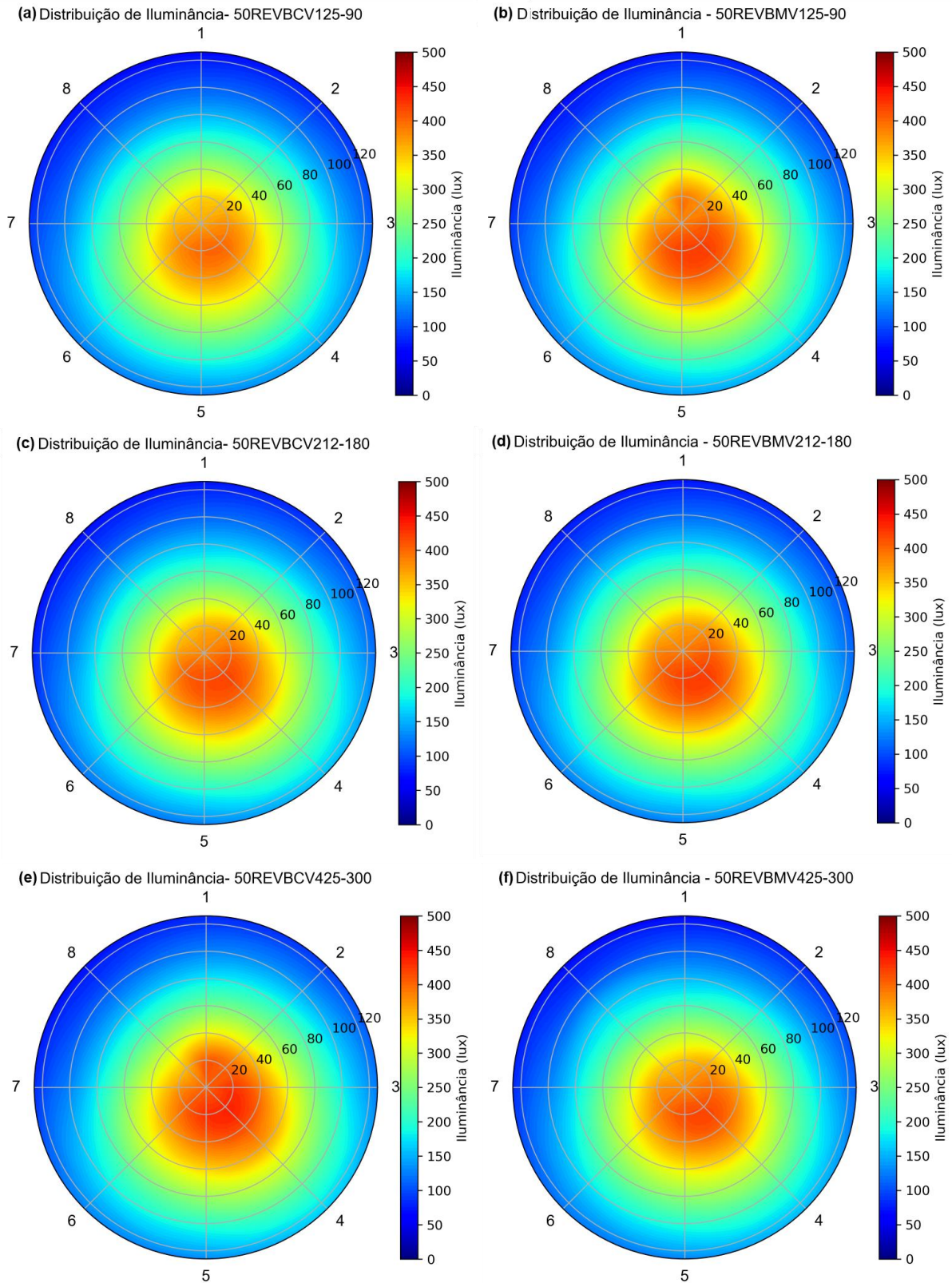
De forma geral, quando comparado com a referência, a distribuição de iluminância em torno do centro, para todas as amostras representadas pelos *heat maps* da Figura 30, foi mais uniforme em todas as direções (mais isotrópica). Do ponto de vista de iluminância global, também foi observado um aumento percentual de iluminância média para todas as amostras quando comparado com a referência, com aumento percentual mínimo de 8% para a amostra 25REVBMV212-180 (que registrou uma iluminância média global de 231 lux) e máximo de 20% para a amostra 25REVBCV425-300 (que registrou iluminância média de 256 lux).

Quando comparadas com a amostra REVB, constatou-se que a iluminância média global apresenta um desempenho variado: a maioria das amostras demonstrou uma perda de iluminância, com percentuais variando entre 5,2% e 2,9% para as amostras 25REVBMV212-180 e 25REVBMV425-300 respectivamente. Ademais, constatou-se que a amostra 25REVBCV425-300 teve o melhor desempenho, alcançando um ganho de 5,2%.

Ademais, considerando o tipo de material, constatou-se que as amostras empregando cacos de vidro promoveram uma média global de iluminância levemente superior, em comparação com as amostras contendo microesferas de vidro: enquanto as amostras com cacos promoveram uma média global de 245 lux, as amostras com microesferas promoveram uma média global de 237 lux, resultando em um ganho de 3,2%. Ainda, nota-se que as amostras com cacos de vidro promoveram transições de iluminâncias de maneira mais abrupta e direcional, com uma dispersão menos uniforme, possivelmente ocasionado pela geometria irregular do material. Em contrapartida, as amostras contendo microesferas de vidro promoveram uma distribuição mais isotrópica da iluminância.

Sequencialmente, encontram-se apresentados os resultados obtidos considerando a densidade de aplicação dos materiais de 50 g/m<sup>2</sup>. Para isso, a Figura 31 apresenta os resultados para as amostras com cacos de vidro ((a), (c) e (e)) e microesferas ((b), (d) e (f)) aspergidas sobre a tinta. Em detalhes, nas imagens (a) e (b) da Figura 31, a granulométrica está compreendida entre 90 µm e 125 µm; nas imagens (c) e (d), a granulométrica está compreendida entre 180 e 212 µm e; nas imagens (e) e (f), a granulométrica está compreendida entre 300 µm e 425 µm.

Figura 31- Distribuição da iluminância considerando a inserção de 50 g/m<sup>2</sup> de cacos e microesferas de vidro, com faixas granulométricas respectivamente de: (a) e (b) 90  $\mu\text{m}$  e 125  $\mu\text{m}$ , (c) e (d) 180 e 212  $\mu\text{m}$  e (e) e (f) 300 e 425  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Elaboração própria (2025).

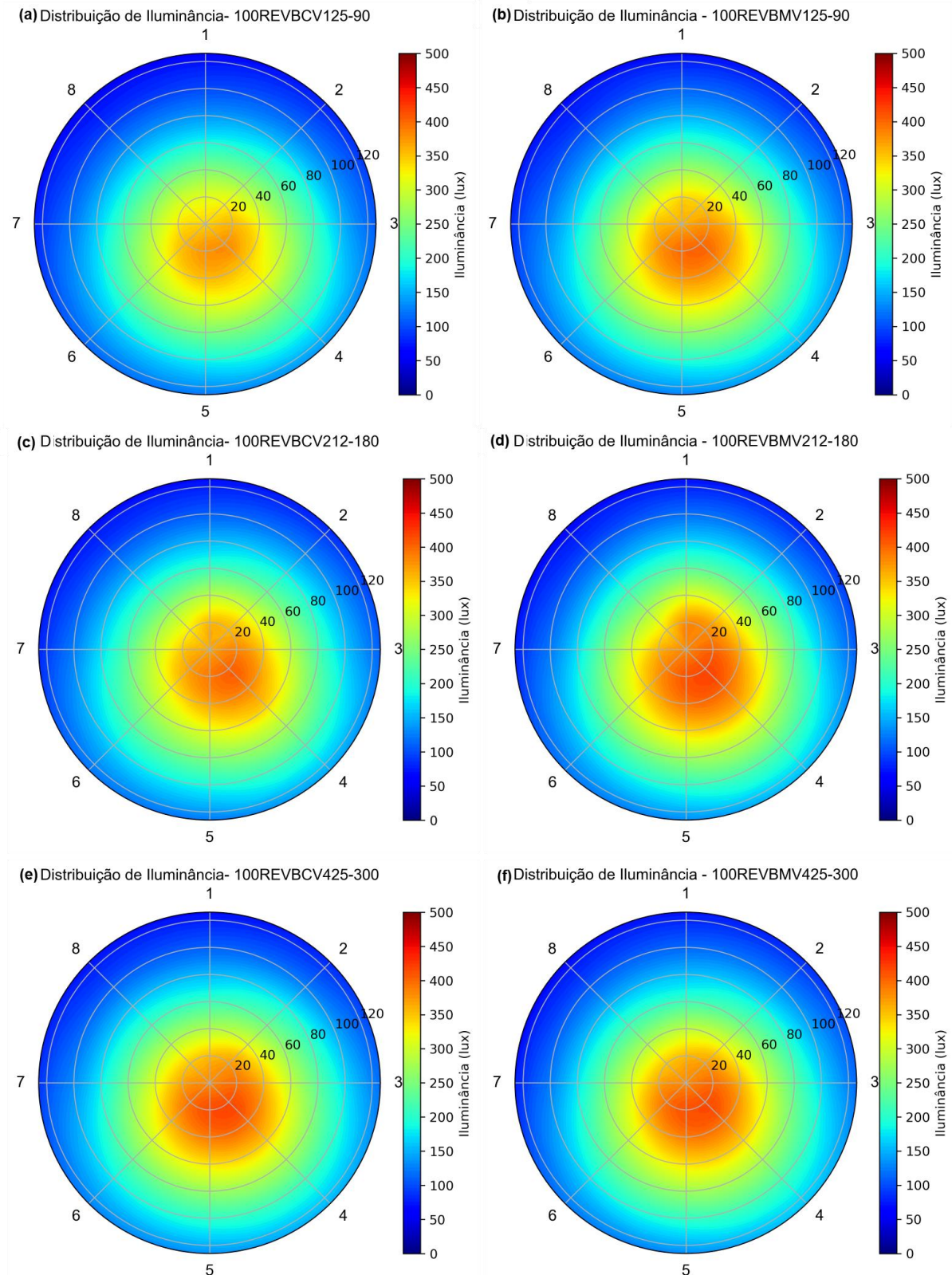
Ao empregar a densidade de 50 g/m<sup>2</sup> para aplicação dos materiais, também se notou uma distribuição mais isotrópica em torno do centro, conforme apresentados pelos *heat maps*. Quando comparado com a referência, notou-se um acréscimo da iluminância média global para todas as amostras deste grupo, com percentuais que variam desde 6% até 16,5%, que foram registrados para as amostras 50REVBCV90-125 e 50REVBCV425-300 respectivamente.

