



**João Pedro
Serra Ribeiro**

**Investigação e Desenvolvimento Tecnológico de um
Farolim a ser Homologado na Indústria Automóvel**

**Investigation and Technological Development of a
Taillight to be Approved in the Automotive Industry**



**João Pedro
Serra Ribeiro**

**Investigação e Desenvolvimento Tecnológico de um
Farolim a ser Homologado na Indústria Automóvel**

**Investigation and Technological Development of a
Taillight to be Approved in the Automotive Industry**

“Luck is what happens when preparation meets opportunity.”

— Seneca



**João Pedro
Serra Ribeiro**

**Investigação e Desenvolvimento Tecnológico de um
Farolim a ser Homologado na Indústria Automóvel**

**Investigation and Technological Development of a
Taillight to be Approved in the Automotive Industry**

Relatório de Estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizado sob a orientação científica da Doutora Marta Sofia dos Anjos Ferreira, Investigadora auxiliar do i3N e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e do Supervisor empresarial Germano Oliveira, Engenheiro da Empresa SIM, S.A. .

Dedico este trabalho à minha família por todo o apoio e motivação.

o júri / the jury

presidente / president

Prof. Doutor Leonel Marques Vitorino Joaquim

Professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Doutora Ana Rita Bastos

Gestora da equipa de investigação e desenvolvimento na Tekon Eletronics

Prof. Doutor Marta Sofia dos Anjos Ferreira

Investigadora auxiliar do i3N e do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

agradecimentos / acknowledgements

Este relatório é o resultado de vários anos de trabalho, estudo e dedicação. Sempre foi o meu objetivo focar-me na área da engenharia, promovendo um estudo da física neste ramo. Deste modo, são várias as pessoas a quem tenho de agradecer. Em primeiro lugar, agradeço à minha família pelo apoio e guia durante todos esses anos. Agradeço aos membros da empresa SIM - Sociedade Irmãos Miranda, S.A., pela possibilidade de utilizar as instalações e poder realizar estágio. Por fim, agradeço a todos os meus colegas e amigos que me acompanharam durante todo o curso pela motivação nesta etapa fulcral.

Palavras-chave

Conceção, desenvolvimento, indústria automóvel, optoeletrónica.

Resumo

Este relatório de estágio provém de uma parceria estabelecida entre o Departamento de Física da Universidade de Aveiro e a empresa SIM - Sociedade Irmãos Miranda, S.A.

Esta parceria permitiu conceber e desenvolver um farolim a ser aplicado na indústria automóvel, usando LEDs como fonte luminosa.

Esta conceção do farolim centrou-se para ser aplicável em camiões e, deste modo, a análise de desenhos técnicos de farolins para camiões foi efetuada. Assim, a análise da gama de LEDs focou-se na sua caracterização ótica, recorrendo-se a espectrómetros provenientes do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Do mesmo modo, uma caracterização ótica dos materiais frequentemente usados pela SIM permitiu analisar a influência do material na propagação do feixe de luz e a interferência na colorimetria do feixe. Para tal, foi efetuada uma montagem experimental na SIM com recurso a um luxímetro.

Esta caracterização serviu de base para abordar o desenvolvimento do farolim. Com recurso ao software *LucidShape*, dividiu-se o projeto em etapas, de modo a analisar-se a propagação do feixe de luz, com o objetivo de garantir a projeção angular necessária para as funções em análise. A primeira etapa consistiu na inserção de uma malha de colimadores e na análise do foco de luz criado. A segunda etapa consistiu numa análise individual de cada função ao implementar-se diversas malhas de lentes, de modo a garantir a abrangência angular e, na última etapa, foi adicionado um polímero de saída que permitisse garantir a cor e as intensidades necessárias para homologação.

Keywords

Automotive industry, conception, development, optoelectronics.

Abstract

This internship report stems from a partnership established between the Department of Physics at the University of Aveiro and the company SIM - Sociedade Irmãos Miranda, S.A. This partnership allowed the design and development of a taillight to be used in the automotive industry, using LEDs as the light source. The design of the taillight focused on its application in trucks, and thus, the analysis of technical drawings of truck taillights was carried out. In this way, the analysis of the range of LEDs focused on their optical characterization, using spectrometers from the Department of Physics at the University of Aveiro. Similarly, an optical characterization of the materials frequently used by SIM allowed for the analysis of the material's influence on the propagation of the light beam and the interference in the beam's colorimetry. For this purpose, an experimental setup was carried out at SIM using a lux meter. This characterization served as a basis for approaching the development of the taillight. Using LucidShape software, the project was divided into stages to analyze the propagation of the light beam, aiming to ensure the necessary angular projection for the functions under analysis. The first stage consisted of inserting a collimator grid and analyzing the created light focus. The second stage involved an individual analysis of each function by implementing various lens grids to ensure angular coverage, and in the final stage, an exit polymer was added to ensure the color and the necessary intensities for homologation.

Reconhecimento do uso de ferramentas IA

Reconhecimento do uso de tecnologias e ferramentas de Inteligência Artificial (IA) generativa, softwares e outras ferramentas de apoio.

Reconheço o uso do ChatGPT 3.5 (Open AI, <https://chatgpt.com/?oai-dm=1>) para ajudar a referenciar artigos na linguagem LaTex.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Glossário	ix
1 Introdução	1
1.1 Estado de Arte	1
1.2 Motivação e Objetivos	3
1.3 Organização do Documento	5
2 Fundamentação Teórica	7
2.1 Propriedades Fotométricas	7
2.2 Processos óticos de Transmissão, Reflexão e Absorção	8
2.3 Formalismo Ótico	10
2.4 Materiais com caráter não-dispersivo	13
3 Caracterização Experimental do Farolim	15
3.1 Caracterização ótica dos Materiais	16
3.2 Propriedades eletrónicas dos leds comerciais a implementar	18
3.2.1 Análise das propriedades óticas dos LEDs	19
3.3 Testes experimentais para medição da iluminância	21
4 Conceção Tecnológica do Farolim	25
4.1 Contextualização inicial do desenvolvimento a implementar	28
4.2 Descrição das Funções implementadas	30
4.2.1 Função Nevoeiro	30
4.2.2 Função Stop/Presença	31
4.2.3 Função Marcha-Atrás	34

4.2.4	Função Pisca	36
5	Conclusão e Trabalho Futuro	41
Referências		43

Listas de Figuras

1.1	Espetro base de intensidade luminosa definido para o regulamento 148 para luzes de posição frontal, posição traseira (presença), estacionamento, delimitadores, stop e indicadores de direção. Os valores definidos no espetro representam valores em percentagem dos valores máximos e mínimos para homologação da função. Retirado de [14].	4
1.2	Espetro de intensidade luminosa para a função marcha-atrás. Os valores definidos no espetro representam valores mínimos requeridos para cumprimento da função [14]. Os pontos H-V e -5°V exigem a maior intensidade mínima de 80 cd.	4
1.3	Distribuição angular de intensidade luminosa para a função nevoeiro. Os valores definidos representam os valores mínimos de intensidade luminoso ao longo dos planos H-H e V-V (150 cd) e nos outros pontos necessários para cumprimento da função (75 cd). Retirado de [14].	5
2.1	Definição do ângulo sólido Ω . Do ponto de vista do ponto P, a superfície de raio r' forma um cone de luz com a esfera de raio r , representada por Ω . Desta forma, permitirá analisar a quantidade de radiação que chega à superfície da esfera. Adaptado de [20].	8
2.2	Processos óticos resultantes da interação de um feixe de luz com um material.	8
2.3	Processo ótico de transmissão de um feixe de radiação.	9
2.4	Processo ótico de reflexão.	9
2.5	Aproximação paraxial para a propagação de raios ópticos numa lente esférica. Adaptado de [27].	11
2.6	Representação da curva de eficiência luminosa CIE: $V(\lambda)$ associado à visão fotópica e $V'(\lambda)$ correspondente à visão escotópica. Adaptado de [28].	11
2.7	Correspondência entre curva fotópica e espetro de um Díodo Emissor Luz (LED) vermelho com $\lambda_{dom} = 629,9$ nm, $\lambda_{pico} = 637,4$ nm e largura de banda FWHM = 14,4 nm.	12
2.8	Gráfico representativo do diagrama de cores segundo o método CIE. Adaptado de [29].	13
2.9	Processos óticos numa amostra com caráter não-dispersivo.	14
3.1	Esquemático 2D do farol em desenvolvimento.	16
3.2	Materiais em análise para aplicação no farolim.	16