No entanto, quando comparadas com a amostra REVB, constatou-se que a iluminância média global apresentou um desempenho inferior para grande parte dos casos, com exceção da amostra 50REVBCV425-300, cuja qual apresentou um ganho de 2,1%. Para as demais amostras, foi verificada uma redução deste índice, apresentando inferioridade máxima de 7,1% para a amostra 50REVBCV90-125.

Ademais, considerando o tipo de material, constatou-se que as amostras empregando microesferas de vidro promoveram uma média global igual entre si de 238 lux. Assim, este resultado traduz que para a densidade de 50 g/m<sup>2</sup>, não houve alterações significativas entre um material ou outro: embora as imagens de *heat maps* tenham sugerido que as amostras contendo microesferas de vidro proporcionem uma distribuição mais isotrópica, o desempenho médio geral em termos de iluminância foi praticamente o mesmo.

Por fim, os resultados obtidos para a densidade de 100 g/m<sup>2</sup> estão apresentados a seguir, na Figura 32. Nela, estão ilustrados os resultados para as amostras com cacos de vidro, nas imagens (a), (c) e (e), e para aquelas com microesferas de vidro, nas imagens (b), (d) e (f). Detalhadamente, as imagens (a) e (b) correspondem à granulometria entre 90 µm e 125 µm; as imagens (c) e (d), à granulometria entre 180 µm e 212 µm; e as imagens (e) e (f), à granulometria entre 300 µm e 425 µm.

Figura 32- Distribuição da iluminância considerando a inserção de 100 g/m<sup>2</sup> de cacos e microesferas de vidro, com faixas granulométricas respectivamente de: (a) e (b) 90 µm e 125 µm, (c) e (d) 180 e 212 µm e (e) e (f) 300 e 425 µm.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Com base nos resultados obtidos para o grupo de densidade de 100 g/m<sup>2</sup>, foi possível identificar um ganho de iluminância média global em relação à amostra REF. Com exceção da amostra 100REVBCV125-90 (que registrou uma iluminância média global igual a REF), todas as demais amostras registraram ganhos, que variam desde 5,3% (amostra 100REVBMV125-90) até 10,6% (para as amostras 100REVBMV212-180 e 100REVBCV425-300).

Em comparação com a amostra REVB, todas as amostras que tiveram incorporação de microesferas e cacos na densidade de 100 g/m<sup>2</sup> apresentaram déficit de iluminância média global, com ênfase para a amostra 100REVBCV125-90 que, com média global de 213 lux, representou um decréscimo de 12,7%. Em outras palavras, verificou-se que a alta densidade de materiais não foi suficiente para um ganho de iluminância.

Em relação ao tipo de material, notou-se um leve acréscimo de média global para as amostras contendo microesferas vítreas: enquanto as amostras que continham cacos de vidro apresentaram uma média global de 225 lux, as amostras com microesferas apresentaram o valor de 232 lux, representando assim o acréscimo de 3%.

Ao analisar visualmente a Figura 32, nota-se um predomínio de concentração e iluminância no ponto central. Entretanto, nota-se que as imagens referentes às amostras com microesferas apresentaram um padrão de distribuição mais homogêneo em torno do centro da luminária, quando comparadas às amostras contendo cacos de vidro. Assim, essa interpretação visual se sobrepõe a análise quantitativa, que mostrou uma média global superior para as microesferas de vidro.

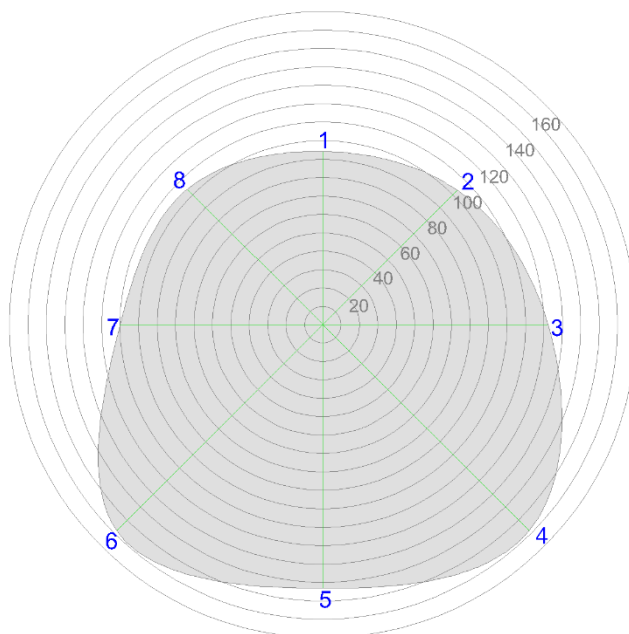
Sob um contexto geral, ao analisar a Figura 30, Figura 31 e Figura 32, nota-se que a característica dominante é a direcionalidade da luz em torno do eixo central, quando comparada com a referência. Fora isso, percebe-se que o uso de microesferas de vidro promoveu uma distribuição mais isotrópica da iluminância, com intensidade que decai de maneira mais uniforme em todas as direções. Por outro lado, o uso de cacos de vidro promoveu uma distribuição mais direcional da iluminância.

### 4.3 Área de Iluminação

A área de iluminação foi avaliada para todas as amostras (em quadruplicata). Um exemplo de área de iluminação média, referente a amostra REF, está mostrado na Figura 33. Como descrito na metodologia, o ponto de corte foi considerado para o caso em que a iluminância estivesse limitada a 100 lux. Mais em detalhes, na Figura 33 pode-se observar 8 direções radiais (as mesmas direções descritas para o caso da distribuição de iluminância), partindo do centro da lâmpada projetada na superfície (chão); também estão apresentados os círculos concêntricos, cuja funcionalidade é servir de malha de coordenadas polares, onde o centro do círculo (ponto 0,0) representa o centro do eixo do campo de medição. Os valores numéricos 20, 40,...160 indicam o valor do raio do referido círculo. Ao longo destas direções foram realizadas as medidas até a iluminância de corte.

Com o auxílio do *software* Autodesk AutoCAD, essas medidas foram redesenhadas e, com auxílio de *splines* (curvas suaves definidas por polinômios) foi realizada uma suavização entre os pontos, considerando a iluminância de corte nas direções radiais, gerando uma figura geométrica na qual pôde ser calculada a área superficial. Exemplificando para a Figura 33: a direção 1 teve seu ponto com iluminância igual a 100 lux após 94 centímetros, em média, da origem; a direção 2 teve o seu ponto de corte em 103 centímetros; a direção 3 em 122 centímetros da origem; a direção 4 após 158 centímetros da origem; e assim sucessivamente para as demais direções. Neste caso, a área iluminada média foi de 4,93 m<sup>2</sup>.

Figura 33- Área de iluminação média obtida para a amostra REF



Foi considerado a mesma metodologia para as demais amostras e a área de iluminação média para os casos com cacos e microesferas encontra-se apresentada na Tabela 6. A amostra REVB teve uma área de iluminação média igual a 5,31 m<sup>2</sup>.