3.3	A análise da evolução das ondas S - figura 3.3(a) - na interface LED-Policarbonato (PC), em função do ângulo de incidência, mostra uma transmissão praticamente total, com uma taxa de reflexão baixa. Na interface PC-Polimetilmetacrilato (PMMA), em função do ângulo de transmissão, verifica-se uma transmissão praticamente total, com uma taxa de reflexão praticamente nula. A análise da evolução das ondas P - figura 3.3(b) - na interface LED-PC mostra um excelente comportamento de transmissão, com baixa taxa de reflexão. Na interface PC-PMMA a reflexão também é praticamente nula, verificando-se um excelente de transmissão face à propagação de radiação.	17
3.4	A figura 3.4(a) ilustra um Top LED, enquanto as figuras 3.4(b) e 3.4(c) ilustram PowerTop LED e PowerTop LED com cúpula.	18
3.5	Especros de transmissão de Top LEDs: 3.5(a) associado a um Top âmbar, 3.5(b) associado a um Top vermelho e 3.5(c) associado a um Top branco. As intensidades dos picos de emissão correspondem a intensidades normalizadas.	19
3.6	Especros de transmissão de PowerTop LEDs: 3.6(a) associado a um PowerTop vermelho, 3.6(b) associado a um PowerTop âmbar e 3.6(c) a ilustrar um PowerTop branco. As intensidades dos picos de emissão correspondem a picos de intensidade normalizada.	20
3.7	Especros de transmissão de PowerTop LEDs com cúpula: 3.7(a) associado a um PowerTop vermelho com cúpula e 3.7(b) associado a um PowerTop âmbar com cúpula. As intensidades dos picos de emissão correspondem a picos de intensidade normalizada.	20
3.8	Montagem experimental realizada para medição das propriedades óticas dos materiais. O luxímetro ficou à mesma altura da Placas de circuito impresso (PCB) de modo a medir o máximo de radiação perpendicularmente incidente. As distâncias não se encontram à escala.	21
3.9	Iluminância medida experimentalmente para os diferentes materiais. Os resultados evidenciam que parte da radiação emitida pelos LEDs foi absorvida, para os diferentes materiais. O PMMA é o menos refrativo dos materiais descritos, o que permite refratar menos o feixe incidente e, deste modo, abrange uma maior área, de acordo com a equação 2.3[36]. Dada a semelhança do caráter ótico de PC e Lexan (Lx), obteve-se níveis de transmitância idênticos exceto para o LED branco, em que há uma discrepância de aproximadamente 10%. A intensidade medida I_0 foi mais alta para o LED âmbar, seguida do LED branco, o que permitiu ter níveis de iluminância mais altos.	22
3.10	Especros de transmissão na figura 3.10(a) para Top LEDs vermelho e na figura 3.10(b) para PowerTop LEDs vermelho com cúpula, enquanto a figura 3.10(c) está associada a Top LEDs branco, para uma cor branca do material em análise. As intensidades dos picos de emissão observadas encontram-se normalizadas.	23
3.11	Especros de transmissão para Top LEDs branco com a cor vermelha do material em 3.11(a) e com a cor amarela em 3.11(b). As intensidades de pico observadas correspondem a picos de emissão de intensidade normalizada.	23

4.1	Esquema ilustrativo do farolim em desenvolvimento. Em termos de indústria, vidro interior corresponde à rede de colimadores a implementar e vidro exterior corresponde ao conjunto de malha de lentes + polímero de saída. O refletor é fornecido por empresa externa.	25
4.2	Processo de aproximar o LED a uma lente ao diminuir-se a distância (focal). Retirado de [37].	26
4.3	Este design ótico do colimador permite, por definição do <i>center spread</i> , considerar que os raios ópticos estão centrados na origem e a parametrização <i>reflector spread</i> (30° , -30°) projetar angularmente a luz nesses ângulos. O plano frontal é constituído por um conjunto de planos convexo e frontal que permite direcionar a luz criando um foco de luz. Retirado de [41].	27
4.4	Figura 4.4(a) ilustra uma geometria 3D de uma lente por Superfície de procedimento (PS) constituída por 8 faces em cada eixo, com <i>spread</i> a $\pm 20^\circ$ na componente horizontal e $\pm 15^\circ$ na componente vertical, enquanto a figura 4.4(b) ilustra a evolução da lente pelo <i>spread</i> definido segundo o eixo horizontal. Retirado de [42].	27
4.5	Fluxograma representativo da análise efetuada para a conceção do farolim.	28
4.6	Simulação em <i>LucidShape</i> a representar a distribuição luminosa para a função Stop com uma lente convencional 4x2 mm com uso de Top leds.	28
4.7	A figura 4.7(a) ilustra a radiação de saída proveniente de uma rede de colimadores com parametrização $(-10,10)^\circ$ e ângulo de linha 10° , mas pretendia-se uma maior concentração de luz. Para tal, diminuíram-se os parâmetros, concebendo-se uma malha de colimadores com parametrização $(-5,5)^\circ$ e ângulo de linha 5° . A homogeneidade de distribuição pretendida é ilustrada na figura 4.7(b) com ilustração dos pontos requeridos para a função nevoeiro [13].	29
4.8	Figura 4.8(a) ilustra a distribuição luminosa para a função Stop para uma malha de lentes 4x2 mm, com uma malha de colimadores adicionada no sistema ótico e a figura 4.8(b) ilustra a distribuição luminosa nas mesmas condições da simulação anterior com uma lente 1.31x1 mm.	29
4.9	Distribuição luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho. O gráfico ilustra um espetro simétrico e homogéneo.	30
4.10	Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho. A intensidade luminosa medida no ponto H-V cumpre o estipulado.	30
4.11	Gráfico de distribuição luminosa para uma PCB de Top LEDs vermelho. É verificada uma distribuição luminosa bastante simétrica, no entanto a radiação encontra-se focada no plano central, não alcançando os ângulos a $\pm 10^\circ$ U e $\pm 5^\circ$ V essenciais para cumprimento do regulamento 148 [14].	31
4.12	Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de Top LEDs vermelho [14]. Valores a vermelho representam intensidades luminosas abaixo do valor mínimo, enquanto valores a azul representam valores acima do requerido como é caso do ponto H-V.	31

4.13 Distribuição luminosa para a função Stop tendo como fonte luminosa uma PCB com Top LEDs vermelho. O gráfico ilustra uma distribuição luminosa homogénea. Ao centro, o valor centra-se na gama de valores definida.	32
4.14 Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de Top LEDs vermelho.	32
4.15 Gráfico de distribuição luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho com cúpula. Proveniente da menor distribuição angular dos LEDs, a partir dos $\pm 30^\circ$ U a radiação apresenta distribuição de luz residual.	33
4.16 Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho com cúpula. No ponto H-V, a intensidade luminosa simulada é de 62 cd sendo ligeiramente superior ao mínimo requerido. Valores sinalizados a vermelho correspondem a intensidades inferiores ao mínimo estipulado.	33
4.17 Distribuição luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs branco. O espetro de luz mostra um espetro característico da função, graças ao <i>spread</i> horizontal, que permitiu projetar luz até $\pm 45^\circ$ U. O <i>spread</i> vertical permitiu compactar a luz até ao plano $\pm 10^\circ$	34
4.18 Espetro de intensidade luminosa simulado para uma PCB de PowerTop LEDs branco, segundo o regulamento 148 [14]. A função cumpre em todos os pontos do espetro.	35
4.19 Distribuição luminosa da função Marcha-atrás para uma PCB de Top LEDs branco. Gráfico com distribuição homogénea de luz.	35
4.20 Espetro de intensidade luminosa para a função Marcha-Atrás para uma PCB com Top LEDs branco. Valores a vermelho ilustram pontos requeridos para homologação abaixo do valor mínimo.	36
4.21 Distribuição luminosa para a função Pisca com uma PCB de PowerTop LEDs âmbar. A distribuição luminosa concentra-se em $\pm 30^\circ$ U e $\pm 15^\circ$ V. A 80° , os valores requeridos são residuais, analisando-se somente o espetro de intensidade luminosa segundo o regulamento 148.	37
4.22 Espetro de intensidade luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs âmbar cumprindo o regulamento 148 [14]. No ponto H-V, cumpre-se confortavelmente o exigido e a 80° os valores são superiores a 0,3 cd, cumprindo o regulamento [14].	37
4.23 Distribuição luminosa para uma PCB com Top LEDs âmbar. Embora a distribuição esteja mais homogénea no espetro, no plano central não são verificadas as intensidades luminosas mínimas. Esta diminuição face à distribuição luminosa anterior (figura 4.21) provém de um fluxo luminoso, usado em simulação, menor.	38
4.24 Espetro obtido para o sistema ótico com uma PCB de Top LEDs âmbar. No plano central, observam-se pontos de intensidade inferiores ao mínimo requerido para o regulamento 148 [14].	39