Tabela 6- Área de iluminação com corte fixado em 100 lux

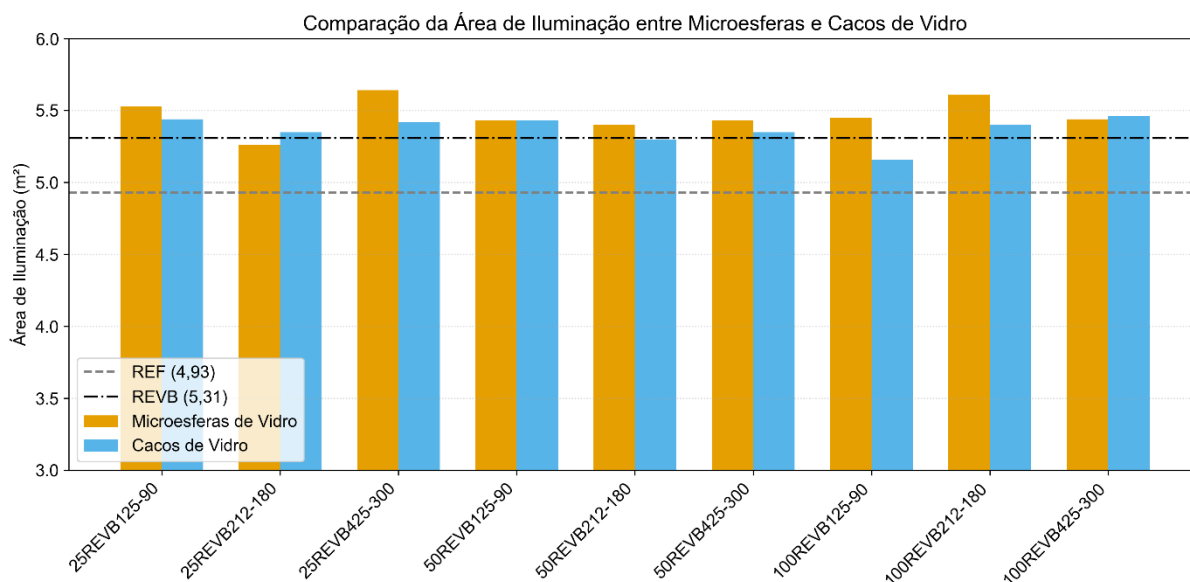
Amostra	Área de Iluminação média (m <sup>2</sup> )	
	Microesferas de Vidro	Cacos de Vidro
25REVB125-90	5,53	5,44
25REVB212-180	5,26	5,35
25REVB425-300	5,64	5,42
50REVB125-90	5,43	5,43
50REVB212-180	5,40	5,30
50REVB425-300	5,43	5,35
100REVB125-90	5,45	5,16
100REVB212-180	5,61	5,40
100REVB425-300	5,44	5,46

Fonte: Elaboração própria (2025).

Para fins de visualização e melhor compreensão, a Figura 34 apresenta os dados em formato gráfico, no qual estão evidenciadas as áreas de iluminação médias

das amostras estudadas. A linha tracejada corresponde a amostra REF enquanto a linha de traço e ponto corresponde a amostra REVB.

Figura 34- Área de iluminação



Fonte: Elaboração própria (2025).

Primeiramente pode-se observar que o simples revestimento da superfície da luminária com tinta branca já causa um aumento médio da área de iluminação, até o ponto de corte, de 7,7% quando comparada com a superfície sem revestimento. Uma possível justificativa para o aumento da área de iluminação quando a superfície é revestida por tinta branca é a capacidade desta superfície refletir mais luz quando comparada com a superfície original metálica.

No mesmo sentido, pode-se observar que todas as amostras apresentam uma área de iluminação média maior que a amostra referência (REF). Quando incorporado no revestimento as microesferas e cacos, de forma geral, para a maioria dos casos, ocorreu um aumento da área iluminada. Tomando o valor médio da área iluminada para os casos com microesferas e cacos, o aumento da área, em relação a REF, foi de 10,9% e 8,9%, respectivamente. Se comparado com a amostra REVB, o aumento do valor médio da área iluminada para os casos com microesferas e cacos foi de 2,9% e 1,1%, respectivamente. Se comparado somente os casos em que a superfície tenha sido alterada através da inserção das microesferas e cacos, observa-se um valor médio de área iluminada de 1,8% maior para o caso das microesferas em relação aos cacos. Uma possível justificativa para uma área de iluminação maior quando

incorporado cacos e microesferas, comparado com a superfície somente com revestimento, é que os cacos e microesferas podem comportar-se como centros espalhadores de luz na superfície. De forma mais específica, as que obtiveram uma melhora mais significativa foram as amostras que apresentam microesferas de vidro: as amostras com densidade de 25 g/m<sup>2</sup> e 100 g/m<sup>2</sup> e faixa granulométrica de 425µm-300µm e 212µm-180µm, respectivamente, apresentaram desempenho de 14,3% e 13,6%, quando comparadas à referência. Quando comparadas com a amostra que apresenta revestimento com tinta acrílica, constata-se uma melhoria de 6,1% e 5,5% para estas mesmas amostras. Já para as amostras que apresentaram cacos de vidro, foi constatada uma melhoria na área de iluminação, mas em valores menos expressivos que para as microesferas de vidro. As amostras mais significativas foram as que continham a densidade de 25 g/m<sup>2</sup> e 100 g/m<sup>2</sup> e faixa granulométrica de 125µm-90µm e 425µm-300µm, respectivamente. Quando comparadas com a que apresenta revestimento com tinta acrílica, constata-se uma melhoria de 2,4% para a amostra 25REVB125-90 e 2,8% para a amostra 100REVB425-300.

Para fins estatísticos, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA), objetivando avaliar a influência dos três fatores (material, densidade e faixa granulométrica), na resposta (área de iluminação). Para a análise, o fator A (tipo de material) apresentou 2 níveis; o fator B (densidade) apresentou 3 níveis e; o fator C (granulometria) apresentou 3 níveis. O número de repetições (n) foi de 4 réplicas por amostra. Assim, a Tabela 7 apresenta a síntese desta análise, na qual GL refere-se aos graus de liberdade para cada fonte; SQ corresponde a soma quadrática e; QM refere-se às médias quadráticas. As referidas equações utilizadas encontram-se apresentadas no Anexo C.

Tabela 7- Aplicação da ANOVA para o experimento

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F
<b>Material (Fator A)</b>	1	0,165	0,165	59,344
<b>Densidade (Fator B)</b>	2	0,024	0,012	4,386
<b>Granulometria (Fator C)</b>	2	0,060	0,030	10,777
<b>Material * Densidade (Interação AB)</b>	2	0,033	0,016	5,853
<b>Material * Granulometria (Interação AC)</b>	2	0,010	0,005	1,747
<b>Densidade* Granulometria (Interação BC)</b>	4	0,349	0,087	31,352
<b>Material * Densidade* Granulometria (Interação ABC)</b>	4	0,200	0,050	17,952
<b>Erro</b>	54	0,150	0,003	
<b>Total</b>	71	0,992		

Fonte: Elaboração própria (2025).

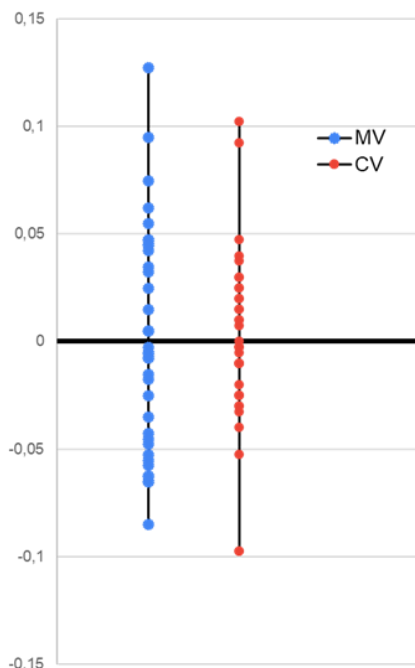
Para fins de análise estatística, foram adotados limites unilaterais da distribuição F de Fisher-Snedecor ao nível de 5% de probabilidade. De posse dos GL para cada fonte, coletou-se o respectivo F tabelado, cujo qual está apresentado abaixo:

- Material (A) —————  $f_{0,05;1;54} = 4,020$
- Densidade (B) —————  $f_{0,05;2;54} = 3,169$
- Diâmetro (C) —————  $f_{0,05;2;54} = 3,169$
- Interação AB e AC —————  $f_{0,05;2;54} = 3,169$
- Interação BC e ABC —————  $f_{0,05;4;54} = 2,543$

A partir da Análise de Variância (ANOVA), concluiu-se que, com exceção da interação entre a granulometria e o tipo de material, todos os demais efeitos, tanto individuais quanto combinados, demonstraram uma relevância estatisticamente significativa sobre a área de iluminação. Entre as fontes de variação, o tipo de material se destacou como o fator de maior representatividade, seguido pela interação entre a densidade e a granulometria (faixa granulométrica dos materiais). É crucial, ainda, ressaltar que a interação de terceira ordem entre os três fatores obteve uma alta significância, o que valida a hipótese de que a performance do sistema é determinada pela complexa interdependência entre as propriedades geométricas e materiais.