Lista de Tabelas

1.1	Evolução da iluminação na indústria automóvel. Adaptada de [2].	2
1.2	Propriedades óticas dos materiais atualmente em uso pela empresa segundo fichas técnicas de fornecedores.	5
3.1	Fluxo luminoso dos LEDs.	18
3.2	Abertura angular dos LEDs.	18
3.3	Gama de LEDs a ser analisada.	18
3.4	Propriedades óticas da gama de LEDs a analisar.	20
3.5	Medição da transmissão (t) para os materiais em análise.	22
3.6	Análise da influência da cor do material nas propriedades óticas de radiação.	22

Glossário

PMMA	Polimetilmetacrilato	CIE	Comissão Internacional de Iluminação
PC	Policarbonato	MF	Macro focal
Lx	Lexan	PS	Superfície de procedimento
LED	Díodos Emissores de Luz	HID	Lâmpadas difusoras de gás
PCB	Placas de circuito impresso	LSD	Dispositivos de sinalização luminosa
LED	Díodo Emissor Luz	RID	Dispositivos de sinalização rodoviária
UNECE	Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa	RRD	Dispositivos retro-refletores

Introdução

O relatório de estágio realizado em ambiente empresarial provém de uma parceria estabelecida entre o Departamento de Física da Universidade de Aveiro e a empresa SIM - Sociedade Irmãos Miranda, S.A., sediada em Águeda. A empresa SIM, fundada em 1946, afirma-se no mercado como uma referência na iluminação e refletorização automóvel, focando-se desde a conceção, desenvolvimento, produção de moldes, ensaios em software e testes fotométricos até à produção de cada componente e montagem final. Produz uma gama diversificada de faróis, farolins, projetores e refletores com lâmpadas ou LEDs para camiões, semi-trailers, automóveis, ciclomotores e motos, máquinas agrícolas e industriais. Alia mais de 75 anos de experiência comercializando produtos através de uma rede de distribuição instalada em mais de 50 países, tanto no primeiro equipamento como no *After-Market*. A evolução tecnológica e o perfeito conhecimento dos mercados permitiram à empresa SIM crescer de forma gradual e sustentada, dotando-se de equipamentos modernos e eficazes que permitem aumentar o valor do produto e reduzir os seus custos. Adotou uma política de crescimento sustentado, investindo em tecnologia de ponta, elevados padrões de qualidade e respeito pelo ambiente, assim como na especialização dos seus recursos humanos. A empresa centra o seu mercado maioritariamente na exportação de produtos, tendo em simultâneo produtos seus no mercado nacional e internacional [1].

1.1 ESTADO DE ARTE

A empresa SIM tem como foco a iluminação automóvel e, para tal, nesta secção efetuase uma contextualização histórica de fontes luminosas e a sua aplicabilidade na indústria automóvel.

As primeiras formas de iluminar datam anteriormente a 1920. As velas surgiram como o primeiro mecanismo de fonte luminosa quer para aquecimento quer para iluminação. Mas, já antes desta data, se verificava o uso de fontes luminosas em veículos a motor, ao implementar-se luzes de gás em carruagens puxadas a cavalo [2]. Em 1908, fontes de radiação por indução a dínamo possibilitaram a inserção de fontes de luz elétricas no mercado de iluminação. Em

1920, há a incorporação de lâmpadas de duplo filamento e, já na década de 1930, os primeiros sistemas ópticos de iluminação de projeção começaram a ser desenvolvidos. Em 1936, são envolvidas na indústria de iluminação lâmpadas de incandescência baseadas em filamentos de tungsténio e, em 1950, são incorporadas as primeiras regulações para a iluminação do setor automóvel [2, 3]. Em 1960, há um enorme passo de desenvolvimento na área da iluminação: são incorporadas no mercado lâmpadas a halogéneo [4]. Esta incorporação no mercado permitiu que os filamentos brilhassem e durassem mais [3] sendo, segundo [2], alimentadas a uma tensão máxima de 12 V. Na década de 80, há incorporação de um farol aerodinâmico no mercado, ao invés da lâmpada convencional refletora que produzia um feixe compacto, ou seja, um feixe incidente altamente concentrado sem grande abrangência angular [2]. Já na década de 90, data-se a introdução de fontes luminosas difusoras de gás, Lâmpadas difusoras de gás (HID) (proveniente do termo inglês, *high intensity discharge*) - frequentemente usadas com xénon -, incorporaram feixes de luz mais concentrados, com maior temperatura de cor, maior dureza mecânica e uma maior duração de vida da lâmpada comparativamente às lâmpadas de filamento de tungsténio [2, 3, 5]. No entanto, este tipo de lâmpadas necessitava de uma elevada tensão de alimentação, implicando um custo elevado face à demanda pretendida, sendo mais tarde excluídas do mercado [3]. Na primeira década do século XXI, analisa-se o design para iluminação noturna em veículos, assim como a possibilidade de incorporar luzes dinâmicas presentes nos faróis que iluminem as bermas da estrada. Sem qualquer afirmação no mercado e face ao uso recorrente de lâmpadas de halogéneo, que sobreaqueciam e apresentavam um curto tempo de vida [6], o desenvolvimento tecnológico assegurou a implementação do LED (do termo inglês, *light emitting diode*) na iluminação automóvel, graças às inúmeras vantagens destes emissores nomeadamente a resistência à vibração mecânica, eficiência energética e duração do tempo de vida, rápida resposta e flexibilidade no design relativamente às lâmpadas convencionais, permitindo um maior controlo do fluxo de radiação incidente. Atualmente, encontram-se presentes em mais de 95% das fontes luminosas de funções da indústria automóvel [7, 3, 8, 9]. Estudos mais recentes analisam a possibilidade de incorporar tecnologia laser na iluminação automóvel [6].

Tabela 1.1: Evolução da iluminação na indústria automóvel. Adaptada de [2].

Ano	Evento
1908	Implementação de lâmpadas elétricas (dínamo, faróis, chapa de matrícula e lateral)
1915	Introdução de farolins com cor vermelha e luzes de travão amarelas
1919	Introdução de feixes de cruzamento contra o brilho
1925	Introdução das primeiras lâmpadas a duplo filamento para luzes de cruzamento e máximos
1936	Introdução às lâmpadas de incandescência de feixe selado
1940	Incorporação na função Pisca dianteira e traseira do modo intermitente com cancelamento automático
1945	Incorporação de faróis no corpo do veículo
1960	Introdução das primeiras lâmpadas a halogéneo na Europa
1979	Introdução das primeiras lâmpadas a halogéneo de feixe selado nos EUA
1991	Introdução da lâmpada de gás difusor (xénon) na Europa
1993	Introdução de um farolim a Leds
2003	Introdução das primeiras luzes de cruzamento orientáveis

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

De uma perspetiva pessoal, não poderia surgir melhor oportunidade do que abraçar um projeto relacionado com a temática da ótica. Sempre me intrigou. O facto de realizar estágio nesta área e analisar todo o processo ótico de investigação, conceção e desenvolvimento tecnológico foi certamente a maior motivação.

Este projeto centra-se no desenvolvimento de um farolim com fonte luminosa de LEDs, dado o objetivo da empresa em ir progressivamente incorporando modelos híbridos de farolins (constituído por fontes luminosas de lâmpadas e LEDs) ou, já numa perspetiva mais futura, modelos totalmente alimentados a LEDs. Este desenvolvimento tem como objetivo apenas a utilização de LEDs, como fonte luminosa, e o desenvolvimento de um farolim com vista à homologação segundo normas dos regulamentos da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) (proveniente do inglês, *United Nations Economic Commission for Europe*), estando na base da iluminação automóvel os regulamentos atualmente em vigor descritos abaixo:

1. regulamento 148 para Dispositivos de sinalização luminosa (LSD) (proveniente do inglês, *Light Signalling Devices*) compacta as normas estabelecidas para os regulamentos 6 [10],7 [11],23 [12],38 [13], previamente estabelecidos, para as funções pisca, stop/presença, marcha-atrás e nevoeiro a implementar no farolim [14];
2. regulamento 149 para Dispositivos de sinalização rodoviária (RID) (proveniente do inglês, *Road Signalling Devices*)[15];
3. regulamento 150 para Dispositivos retro-refletores (RRD)(proveniente do inglês, *Retro-Reflective Devices*)[16].

Em termos de farolim, este é constituído por cinco funções: nevoeiro, presença, stop, pisca e marcha-atrás. Os regulamentos UNECE estabelecem, do ponto de vista ótico, a cor de emissão de saída, a distribuição luminosa e os pontos de intensidade luminosa necessários para homologação da função. Segundo o regulamento 148, o espetro de distribuição luminosa definido para luzes de posição frontal, posição traseira (presença), estacionamento, delimitadores, stop e indicadores de direção é ilustrado pela figura 1.1[14].

Nas funções stop/presença, o espetro de intensidade luminosa é idêntico: a função stop requer uma intensidade luminosa máxima de 260 cd no ponto H-V, enquanto a função presença requer uma intensidade luminosa máxima de 17 cd ao centro. O espetro base ilustrado pela figura 1.1 é adaptado para uma projeção angular horizontal a 45° e verticalmente a 15°. Para ser homologada, o requerimento exige cor vermelha na radiação de saída [14].

Na função pisca, o espetro da figura 1.1 é adaptado para uma abrangência horizontal a 80° e verticalmente a 15°, sendo requerida uma intensidade luminosa máxima de 500 cd no ponto H-V [14]. Esta adaptação da projeção angular vertical provém da função ser uma função de sinalização. O requerimento exige para a função ser homologada a cor âmbar na radiação de saída [14].

Na função marcha-atrás, o espetro de intensidade luminosa é muito característico. Requer uma distribuição angular horizontal a 45° e, verticalmente, uma projeção angular de -5° a 10°. A figura 1.2 ilustra o espetro de intensidade luminosa para a função [14].

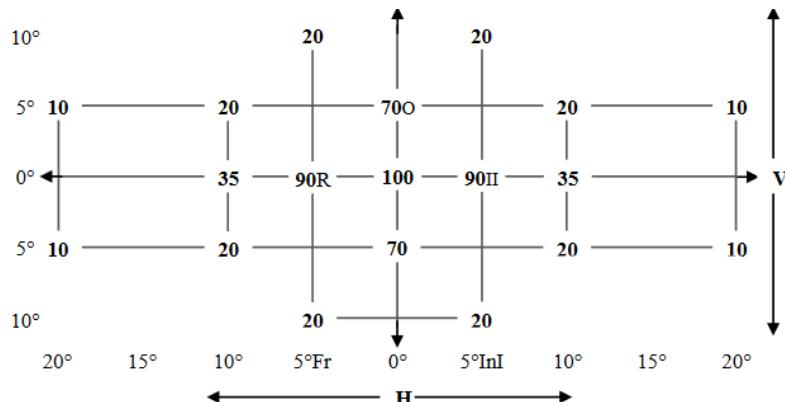


Figura 1.1: Espetro base de intensidade luminosa definido para o regulamento 148 para luzes de posição frontal, posição traseira (presença), estacionamento, delimitadores, stop e indicadores de direção. Os valores definidos no espetro representam valores em percentagem dos valores máximos e mínimos para homologação da função. Retirado de [14].

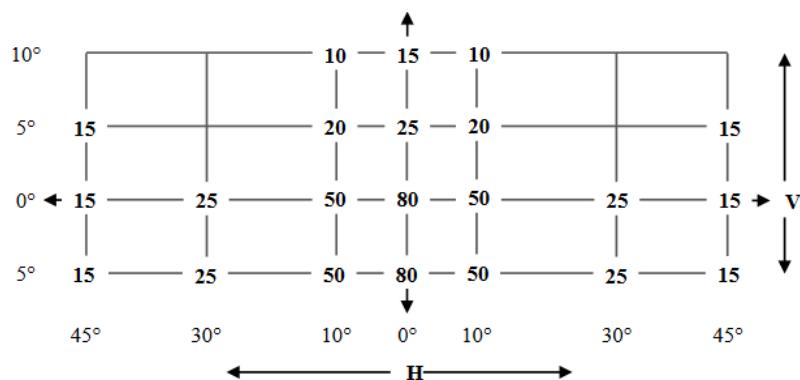


Figura 1.2: Espetro de intensidade luminosa para a função marcha-atrás. Os valores definidos no espetro representam valores mínimos requeridos para cumprimento da função [14]. Os pontos H-V e -5°V exigem a maior intensidade mínima de 80 cd.

A função marcha-trás requer que a intensidade no ponto H-V não deve ser inferior a 80 cd. Requer também que, acima do plano H-H, a intensidade luminosa não exceda as 300 cd e, entre o plano H-H e -5°V, não exceda as 600 cd. O regulamento 148 exige a cor branca na radiação de saída [14].

A função nevoeiro requer, de todos os espetros em análise, a maior concentração de luz por menor área. O espetro de intensidade luminosa requer uma distribuição luminosa horizontal a 10° e verticalmente a 5°, tal como ilustra a figura 1.3[14]. A função requer a cor vermelha de saída de modo a ser homologada [14].

No sistema ótico a implementar, será efetuada a conceção de uma rede de colimadores e de diversas malhas de lentes, onde estas funções serão abordadas na secção 2.3.

Na mesma linha de raciocínio, procedeu-se a uma caracterização ótica das fontes luminosas e dos materiais refletores e transmissivos, a serem implementados no sistema ótico. As características dos materiais encontram-se descritas na tabela 1.2 tendo por base fichas técnicas disponibilizadas pela empresa.

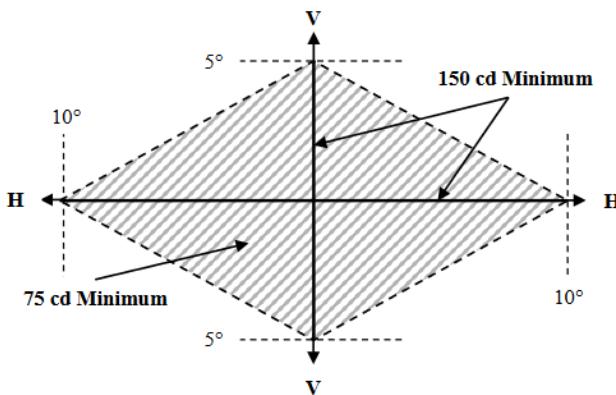


Figura 1.3: Distribuição angular de intensidade luminosa para a função nevoeiro. Os valores definidos representam os valores mínimos de intensidade luminoso ao longo dos planos H-H e V-V (150 cd) e nos outros pontos necessários para cumprimento da função (75 cd). Retirado de [14].

Tabela 1.2: Propriedades óticas dos materiais atualmente em uso pela empresa segundo fichas técnicas de fornecedores.