Por fim, a Figura 35 apresenta os resíduos obtidos por meio da análise estatística.

Figura 35- Gráfico dos resíduos contra o tipo de material



Fonte: Elaboração própria (2025).

A análise do gráfico de resíduos demonstra que o modelo de regressão é adequado, uma vez que a distribuição dos resíduos se apresenta de forma aleatória e simétrica em torno da linha do zero, o que atesta a homoscedasticidade (variância constante dos resíduos) e a independência dos erros. Embora se observe uma maior concentração de pontos em torno de zero, a dispersão de alguns valores extremos, especialmente acima de 0,1 e abaixo de -0,1, indica uma leve heterocedasticidade. No entanto, a ausência de um padrão definido, como uma tendência crescente ou decrescente, confirma a aleatoriedade dos resíduos, reforçando a validade do modelo proposto.

#### 4.4 Temperatura média da superfície da luminária

Como a fonte de luz utilizada neste estudo é do tipo LED, torna-se essencial considerar a temperatura como um parâmetro de avaliação. A temperatura influencia diretamente na eficiência luminosa e na vida útil do LED, podendo comprometer seu desempenho ao longo do tempo. Estudos indicam que a distribuição térmica da superfície da luminária exerce papel relevante nesse processo, podendo reduzir significativamente a durabilidade da fonte luminosa quando não bem gerenciada

(Baumgartner et al. (2015)). Em geral, quanto menor a temperatura, maior o tempo de vida da fonte. O valor médio da distribuição de temperatura da superfície da luminária (fonte + refletor) foi realizada para todas as amostras descritas no presente trabalho, seguindo a metodologia descrita no capítulo anterior. Os resultados para os casos em que a superfície foi alterada com a presença de cacos e microesferas estão mostrados na Tabela 8. Para os casos específicos REF e REVB, o valor médio da temperatura da superfície da luminária foi de 35,3°C e 32,4°C, respectivamente.

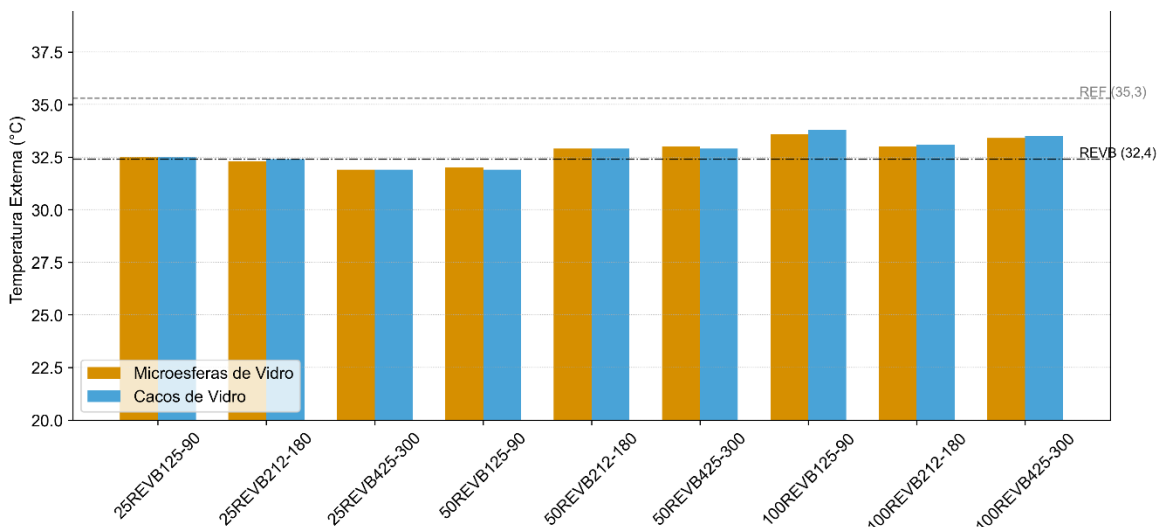
Tabela 8- Valor médio da temperatura da superfície da luminária para as superfícies sob presença de microesferas e cacos de vidro.

Amostra	Temperatura Externa (°C)	
	Microesferas de Vidro	Cacos de Vidro
25REVB125-90	32,5	32,5
25REVB212-180	32,3	32,4
25REVB425-300	31,9	31,9
50REVB125-90	32,0	31,9
50REVB212-180	32,9	32,9
50REVB425-300	33,0	32,9
100REVB125-90	33,6	33,8
100REVB212-180	33,0	33,1
100REVB425-300	33,4	33,5

Fonte: Elaboração própria (2025).

Para fins de visualização e melhor compreensão, a Figura 36 apresenta os dados em formato gráfico. A linha tracejada corresponde a amostra REF enquanto a linha de traço e ponto corresponde a amostra REVB.

Figura 36- Temperatura externa dos casos analisados



Fonte: Elaboração própria (2025).

De forma geral, a simples utilização de revestimento branco (REVB) já causa uma redução da temperatura da superfície da luminária, quando comparado com a luminária sem revestimento (REF). O decréscimo de temperatura chega a 8,2%, fazendo com que o revestimento possa vir a auxiliar no aumento da vida útil da lâmpada, quando comparado com a referência. Por outro lado, a incorporação de cacos e microesferas não alteram significativamente a temperatura da superfície da luminária, quando comparado com a luminária somente com revestimento, principalmente para os casos em que a densidade dos cacos e microesferas é menor (limitado a 50g/m<sup>2</sup>). Para densidades maiores observa-se um aumento da temperatura da superfície quando comparado com o caso em que existe somente revestimento. Ainda, novamente é possível observar que em todos os casos em que houve a mudança da superfície, a temperatura média da superfície da luminária foi inferior a referência. Isso pode ser justificado pelo fato principal em que a presença do revestimento branco sobre a superfície metálica dissipa melhor o calor, quando comparado com a superfície metálica em si.

#### 4.5 Consumo Energético

A fim de avaliar o consumo energético, a Tabela 9 mostra uma comparação para três amostras avaliadas neste trabalho: a referência (REF), a com revestimento branco (REVB) e a amostra que apresentou a maior área de iluminação, que foi a com

revestimento branco, com 25g/m<sup>2</sup> de microesferas distribuídas numa faixa granulométrica entre 300 e 425 um (25REVBMV425-300). Para a avaliação do consumo energético, foi considerado uma quantidade fixa de luminárias (10 unidades), cada uma com potência de 50W. A área iluminada por luminária foi determinada pela área de iluminação descrita anteriormente. O consumo energético é determinado aqui como sendo a relação entre a potência consumida numa área limitada ao ponto de corte de 100 lux.

Tabela 9- Consumo energético por metro quadrado iluminado

Luminária	Quantidade de Luminárias	Área total (m <sup>2</sup> )	Consumo total (W)	Consumo de potência por área (W/m <sup>2</sup> )
<b>REF</b>	10	49,3	500	10,14
<b>REVB</b>	10	53,1	500	9,42
<b>25REVBMV425-300</b>	10	56,4	500	8,87

Fonte: Elaboração própria (2025).

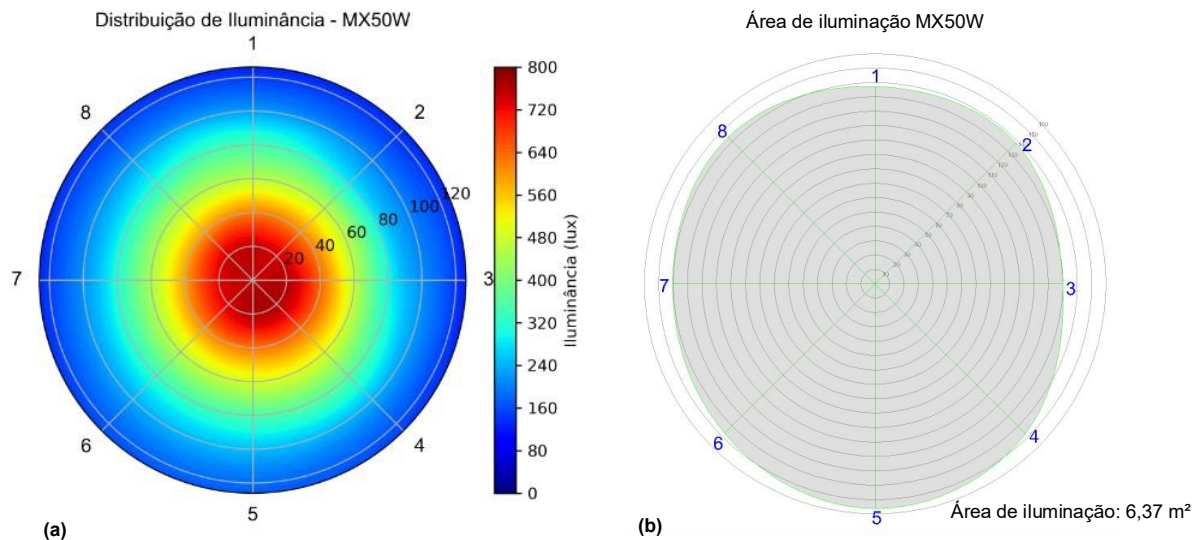
Observando os dados da Tabela 9, verifica-se uma redução progressiva na densidade de potência à medida que as luminárias modificadas são empregadas. Mais especificamente, a luminária REF apresentou o maior consumo específico, demandando 10,14 W para iluminar uma área projetada de 1m<sup>2</sup>, enquanto a proposta de intervenção envolvendo microesferas vítreas aplicadas em uma densidade de 25 g/m<sup>2</sup> demandou a menor potência por metro quadrado, 8,87 W/m<sup>2</sup>. Este resultado evidencia um ganho de eficiência energética de aproximadamente 12,5% por metro quadrado quando comparado ao modelo de referência.