Material	Propriedades óticas	
	Transmitância (T)	Índice de refração (<i>n</i>)
PC	-	-
PMMA	92%	1.49
Lx	88-90%	1.586

De modo a garantir os requisitos necessários para as funções em estudo, a evolução do projeto centrou-se em três etapas fulcrais. Em cada etapa, analisou-se o espetro de radiação de saída. As etapas consistem em:

- analisar a radiação de saída proveniente dos LEDs em análise.
- analisar a radiação de saída proveniente do sistema ótico LEDs + malha de lentes em estudo.
- analisar a radiação de saída de saída do sistema ótico LEDs + malha de lentes + polímero.

Com este objetivo, foram estabelecidas algumas etapas experimentais durante a conceção deste farolim. A primeira etapa consistiu na medição espectral dos LEDs a serem usados. Numa segunda etapa, caracterizou-se espectralmente o material, ao analisar-se a sua interferência na radiação de saída. Com as medições efetuadas nestas duas etapas, conseguiu-se ter uma caracterização ótica total do sistema. Numa última etapa, recorreu-se ao programa de software *LucidShape*, onde se parametriza, simula e analisa cada etapa do projeto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Após uma breve contextualização da empresa SIM e da histórica da iluminação automóvel no capítulo 1, o capítulo 2 descreve uma componente centrada na física teórica subjacente a princípios técnicos e físicos que permitam analisar, sobretudo processos ópticos de fotometria, colorimetria e ótica clássica.

O capítulo 3, centra-se no desenvolvimento do farolim. É analisado o desenho 2D do farolim e as funções a implementar no farolim. É também efetuada uma caracterização dos LEDs e dos materiais a analisar para serem aplicados no farolim a desenvolver, ilustrando o raciocínio implementado durante o processo. É, ainda desenvolvida, uma análise da interferência dos materiais nas propriedades óticas da radiação de saída, tendo em especial atenção à colorimetria. O desenho técnico do farolim a ser implementado, com a descrição das funções e das peças constituintes, é ilustrado no capítulo 4. Neste capítulo, aborda-se a constituição e a parametrização dada a cada função do farolim e o porquê de alteração da parametrização da malha de lentes, ilustrando os resultados da simulação efetuada para cada função.

O capítulo 5, centra-se numa perspetiva global do trabalho desenvolvido em contexto empresarial, descrevendo-se os passos para trabalho futuro.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

As funções em análise do farolim em desenvolvimento, requerem uma base de conhecimentos técnicos coincidentes com as leis de Snell, leis de Fresnel, análise das propriedades fotométricas e das leis de propagação de ondas eletromagnéticas num meio material.

2.1 PROPRIEDADES FOTOMÉTRICAS

Nesta secção, aborda-se o estudo das propriedades fotométricas. A fotometria é uma ciéncia que se baseia na medição de radiação eletromagnética visível, tendo como base o modelo estatístico da percepção visual humana que descreve a sensibilidade do olho humano à radiação visível, centrada na gama de comprimentos de onda de $\lambda = [380, 770]$ nm [17]. No desenvolvimento deste projeto, não é abordado o brilho de fontes luminosas, apenas se a cor de emissão corresponde à estipulada pelas normas UNECE.

Descreve-se apenas as propriedades necessárias para desenvolvimento da dissertação, nomeadamente a intensidade luminosa e a iluminância.

A intensidade luminosa, amplamente medida em regulamentos UNECE para iluminação automóvel, centra-se na medição do fluxo luminoso, ϕ , proveniente de fontes luminosas em função do ângulo sólido, Ω , permitindo escrever no formalismo matemático segundo a equação 2.1[18].

$$I_v = \frac{\phi}{\Omega} \quad (2.1)$$

O ângulo sólido (Ω) corresponde à relação entre a área definida por uma superfície e a distância r entre esta e uma fonte luminosa. Assim permite-se definir um cone de luz de raio variável r' . A figura 2.1 ilustra o campo espacial e a definição de ângulo sólido, de acordo com [18] e por base [19, 20].

A equação 2.2 define matematicamente o ângulo sólido:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = 4\pi \left(\frac{r'}{r}\right)^2 \quad (2.2)$$

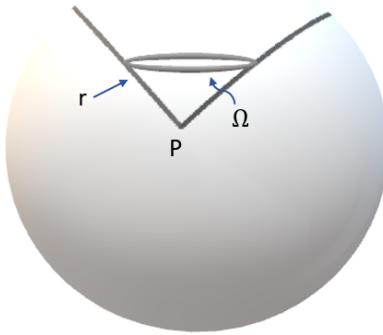


Figura 2.1: Definição do ângulo sólido Ω . Do ponto de vista do ponto P , a superfície de raio r' forma um cone de luz com a esfera de raio r , representada por Ω . Desta forma, permitirá analisar a quantidade de radiação que chega à superfície da esfera. Adaptado de [20].

A iluminância (E) permite analisar a quantidade de luz sob uma área iluminada, correlacionando o fluxo luminoso proveniente de fontes luminosas, ϕ , em função da área iluminada, A_{ilum} , ilustrada pela equação 2.3[18].

$$E = \frac{\phi}{A_{ilum}} \quad (2.3)$$

Na área de iluminação automóvel, quer faróis quer farolins é medida tipicamente a grandeza física de intensidade luminosa (unidades, lm/sr correspondente às unidades, cd), de acordo com os regulamentos atualmente em vigor [14, 15].

2.2 PROCESSOS ÓTICOS DE TRANSMISSÃO, REFLEXÃO E ABSORÇÃO

A interação da radiação eletromagnética com um meio material pode-se revelar macroscopicamente por três fenómenos óticos que permitem caracterizar o material, nomeadamente os fenómenos de transmissão, reflexão e absorção. A figura 2.2 ilustra o comportamento ótico da radiação num meio material.

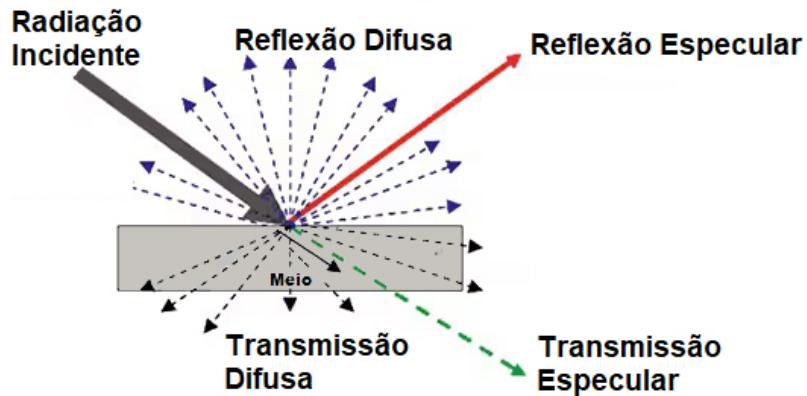


Figura 2.2: Processos óticos resultantes da interação de um feixe de luz com um material.

A análise da figura 2.2 mostra que, um material, reflete specularmente caso a superfície da mostra seja polida, enquanto reflete de forma difusa caso apresente textura. Na mesma linha, o fenómeno ótico de transmissão difusa ocorre numa interface (alteração de meio físico).

A transmissão espelhada ocorre quando o meio de incidência e o meio de transmissão são coincidentes [21].

O processo físico de transmissão descreve a quantidade de radiação capaz de ultrapassar um meio material, correlacionando o fluxo de radiação espacial transmitido, ϕ_{λ_t} , com o fluxo de radiação espacial incidente, ϕ_{λ_i} , traduzido pela equação 2.4[21].

$$t(\lambda) = \frac{\phi_{\lambda_t}}{\phi_{\lambda_i}} \quad (2.4)$$

A transmissão espacial $t(\lambda)$ pode ser reescrita na sua forma integral tal como mostra a equação 2.5[21].

$$t(\lambda) = \frac{\int_{\lambda} \phi_{\lambda_t} d\lambda}{\int_{\lambda} \phi_{\lambda_i} d\lambda} \quad (2.5)$$

A figura 2.3 ilustra o processo óptico de transmissão de um feixe de luz.