#### 4.6 Comparativo entre o melhor caso e um sistema atual de iluminação

Para fins de comparação, o melhor sistema retrofit produzido neste trabalho, principalmente no que se refere a área de iluminação, foi comparado com um sistema atual de iluminação. Como fonte atual, foi considerado um refletor MX 50 watts, potência esta equivalente a potência da lâmpada de LED utilizada para os sistemas retrofit avaliados neste trabalho. A comparação foi realizada entre a amostra 25REVBMV425-300, a qual obteve o melhor efeito combinado entre iluminância, área de iluminação e consumo energético, com o refletor atual comercial. A comparação foi realizada considerando estes três parâmetros. O posicionamento do refletor foi

realizado nas mesmas condições analisadas para os sistemas *retrofit*. Na Figura 37 está representado a distribuição de iluminância e a área de iluminação para o refletor MX 50W.

Figura 37- Distribuição de Iluminância e área de iluminação - MX50W

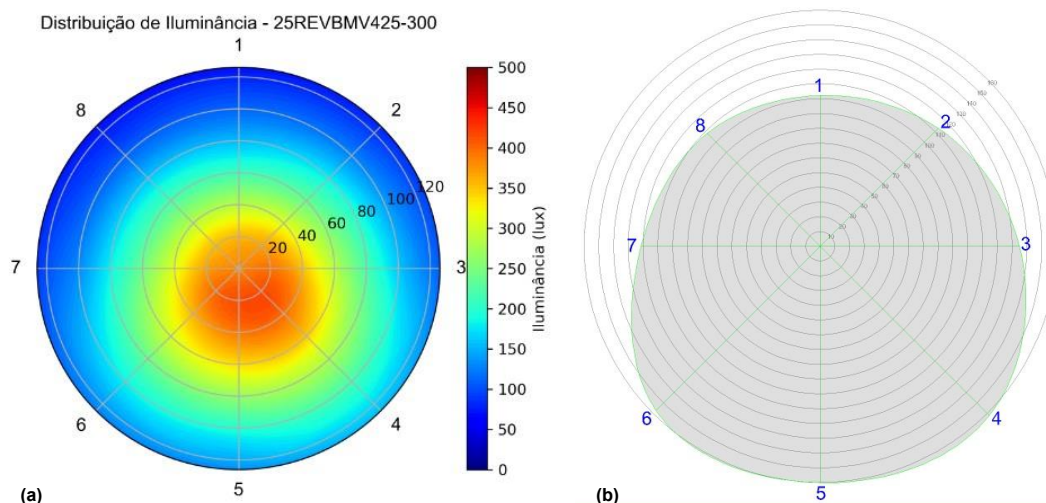


Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme pode ser observado na Figura 37(a), o refletor comercial atual apresenta uma distribuição de iluminância bem isotrópica em torno do centro geométrico projetado pela fonte no chão, com uma intensidade mais concentrada no centro (com pico de aproximadamente 800 lux), dissipando-se de maneira gradual e radial do centro para a borda. No que se refere a área de iluminação mostrada na Figura 37(b), também pode ser observado uma distribuição isotrópica com pouca assimetria, considerando o corte fixado em 100 lux. Para este refletor, a área de iluminação limitada pelo corte foi de 6,37 m<sup>2</sup>, considerando a fonte instalada a 1,20 m da superfície.

A Figura 38 mostra a distribuição de iluminância e a área de iluminação para a amostra que teve o melhor caso combinado destes dois parâmetros. Para esta amostra, conforme já mencionado, a distribuição de iluminância também se mostrou bem isotrópica com uma certa direcionalidade nas direções 3,4, 5 e 6. A área de iluminação, mostrado na Figura 38(b) foi de 5,64 m<sup>2</sup>.

Figura 38-Distribuição de iluminância e área iluminada- 25REVBMV425-300



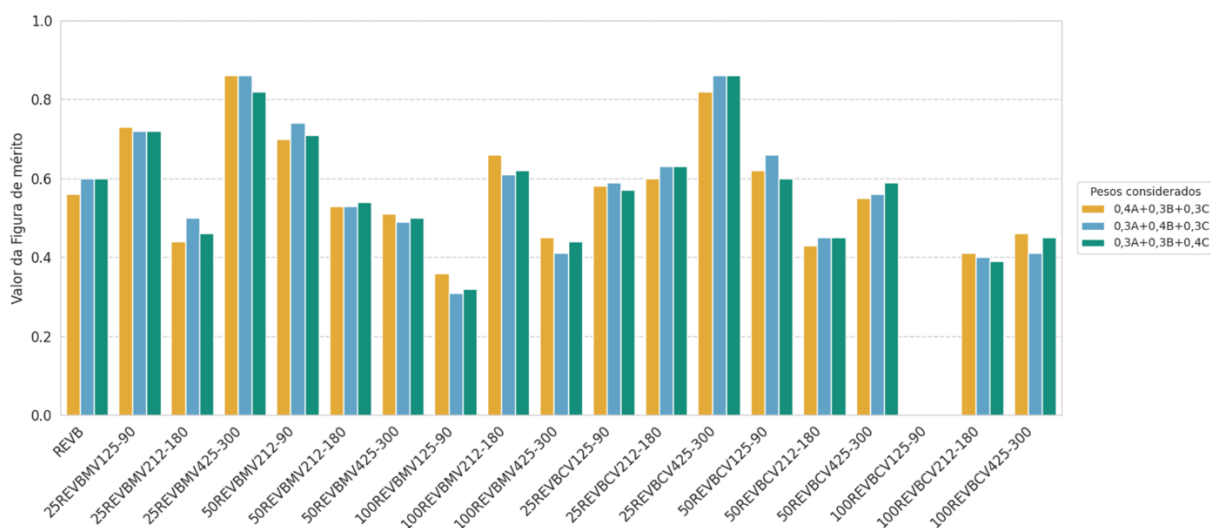
Fonte: Elaboração própria (2025).

Do ponto de vista comparativo, primeiramente pode-se observar que a distribuição de iluminância é bem mais intensa que a amostra 25REVBMV425-300 para um raio de até 80 cm, tendo um pouco mais de equilíbrio entre as iluminâncias quando o raio aumenta. Esse resultado acaba se refletindo na área de iluminação e no consumo energético. No caso da área de iluminação, o refletor avaliado tem um aumento de aproximadamente 13%, quando comparado com a amostra 25REVBMV425-300. Referente ao consumo energético, supondo uma quantidade de 10 luminárias, considerando as mesmas condições descritas no tópico anterior, as áreas iluminadas seriam de 63,7 m<sup>2</sup> para o refletor atual e 56,4 m<sup>2</sup> para a amostra 25REVBMV425-300, fazendo com que o consumo energético seja de 7,85 W/m<sup>2</sup> e 8,87 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Neste sentido existe uma economia energética de 11,5% por metro quadrado para o refletor atual, quando comparado com a amostra 25REVBMV425-300. Porém, embora as fontes mais modernas de iluminação sejam mais eficientes nos parâmetros avaliados, pequenas modificações da superfície interna do refletor fazem com que as luminárias antigas tenham uma eficiência que se aproxima das luminárias atuais, o que permite a reutilização de estruturas consideradas obsoletas, reduzindo a destinação inadequada desses materiais.

Além disso, com base na análise de múltiplos parâmetros sob diferentes ponderações, realizou-se a avaliação da robustez e o desempenho otimizado das diversas condições (A= área de iluminação; B= Temperatura superficial e C= Iluminância média global). Ao calcular a Figura de Mérito, gerada por meio dos dados

apresentados no Anexo D e ilustrados na Figura 39, com três esquemas de pesos considerados ( $0,4A+0,3B+0,3C$ ;  $0,3A+0,4B+0,3C$ ;  $0,3A+0,3B+0,4C$ ), o gráfico permite identificar qual combinação de materiais e configurações se destaca consistentemente, independentemente de pequenas variações na prioridade dos critérios (A, B e C). A variação nos pesos é crucial para determinar se um determinado produto ou método oferece um desempenho superior e estável (ou seja, valores altos e pouco dispersos entre as três barras), fundamentando a seleção da formulação mais eficiente e versátil para aplicação prática.

Figura 39- Comparação da figura de mérito entre diferentes condições e pesos de otimização



Fonte: Elaboração própria (2025).

A análise do gráfico revela padrões distintos de desempenho da Figura de Mérito entre as diferentes condições de ensaio e os esquemas de ponderação aplicados. Fica evidente que as condições 25REVBMV425-300 e 25REVBVC425-300 representam os pontos de maior otimização, atingindo consistentemente valores de Figura de Mérito superiores a 0,82 nas três séries de pesos. A baixa dispersão dos valores nessas condições demonstra a robustez dessas formulações, indicando que seu desempenho é estável mesmo com variações na prioridade dos critérios (A, B e C). Em contrapartida, a condição 100REVBVC125-90 apresenta um resultado nulo (0,00), indicando uma falha completa ou inadequação para todos os esquemas de pesos.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o impacto da modificação das superfícies internas de refletores, buscando identificar soluções que aliem desempenho óptico à racionalização do consumo energético, por meio da proposta de *retrofit*. A pesquisa fundamentou-se nos princípios da eficiência energética, da sustentabilidade e da qualidade visual, aspectos que vêm ganhando crescente relevância no contexto tecnológico e ambiental atual.

Sob um contexto geral, os dados de iluminância que foram coletados mostraram que a alteração da superfície interna dos refletores, por meio da incorporação de materiais como tinta branca, microesferas de vidro e cacos de vidro, impacta significativamente a distribuição luminosa, a área de iluminação e o consumo energético. O melhor caso, com a adição de revestimento e microesferas de vidro sólidas, resultou em uma melhora do consumo energético de aproximadamente 13% em relação a amostra de referência (sem revestimento), se aproximando mais das luminárias atuais, demonstrando que a simples alteração da superfície do refletor já fornece ganhos econômicos.

Sob o ponto de vista de temperatura dos dispositivos, notou-se que a alteração superficial interna proporcionou um menor aquecimento do conjunto, após o período de 30 minutos de atividade. Assim, os resultados indicaram que materiais com propriedades refletivas otimizadas, como as microesferas de vidro e cacos de vidro em determinadas densidades, além de contribuir para a ampliação da área iluminada, contribuem para a mitigação do aquecimento dos refletores, promovendo uma utilização mais eficiente da energia elétrica.

O estudo demonstrou que as condições 25REVBMV425-300 e 25REVBCV425-300 apresentam a Figura de Mérito mais elevada e robusta, com desempenho estável e superior a 0,82 em todos os esquemas de ponderação. Essa estabilidade indica que são as formulações mais eficientes e confiáveis, independentemente de pequenas alterações na prioridade dos critérios A, B e C. Em contraste, a formulação 100REVBCV125-90 provou ser inviável, registrando um resultado nulo (0,00) em todas as análises.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 – Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro (RJ), ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16184:2013 – Sinalização horizontal viária — Esferas e microesferas de vidro — Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASHDOWN, Ian. **The Kruithof Curve: A Pleasing Solution**. ResearchGate, no. January, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/273763550\_The\_Kruithof\_Curve\_A\_Pleasing\_Solution]. Acesso em: [07 de abril de 2025].
- Alm, E., Boland, I., Cobb, V., Eaton, E., Newcomer, M., Pajkowska, J., Perl, Y., Wallentine, L. and Zeller, A., 2005. **Workshop in applied earth system policy analysis**. In Final Workshop Report, Columbia University, New York, NY.
- BAKMAN, Igor. **Estudo de Viabilidade Financeira de um Projeto de Iluminação LED**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BATISTA, Maria Clara; DE ALCANTARA, Patrícia F.; DE CASTRO, Luiza Maia. Utilização de resíduo de vidro reciclado no setor de construção civil: Revisão. *ConResSol*, 5(22), 1-023. <https://doi.org/10.55449/conresol.5.22.1-023>, 2022.
- BAUMGARTNER, H.; RENOUX, D.; KÄRHÄ, P.; POIKONEN, T.; PULLI, T.; IKONEN, E. **Natural and accelerated ageing of LED lamps**. *Lighting Research & Technology*, v. 48, n. 8, p. 930–942, dez. 2016. DOI: 10.1177/1477153515603757.
- BERTOLO, Carlos Eduardo Keller. **Espumas produzidas com vidro reciclado e cinza de casca de arroz: avaliação para potenciais aplicações como isolante térmico em forros**. Orientadora: Chiara Valsecchi. 2025. 102p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, 2025.
- BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 17 out. 2001.
- Bergesen JD, Tähhkämö L, Gibon T and Suh S (2016). **Potential Long-Term Global Environmental Implications of Efficient Light-Source Technologies**. *Journal of Industrial Ecology*, 20, pp. 263-275.
- BOYCE, Peter R. **Human factors in lighting**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

CALOVI, Massimo; ROSSI, Stefano. **Durability and thermal behavior of functional paints formulated with recycled-glass hollow microspheres of different size.** *Materials*, v. 16, n. 7, p. 2678, 2023.

CAMPOS, Leandro Deivison; SANTOS, Gleidson Cláudio do; ROBERTO, Junia Taize Santos. **Redução no consumo de energia utilizando tecnologia LED.** *Revista Científica Semana Acadêmica*, Fortaleza, n. 000055, 07 maio 2014.

CAMELO, G; MONTEIRO, B; FALEIRO, M; LINCOLN, R; AGOSTINHO, J; OLIVEIRA, A; LEITE, L. **Luminotécnica – Eficiência Energética.** *Revista Exacta*. v.3, n. 2, p. 30 – 35, 2010.

CHENG, J. et al. **A case study of lighting retrofit to improve building energy efficiency and lighting quality by using luminaires with nano optical coating.** *Transactions Hong Kong Institution of Engineers*, v. 27, n. 4, p. 156-165, 2021.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. **Manual de Iluminação Pública.** Curitiba: COPEL, 2012.

DA SILVA, Gedieli; BUDNY, Acsiel; PEDROZO, Éder Claro. **Certificação LEED como Forma de Promover o Desenvolvimento Sustentável: Análise de Alguns Indicadores com Base no Sistema Construtivo Ecogrid®.** + *INGENIO-Revista de Ciencia Tecnología e Innovación*, v. 3, n. 2, p. 102-111, 2022.

DIAS, Luiza Schwartz. **Síntese e caracterização de sílica gel utilizando resíduo de vidro.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022

ELETROBRAS. **Manual de Iluminação Eficiente - PROCEL.** Rio de Janeiro: Eletrobras, 2011. Disponível em: [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/ee/publicacoes-e-estudos/ManualdeiluminacaoeficienteProcel.pdf]. Acesso em: [11 de março de 2025].

FOTIOS, Steve. **A revised Kruithof graph based on empirical data.** *Leukos*, v. 13, n. 1, p. 3-17, 2017.

FERRARI, B. **Uma luz no debate ambiental: a era das lâmpadas incandescentes está chegando ao fim, e as novas tecnologias que estão despontando prometem reduzir a conta de luz e o impacto no meio ambiente.** *Revista Exame*, v. 46, n. 21, p. 120, 2012.

FLEMING, Roland W.; TORRALBA, Antonio; ADELSON, Edward H. **Specular reflections and the perception of shape.** *Journal of Vision*, v. 4, n. 9, p. 798-820, 2004. DOI: 10.1167/4.9.10. Disponível em: <http://journalofvision.org/4/9/10/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

GCCE – Grupo Coordenador de Conservação de Energia Elétrica. **Quinto Plano Anual de Aplicação de Recursos: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL. 5º PAR PROCEL 2024/2025 (Outubro/2024).** Brasília, DF: GCCE, 2024.

GHISI, Enedir. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina.** Florianópolis, 1997. 246 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

GROSGES, Thomas. **Retro-reflection of glass beads for traffic road stripe paints.** *Optical Materials*, v. 30, n. 10, p. 1549-1554, 2008.

HADDAD, Jamil. **A lei de eficiência energética e os possíveis impactos nos setores produtivos.** Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

HECHT, Eugene. **Optics.** 5. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2017. ISBN 978-1-292-09693-3. Disponível em [emineter.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/04/hecht-optics-5ed.pdf](http://emineter.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/04/hecht-optics-5ed.pdf). Acesso em: 02 mar. 2025.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY (IES). ANSI/IES LM-79-19: **Approved method for optical and electrical measurements of solid-state lighting products.** New York: IES, 2019. ISBN 978-0-87995-004-0.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA (IESNA). **The IESNA Lighting Handbook.** 9th ed. New York: IESNA, 2000. 1.000 p. ISBN 0-87995-150-8.