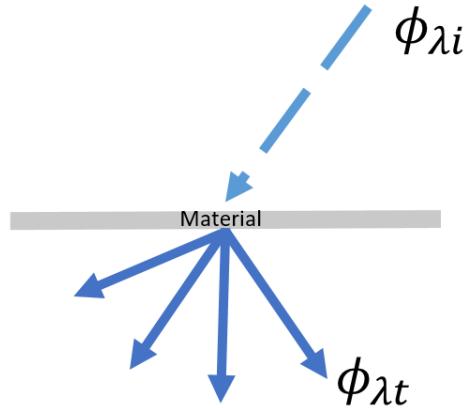


Figura 2.3: Processo óptico de transmissão de um feixe de radiação.

O processo físico de reflexão detalha a quantidade de radiação refletida por uma superfície, correlacionando o fluxo de radiação espacial refletida, ϕ_{λ_r} , com o fluxo de radiação espacial incidente, ϕ_{λ_i} . A figura 2.4 ilustra o processo de reflexão de um feixe óptico.



Figura 2.4: Processo óptico de reflexão.

A equação 2.6 ilustra o processo óptico de reflexão espacial [21].

$$r(\lambda) = \frac{\phi_{\lambda_r}}{\phi_{\lambda_i}} \quad (2.6)$$

Pode-se ainda descrever na sua forma integral, em toda a sua gama espectral, tal como ilustra a equação 2.7.

$$r(\lambda) = \frac{\int_{\lambda} \phi_{\lambda_r} d\lambda}{\int_{\lambda} \phi_{\lambda_i} d\lambda} \quad (2.7)$$

O processo de absorção centra-se na quantidade de luz incidente absorvida por um dado material, resultando em conversão de energia, usualmente sob a forma de calor [21]. A equação 2.8 representa matematicamente o fenómeno de absorção, correlacionando a quantidade de radiação absorvida, ϕ_{λ_a} , com a quantidade de radiação incidente, ϕ_{λ_i} .

$$a(\lambda) = \frac{\phi_{\lambda_a}}{\phi_{\lambda_i}} \quad (2.8)$$

Permitindo reescrever em formato espetral tal como ilustra a equação 2.9.

$$a = \frac{\int_{\lambda} \phi_{\lambda_a} d\lambda}{\int_{\lambda} \phi_{\lambda_i} d\lambda} \quad (2.9)$$

A equação de Beer-Lambert representa o decaimento da intensidade de radiação espectral transmitida, em função da intensidade de radiação incidente, permitindo analisar o parâmetro ótico do coeficiente de absorção, α . A equação de Beer-Lambert é ilustrada por [22]:

$$I(\lambda) = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

sendo $\alpha(\lambda)$ definido como coeficiente de absorção espectral (unidades, m^{-1}) e d a espessura do meio material (unidades, m).

2.3 FORMALISMO ÓTICO

A lei de Snell-Descartes descreve a propagação de um feixe ótico quando este encontra uma interface (alteração do meio físico). A propagação do feixe depende das características do meio, nomeadamente a textura da interface e as suas propriedades óticas [23]. A principal propriedade ótica que caracteriza um dado meio é o seu índice de refração espectral, representando fisicamente a capacidade deste em refratar um feixe de radiação eletromagnético em função do seu comprimento de onda. A lei de Snell-Descartes pode ser descrita segundo [23, 24]:

$$n_{inc} \sin(\theta_i) = n_{mat} \sin(\theta_t) \quad (2.11)$$

em que n_{inc} , n_{mat} representam os índices de refração do meio incidente e do meio material e θ_i , θ_t os ângulos de incidência e refração, respetivamente. A interface pode ser, no caso mais simples, um plano ou, algo mais complexo, como uma semi-esfera. Esta contextualização permite que, no setor automóvel, a projeção angular seja obtida por parametrização de malhas de lentes [25]. Com esse objetivo, um estudo dos tipos de lente a ser implementada consistiu na análise de lentes finas esféricas [26].

Foi considerada aproximação paraxial para lentes finas esféricas biconvexas [27]. Considerando n_{lente} o índice de refração da lente, um feixe ótico a propagar-se num meio, apresenta o comportamento representado na figura 2.5[27]:

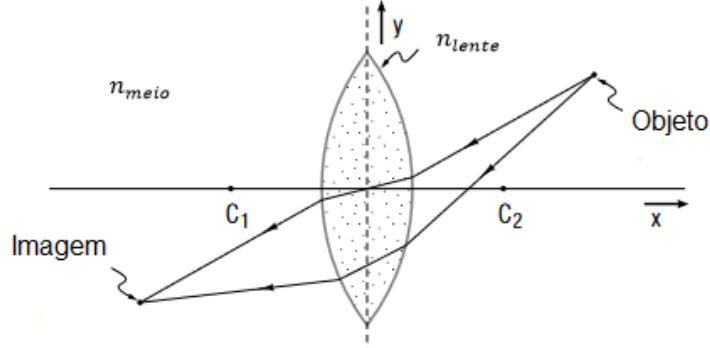


Figura 2.5: Aproximação paraxial para a propagação de raios óticos numa lente esférica. Adaptado de [27].

Sendo definido pela equação 2.12[27]:

$$\frac{1}{x_i} = \frac{1}{x_0} - (n_{lente} - n_{meio}) \left(\frac{1}{x_{C_2}} - \frac{1}{x_{C_1}} \right) \quad (2.12)$$

com x_0 , x_i a representar a posição da coordenada x do objeto e da imagem, respetivamente; x_{C_1} a representar o centro de curvatura da superfície da primeira lente e x_{C_2} a representar o centro de curvatura da superfície da segunda lente. A validade desta aproximação é garantida para as condições em que o raio da lente e a sua espessura sejam inferiores a qualquer coordenada x da equação 2.12 [27]. A malha de lentes a implementar consistirá em lentes plano convexas, assumindo a direção de propagação ilustrada na figura 2.5. Esta propagação de radiação, em meios materiais, pode resultar em alterações óticas, nomeadamente na alteração de cor de emissão.

Efetua-se, neste projeto, uma caracterização das propriedades óticas dos LEDs. A cor de emissão dos LEDs provoca uma resposta no olho humano. A visão fotópica corresponde à sensibilidade do olho humano à radiação em condições diurnas, enquanto a visão escotópica corresponde à resposta do olho humano em condições noturnas. A figura 2.6 ilustra a sensibilidade do olho humano.

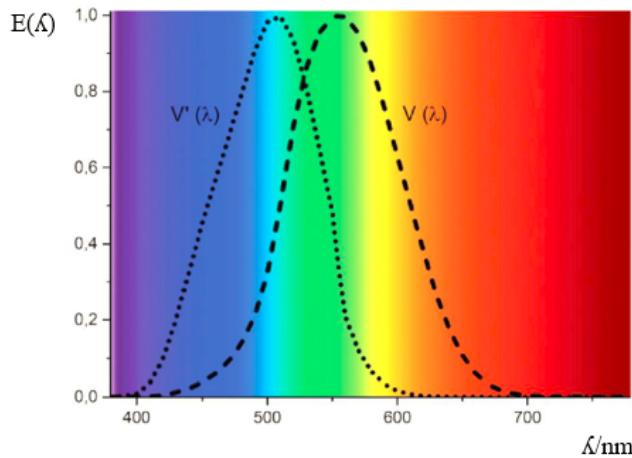


Figura 2.6: Representação da curva de eficiência luminosa CIE: $V(\lambda)$ associado à visão fotópica e $V'(\lambda)$ correspondente à visão escotópica. Adaptado de [28].

O comprimento de onda de pico, λ_{pico} , corresponde ao comprimento de onda do máximo de intensidade da emissão radiométrica da fonte de luz, não representando a emissão da fonte de luz percebida pelo olho humano, mas sim por espetrómetros. Por outro lado, o comprimento de onda dominante, λ_{dom} , corresponde ao comprimento de onda emitido pela fonte luminosa para o qual o olho humano é mais sensível. A estes comprimentos de onda em análise, estão associadas coordenadas de cor que representam a cor de emissão da radiação. A figura 2.7 ilustra, com recurso ao software *ColorCalculator*, a representação de um LED vermelho com fluxo luminoso de 3,4 lm.