ISO/CIE 23539:2023. **Photometry – The CIE System of Physical Photometry.** Vienna: International Commission on Illumination (CIE); Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2023. 39 p.

DE LIMA, Rafael Rodrigo Ferreira. O vidro pós-consumo como precursor da sustentabilidade da indústria vidreira. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, p. 1-6, 2023.

LIGHTING, Philips. **Lighting manual.** Phillips Lighting Company, 1981.

MAGGI, Tiago. **Estudo e implementação de uma luminária de iluminação pública à base de LEDs.** 2013. 232 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MENDONÇA, Álvaro Renato. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA. **Seminário Estudantil de Produção Acadêmica**, v. 11, n. 1, 2008.

Mux Energia. **Norma Técnica: Iluminação Pública. Versão 2.0**, dezembro de 2022. Disponível em: <https://www.muxenergia.com.br/imagens/arquivos/1692620575-Norma-Iluminacao-publica.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2025.

Ortiz SA, **O Vidro e as Embalagens de Vidro.** Campinas, Brasil: CETEA/ITAL; 522 1996.

OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático.** Osasco: OSRAM, s.d.

Oxford English Dictionary [OED], 2017. **Philippine English in the Oxford English Dictionary: Recent advancements and implications for ESL in the Philippines.** Volume 19 July 2017, p. 45.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS. **Iluminação artificial: tipos de lâmpada, sistemas e exemplos.** Goiânia: PUC Goiás, 2008. 1 apresentação em slides (formato PDF). Disponível em: [professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17663/material/aula5\\_iluminacao\\_artificial.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17663/material/aula5_iluminacao_artificial.pdf). Acesso em: 18 abr. 2025.

ROSITO, Luciano Haas. **Desenvolvimento da iluminação pública no Brasil. O Setor Elétrico,** São Paulo, ed. jan.-mar. 2009. Disponível em: [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br). Acesso em: 11 abr. 2025.

SANCHEZ JUNIOR, Oswaldo. **Ecoeficiência em iluminação pública.** 2016. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. doi:10.11606/T.106.2016.tde-14052016-124259. Acesso em: 2025-04-17.

SANDIN, Olof; NORDIN, Jan; JONSSON, Magnus. **Reflective properties of hollow microspheres in cool roof coatings.** *Journal of Coatings Technology and Research*, v. 14, n. 4, p. 817-821, 2017.

SCHWAB, Maria Selma Freitas. **Materiais de demarcação viária completa.** Belo Horizonte: DER-MG, 2018. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/files/335/Trabalhos-Academicos/2348/Materiais-de-demarcacao-viaria-completa.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2025.

SHAIKH, P. H.; SHAIKH, F.; SAHITO, A. A.; UQAILI, M. A.; UMRANI, Z. **An overview of the challenges for cost-effective and energy-efficient retrofits of the existing building stock.** In: *Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting.* Elsevier, 2017. Cap. 9, p. 257-278. DOI: 10.1016/B978-0-08-101128-7.00009-5.

SILVA, F. R.; TORRES, I. S. M.; SOUSA, F. P. F.; FERREIRA, T. V.; LUCIANO, B. A. **Análise da eficiência energética, ambiental e econômica entre lâmpadas de LED e convencionais.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 4, p. 389–396, dez. 2015. Disponível em: [www.scielo.br/j/esa/a/gZgg9y4kV5RrgK8Mv6J9YNh](http://www.scielo.br/j/esa/a/gZgg9y4kV5RrgK8Mv6J9YNh). Acesso em: 18 abr. 2025.

SIMONS, R. H.; BEAN, A. R. **Lighting Engineering: Applied Calculations.** London: Routledge, 2001.

SMADI, Omar et al. **Recommended laboratory test for predicting the initial retroreflectivity of pavement markings from glass bead quality.** *Transportation Research Record*, v. 2440, n. 1, p. 94-102, 2014.

SURRIDGE, Karen. **Application of the SEEL (SANEDI Energy Efficient Lighting Tool): Results and Experiences from the Field.** Apresentação. SANEDI, 2024

Sylvania Iluminação, **Catálogo de Produtos,** Brasil, 2020.

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

UFPR – Universidade Federal do Paraná. **TE243 – Eletricidade Aplicada II: Capítulo 3 – Luminotécnica**. Elaboração: Prof. Mateus. Curitiba: UFPR, [s.d.]. Disponível em:  
[https://www.eletrica.ufpr.br/p/\\_media/professores:mateus:te243\\_capitulo\\_3\\_-\\_luminotecnica.pdf](https://www.eletrica.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te243_capitulo_3_-_luminotecnica.pdf).

VAN BOMMEL, Wout. Luminaires. In: **Encyclopedia Of Color Science And Technology**. New York: Springer Science+Business Media, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-27851-8\_137-4.

VIENOT, Françoise; DURAND, Marie-Lucie; MAHLER, Elodie. **Kruithof's rule revisited using LED illumination**. Journal of Modern Optics, v. 56, n. 13, p. 1433-1446, 2009.

Zissis G (2016). **Energy consumption and environmental and economic impact of lighting: The current situation**. Handbook of Advanced Lighting Technology. Switzerland: Springer, Cham, pp. 1-13.

**ANEXO A**  
**DISTRIBUIÇÃO DE ILUMINÂNCIA CONSIDERANDO PONTOS FIXOS - CACOS**  
**DE VIDRO**

Ponto	REF	REVB	25REVBCV 125-90	25REVBCV 212-180	25REVBCV 425-300	50REVBCV 125-90	50REVBCV 212-180	50REVBCV 425-300	100REVBCV 125-90	100REVBCV 212-180	100REVBCV 425-300
Ponto 11	274	391	348	366	404	337	354	401	308	351	350
Ponto 12	221	308	277	282	322	271	278	312	245	277	273
Ponto 13	164	228	202	209	233	197	203	229	179	198	199
Ponto 14	116	160	147	144	169	141	148	164	128	144	144
Ponto 15	73	112	108	100	121	100	104	117	91	100	101
Ponto 16	46	72	72	67	82	66	71	80	63	68	68
Ponto 21	290	387	360	375	406	350	371	401	325	357	370
Ponto 22	241	318	298	302	339	287	306	333	266	297	304
Ponto 23	189	244	224	225	261	216	234	252	204	225	232
Ponto 24	143	180	164	165	194	159	172	187	150	167	171
Ponto 25	105	122	116	115	134	113	123	133	108	119	116
Ponto 26	75	82	81	81	96	79	87	92	77	81	81
Ponto 31	317	407	387	410	439	375	397	426	355	382	393
Ponto 32	288	359	338	363	391	329	355	379	316	339	350
Ponto 33	240	290	271	294	321	268	290	308	256	275	283
Ponto 34	185	219	202	217	239	199	219	232	197	205	216
Ponto 35	131	156	147	161	176	144	159	169	142	150	159
Ponto 36	98	111	107	114	127	106	116	122	106	108	116
Ponto 41	391	422	406	440	450	397	415	434	377	402	414
Ponto 42	381	395	378	412	421	367	395	409	346	379	390
Ponto 43	376	335	316	353	369	315	341	356	308	328	332
Ponto 44	326	263	253	281	294	249	272	286	243	261	263
Ponto 45	253	199	190	213	226	187	208	216	188	198	198
Ponto 46	188	150	140	162	171	141	155	162	138	144	151
Ponto 51	415	420	410	436	442	398	413	428	375	390	413
Ponto 52	378	391	375	406	407	368	387	392	350	362	385
Ponto 53	382	331	317	345	343	310	326	331	298	305	324
Ponto 54	283	258	245	276	263	242	250	256	234	239	252
Ponto 55	186	188	180	202	193	178	181	186	172	176	188
Ponto 56	118	136	125	148	136	124	125	130	122	122	134
Ponto 61	326	401	394	410	409	378	397	402	355	369	394
Ponto 62	329	360	351	366	366	340	352	357	316	323	351
Ponto 63	303	298	291	298	295	283	287	295	261	265	290
Ponto 64	251	234	225	239	230	218	219	222	200	210	222
Ponto 65	191	178	171	177	172	166	163	170	149	158	168
Ponto 66	138	134	127	131	130	124	120	127	112	119	126
Ponto 71	276	371	367	383	384	351	363	371	328	344	364
Ponto 72	228	312	304	312	317	294	299	309	270	285	303
Ponto 73	177	239	235	239	244	226	228	235	208	216	233
Ponto 74	128	171	169	173	175	167	161	167	151	162	169
Ponto 75	92	121	124	127	126	119	116	120	110	116	124
Ponto 76	63	87	88	89	84	86	77	83	76	79	87
Ponto 81	263	352	350	352	367	333	348	356	311	328	346
Ponto 82	204	279	279	272	290	266	277	283	244	261	276
Ponto 83	154	207	208	202	215	198	205	207	178	194	205
Ponto 84	115	148	148	141	154	142	147	146	127	139	148
Ponto 85	82	101	102	98	104	98	100	100	87	96	100
Ponto 86	59	71	70	70	71	68	68	69	62	67	70

Fonte: Elaboração própria (2025).