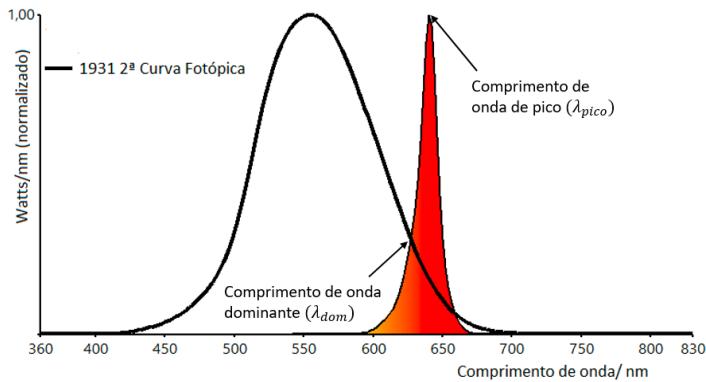


Figura 2.7: Correspondência entre curva fotopática e espetro de um LED vermelho com $\lambda_{dom} = 629,9$ nm, $\lambda_{pico} = 637,4$ nm e largura de banda FWHM = 14,4 nm.

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (do termo francês, *Commission Internationale de l'Eclairage*) é a responsável pelo desenvolvimento matemático de representação de espaços de cor. O atual método de caracterização centra-se no índice de interpretação de cores (CRI, proveniente do conceito inglês *Colour rendering index*), introduzido em 1974 [29].

O método CIE xyY para representação do espaço de cores, introduzido em 1931, usa tristímulos X,Y,Z associados à região do vermelho, verde e azul, necessários para correspondência da cor da amostra [29]. Deste modo, permitiu criar-se um espaço bidimensional correspondente ao diagrama de cromaticidade (independente da luminosidade Y), onde (x,y) correspondem às coordenadas de cromaticidade, tal como ilustra a figura 2.8.

Através da análise, constata-se que o λ_{pico} corresponde ao comprimento de onda associado ao valor máximo de emissão do respetivo LED e o λ_{dom} encontra-se fortemente relacionado com a curva de eficiência luminosa CIE, sendo o seu valor próximo ao ponto de interseção da curva de emissão do LED com a curva de eficiência luminosa CIE. A pureza da cor é um dos parâmetros mais importantes na caracterização das propriedades fotométricas de LEDs. Pode ser obtida através da expressão 2.13 [30]:

$$\text{Pureza (\%)} = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{\sqrt{(x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2}} \times 100 \quad (2.13)$$

sendo $(x;y)$ as coordenadas de cromaticidade do LED, $(x_i; y_i) = (0,3333; 0,3333)$, correspondente às coordenadas da cor branca e $(x_d; y_d)$ as coordenadas de cromaticidade do λ_{dom} . Quanto mais a cor se aproxima da curva correspondente às cores monocromáticas, mais pura ela é.

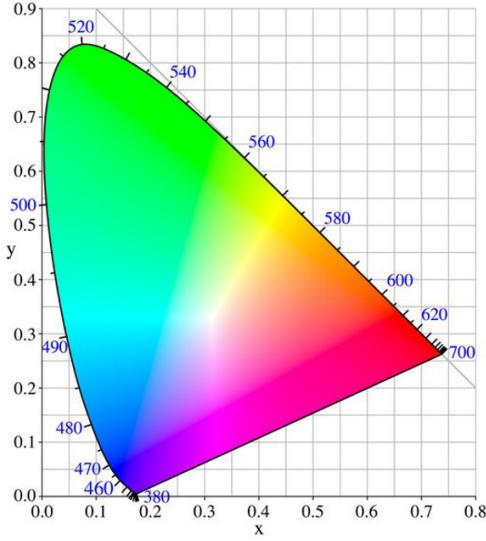


Figura 2.8: Gráfico representativo do diagrama de cores segundo o método CIE. Adaptado de [29].

2.4 MATERIAIS COM CARÁTER NÃO-DISPERSIVO

As leis de Fresnel permitem introduzir o formalismo matemático para as grandezas físicas de transmissão (t) e reflexão (r). A polaridade das ondas incidente, refratada e refletida permitirá analisar processos óticos de polarização das ondas s e p . A polarização da onda s e onda p representam componentes tangenciais e normais relativamente ao vetor de onda em análise.

A figura 2.9 ilustra o comportamento ótico relativo à incidência da luz numa dada interface, assumindo para tal que a superfície da amostra é polida e que não existe dispersão no interior do material, de modo a considerar apenas processos óticos de transmissão e reflexão [23]. De modo a analisar-se o comportamento do material, determina-se o seu coeficiente de absorção em função do comprimento de onda de radiação incidente, tal como demonstrado pela equação 2.10. De notar que, no interior do material, não são consideradas outras reflexões a não ser apenas as tratadas, visto que representam uma intensidade baixa da radiação propagante. I_0 representa a intensidade da radiação incidente, I_1, I_2, I_3 são intensidades de radiação resultantes da interação do feixe de luz incidente com o material, r_1, r_2 representam as reflexões na primeira e na segunda interface, nomeadamente, e a o processo ótico de absorção.

As intensidades de radiação podem ser escritas em função dos fatores de reflexão r_1, r_2 e em função da absorção, a , por:

$$\begin{cases} I_1 = (1 - r_1)I_0 \\ I_2 = (1 - a)I_1 \\ I_3 = (1 - r_2)I_2 \end{cases} \quad (2.14)$$

Considera-se os efeitos da radiação incidente. Os processos de reflexão no material para a polarização s , r_s , e para a polarização p , r_p , do vetor reflexão são descritos pelas equações

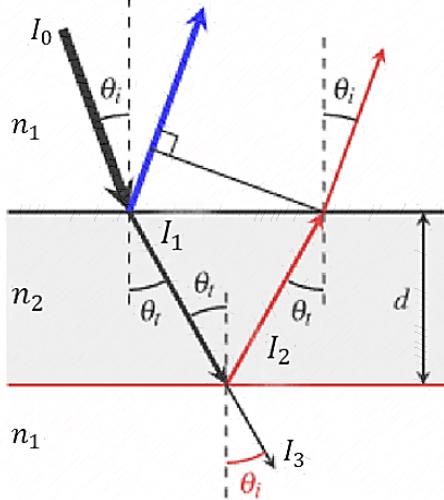


Figura 2.9: Processos óticos numa amostra com caráter não-dispersivo.

2.15 e 2.16 [31, 32]:

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_1 \cos \theta_i + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (2.15)$$

$$r_p = \frac{n_2^2 \cos \theta_i - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}} \quad (2.16)$$

Sendo a radiação total incidente não-polarizada dada por [31, 32]:

$$r = \frac{1}{2}(r_s + r_p) \quad (2.17)$$

Para radiação não-polarizada, o coeficiente de absorção do material é calculado pelo desenvolvimento das equações 2.14.

$$I_3 = I_2 I_1 \Leftrightarrow \frac{I_3}{(1 - r_2)} = I_2 I_1 \Rightarrow \frac{I_3}{I_0} = (1 - r_2)(1 - r_1)(1 - a) \quad (2.18)$$

Considerando o material isotrópico, os coeficientes de reflexão de ambas as superfícies do material consideram-se idênticas, $r_2 \approx r_1 \approx r$. De notar que o termo $(1 - a)$ provém da equação 2.10, permitindo reescrever a equação 2.18 como:

$$\frac{I_3}{I_0} = (1 - r)(1 - r)e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

Deste modo, pode-se avaliar processo ótico de transmissão e determinar o coeficiente de absorção do material, definindo t e α como:

$$t = (1 - r)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.20)$$

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{t}{(1 - r)^2} \right) \quad (2.21)$$

3

CAPÍTULO

Caracterização Experimental do Farolim

Nesta secção, desenvolve-se toda a caracterização experimental efetuada. A caracterização dos LEDs permitiu analisar o comportamento ótico, nomeadamente o comprimento de onda dominante (λ_{dom}), comprimento de onda de pico (λ_{pico}) e largura de banda a meia altura (FWHM) dos seus espetros de emissão, de acordo com os conceitos definidos no capítulo anterior e aplicando-os na secção 3.2.1. Na mesma linha de raciocínio, verificou-se a influência do material na radiação de saída, de modo a verificar como influenciava sobretudo as propriedades colorimétricas (de modo a garantir-se a cor na norma dos regulamentos UNECE para a função em análise). Esta análise permitiu escolher dentro da gama de LEDs existente na empresa, qual o LED que mais se adequava e que material (e respetiva cor) se pretendia implementar na função em análise.