**ANEXO B**  
**DISTRIBUIÇÃO DE ILUMINÂNCIA CONSIDERANDO PONTOS FIXOS –**  
**MICROESFERAS DE VIDRO**

Ponto	REF	REVB	25REVBMV 125-90	25REVBMV 212-180	25REVBMV 425-300	50REVBMV 125-90	50REVBMV 212-180	50REVBMV 425-300	100REVBMV 125-90	100REVBMV 212-180	100REVBMV 425-300
Ponto 11	274	391	391	348	353	383	359	348	334	375	352
Ponto 12	221	308	304	273	278	303	282	277	261	298	280
Ponto 13	164	228	227	203	202	216	207	200	194	217	201
Ponto 14	116	160	158	146	145	154	150	145	140	154	147
Ponto 15	73	112	112	106	104	110	106	103	102	107	105
Ponto 16	46	72	75	69	70	72	71	67	67	69	72
Ponto 21	290	387	386	361	367	377	375	370	345	380	370
Ponto 22	241	318	321	300	301	310	310	303	282	313	305
Ponto 23	189	244	245	228	227	233	237	231	211	231	231
Ponto 24	143	180	184	167	168	174	173	167	157	168	169
Ponto 25	105	122	130	118	117	122	124	117	113	117	120
Ponto 26	75	82	93	82	80	85	85	80	78	79	83
Ponto 31	317	407	415	396	393	401	400	394	373	400	396
Ponto 32	288	359	373	340	346	359	354	356	335	354	353
Ponto 33	240	290	301	276	275	289	286	285	271	286	284
Ponto 34	185	219	229	205	206	213	210	213	206	212	216
Ponto 35	131	156	168	148	149	157	151	156	151	152	157
Ponto 36	98	111	121	108	108	115	110	110	110	107	114
Ponto 41	391	422	426	404	415	420	421	414	398	416	413
Ponto 42	381	395	402	385	391	398	397	394	372	394	387
Ponto 43	376	335	349	323	335	340	337	334	320	339	330
Ponto 44	326	263	279	256	266	269	266	268	255	271	263
Ponto 45	253	199	214	191	203	205	203	202	197	207	203
Ponto 46	188	150	163	141	154	152	153	153	148	154	158
Ponto 51	415	420	421	405	414	420	420	413	397	409	410
Ponto 52	378	391	392	373	386	392	391	380	369	387	383
Ponto 53	382	331	327	314	327	330	325	318	314	330	325
Ponto 54	283	258	255	242	251	261	251	248	246	256	256
Ponto 55	186	188	184	177	181	193	181	183	180	188	189
Ponto 56	118	136	130	121	132	138	125	128	127	131	131
Ponto 61	326	401	397	386	398	397	401	391	375	384	393
Ponto 62	329	360	352	343	353	352	361	346	333	344	345
Ponto 63	303	298	290	280	294	292	296	283	277	284	282
Ponto 64	251	234	222	218	225	222	228	218	212	216	219
Ponto 65	191	178	162	163	171	169	172	162	161	160	163
Ponto 66	138	134	121	121	126	128	123	120	121	120	121
Ponto 71	276	371	366	361	367	363	375	368	346	355	363
Ponto 72	228	312	303	299	305	298	307	300	284	297	299
Ponto 73	177	239	229	226	232	228	234	229	218	228	228
Ponto 74	128	171	166	163	171	171	170	163	159	160	164
Ponto 75	92	121	117	118	123	122	122	118	118	114	115
Ponto 76	63	87	80	82	89	86	84	82	82	76	75
Ponto 81	263	352	346	343	352	345	356	347	326	338	346
Ponto 82	204	279	272	270	279	270	284	276	252	268	272
Ponto 83	154	207	202	203	209	197	213	201	186	200	202
Ponto 84	115	148	141	145	148	142	153	156	133	140	143
Ponto 85	82	101	97	91	100	96	104	97	92	94	98
Ponto 86	59	71	67	68	69	66	73	67	66	64	66

Fonte: Elaboração própria (2025).

**ANEXO C**  
**TABELA DE ANOVA PARA 3 FATORES- EQUAÇÕES**

Fonte	GL	SQ	QM	Valor F
<b>Material (Fator A)</b>	a-1	$SQ_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i..}^2}{bcn} - \frac{y^2}{abcn}$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{GL}$	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
<b>Densidade (Fator B)</b>	b-1	$SQ_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j.}^2}{acn} - \frac{y^2}{abcn}$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{GL}$	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
<b>Granulometria (Fator C)</b>	c-1	$SQ_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{k..}^2}{abn} - \frac{y^2}{abcn}$	$MQ_C = \frac{SQ_C}{GL}$	$\frac{MQ_C}{MQ_E}$
<b>Material * Densidade (Interação AB)</b>	(a-1)*(b-1)	$SQ_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{cn} - \frac{y^2}{abcn} - SQ_A - SQ_B$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{GL}$	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
<b>Material * Granulometria (Interação AC)</b>	(a-1)*(c-1)	$SQ_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{ik..}^2}{bn} - \frac{y^2}{abcn} - SQ_A - SQ_C$	$MQ_{AC} = \frac{SQ_{AC}}{GL}$	$\frac{MQ_{AC}}{MQ_E}$
<b>Densidade* Granulometria (Interação BC)</b>	(b-1)*(c-1)	$SQ_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{jk..}^2}{an} - \frac{y^2}{abcn} - SQ_B - SQ_C$	$MQ_{BC} = \frac{SQ_{BC}}{GL}$	$\frac{MQ_{BC}}{MQ_E}$
<b>Material * Densidade* Granulometria (Interação ABC)</b>	(a-1)*((b-1)*(c-1))	$SQ_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{ijk..}^2}{n} - \frac{y^2}{abcn} - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC}$	$MQ_{ABC} = \frac{SQ_{ABC}}{GL}$	$\frac{MQ_{ABC}}{MQ_E}$
<b>Erro</b>	abc(n-1)	$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_C - SQ_{AB} - SQ_{AC} - SQ_{BC} - SQ_{ABC}$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{GL}$	
<b>Total</b>	abcn-1	$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk..}^2 - \frac{y^2}{abcn}$		

Fonte: Elaboração própria (2025).

**ANEXO D**  
**CONDIÇÕES E PESOS DE OTIMIZAÇÃO PARA FIGURA DE MÉRITO**

	DADOS			VALORES NORMALIZADOS- FIGURA DE MÉRITO			Condições e pesos de otimização		
	Área de Iluminação (m²)	Temperatura Superficial (°C)	Iluminância média global (lux)	Área de Iluminação (A)	Temperatura Superficial (B)	Iluminância média global (C)	0,4A+0,3B+0,3C	0,3A+0,4B+0,3C	0,3A+0,3B+0,4C
REVB	5,31	32,40	243,70	0,31	0,74	0,71	0,56	0,60	0,60
25REVBMV125-90	5,53	32,50	243,90	0,77	0,68	0,71	0,73	0,72	0,72
25REVBMV212-180	5,26	32,30	231,00	0,20	0,79	0,42	0,44	0,50	0,46
25REVBMV425-300	5,64	31,90	236,60	1,00	1,00	0,55	0,86	0,86	0,82
50REVBMV125-90	5,43	32,00	240,30	0,57	0,95	0,63	0,70	0,74	0,71
50REVBMV212-180	5,40	32,90	239,90	0,51	0,47	0,62	0,53	0,53	0,54
50REVBMV425-300	5,43	33,00	235,00	0,58	0,42	0,51	0,51	0,49	0,50
100REVBMV125-90	5,45	33,60	224,90	0,60	0,11	0,28	0,36	0,31	0,32
100REVBMV212-180	5,61	33,00	236,30	0,93	0,42	0,54	0,66	0,61	0,62
100REVBMV425-300	5,44	33,40	235,40	0,58	0,21	0,52	0,45	0,41	0,44
25REVBCV125-90	5,44	32,50	233,10	0,58	0,68	0,47	0,58	0,59	0,57
25REVBCV212-180	5,35	32,40	244,60	0,40	0,74	0,73	0,60	0,63	0,63
25REVBCV425-300	5,42	31,90	256,30	0,55	1,00	1,00	0,82	0,86	0,86
50REVBCV125-90	5,43	31,90	226,50	0,57	1,00	0,31	0,62	0,66	0,60
50REVBCV212-180	5,30	32,90	237,10	0,30	0,47	0,56	0,43	0,45	0,45
50REVBCV425-300	5,35	32,90	248,80	0,40	0,47	0,83	0,55	0,56	0,59
100REVBCV125-90	5,16	33,80	212,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100REVBCV212-180	5,40	33,10	226,70	0,51	0,37	0,32	0,41	0,40	0,39
100REVBCV425-300	5,46	33,50	236,40	0,63	0,16	0,54	0,46	0,41	0,45

Fonte: Elaboração própria (2025).