Deste modo, a estrutura do farolim a implementar passa por:

- os emissores de luz utilizados serem LEDs. A empresa está atualmente focada em apostar nestas fontes luminosas;
- efetuar a conceção de uma rede de colimadores, com o objetivo de ser a mesma para todas as funções do equipamento a serem implementadas. Com esta única implementação, a empresa pode reduzir custos associados à produção de moldes;
- analisar as malhas de lentes normalmente implementadas pela empresa nas respetivas funções e verificar em *LucidShape* a distribuição ótica. Esta análise pode resultar na possibilidade de se desenvolver novas lentes caso não se verifique o cumprimento da função [14];
- estudo do material a ser implementado (como polímero de saída) e análise da sua influência nas propriedades de cor, cumprindo a norma do regulamento 148 [14].

A figura 3.1 ilustra em corte 2D um esquema do farolim a implementar.

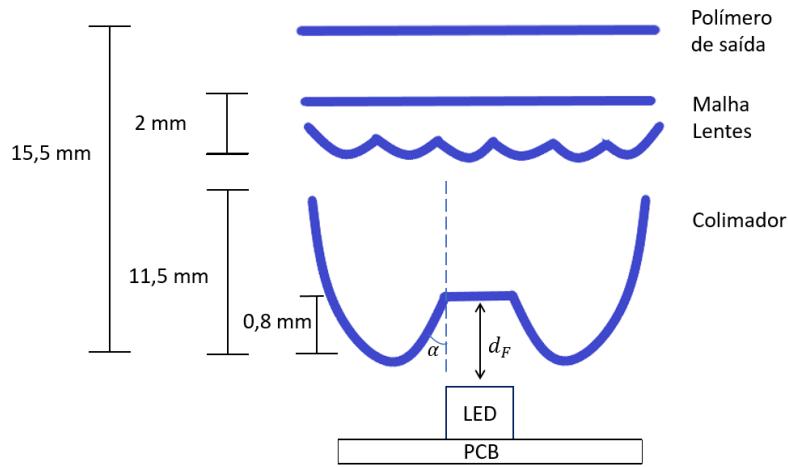


Figura 3.1: Esquemático 2D do farolim em desenvolvimento.

com d_F a ilustrar a distância focal do LED ao plano frontal do colimador e α o ângulo de linha.

3.1 CARACTERIZAÇÃO ÓTICA DOS MATERIAIS

Neste capítulo, procedeu-se à caracterização dos materiais, detalhados na tabela 1.2, nomeadamente à análise da evolução das equações de Fresnel e das curvas de dispersão (usualmente referidas como equações de Sellmeier [33]). A figura 3.2 ilustra os polímeros em análise neste desenvolvimento de projeto.



Figura 3.2: Materiais em análise para aplicação no farolim.

As equações de Sellmeier descrevem a dependência do índice de refração em função do comprimento de onda de radiação incidente. As equações 3.1 e 3.2 ilustram o comportamento do índice de refração dos materiais em função do comprimento de onda.

Para o polímero PC [34]:

$$n^2 = 1 + \frac{1,4182\lambda^2}{\lambda^2 - 0,021304} \quad (3.1)$$

Para o polímero PMMA [34]:

$$n^2 = 1 + \frac{1,1819\lambda^2}{\lambda^2 - 0,011313} \quad (3.2)$$

O polímero Lx apresenta um índice de refração espectral idêntico ao material PC considerando-se uma equação de Sellmeier idêntica [35].

As equações de Fresnel 2.15 e 2.16 foram calculadas para diferentes interfaces. A figura 3.3(a) ilustra a evolução da polarização das ondas S nas interfaces LED-PC e PC-PMMA, enquanto a figura 3.3(b) ilustra o comportamento da polarização das ondas P. Consideraram-se os índices de refração dos materiais descritos na tabela 1.2, o feixe de incidência proveniente dos LEDs a propagar-se no ar ($n=1$) e o índice de refração do PC igual a 1,585 [36]. Esta análise das ondas dos vetores de reflexão e transmissão, do ponto de vista físico, permite analisar o caráter de transmissão e reflexão do material e simultaneamente a projeção angular dada pela análise da equação 2.11.

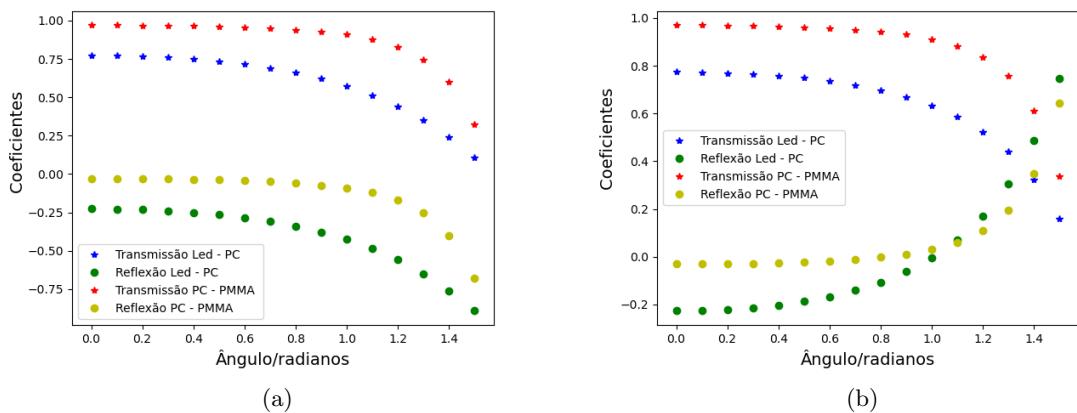


Figura 3.3: A análise da evolução das ondas S - figura 3.3(a) - na interface LED-PC, em função do ângulo de incidência, mostra uma transmissão praticamente total, com uma taxa de reflexão baixa. Na interface PC-PMMA, em função do ângulo de transmissão, verifica-se uma transmissão praticamente total, com uma taxa de reflexão praticamente nula. A análise da evolução das ondas P - figura 3.3(b) - na interface LED-PC mostra um excelente comportamento de transmissão, com baixa taxa de reflexão. Na interface PC-PMMA a reflexão também é praticamente nula, verificando-se um excelente de transmissão face à propagação de radiação.

Poderia-se optar pelo material Lx mas, por uma relação custo-benefício, optou-se por PC no lugar de Lx dado o custo do material ser menor, de acordo com as fichas técnicas da empresa.

3.2 PROPRIEDADES ELETRÓNICAS DOS LEDS COMERCIAIS A IMPLEMENTAR

As funções em estudo requerem uma vasta divergência angular que permita alcançar as intensidades luminosas necessárias para homologação. Com esse objetivo, foi analisada uma gama diversa de LEDs comerciais (atualmente utilizados pela empresa SIM), fornecidos pela *Osram*. As figuras 3.4(a), 3.4(b) e 3.4(c) ilustram as diferenças físicas entre Top LED, PowerTop LED e PowerTop LED com cúpula.



Figura 3.4: A figura 3.4(a) ilustra um Top LED, enquanto as figuras 3.4(b) e 3.4(c) ilustram PowerTop LED e PowerTop LED com cúpula.

As tabelas 3.1 e 3.2 descrevem as propriedades eletrônicas fundamentais para simulação em software, nomeadamente o fluxo luminoso (ϕ) e abertura angular (em $^{\circ}$).

Tabela 3.1: Fluxo luminoso dos LEDs.

Leds	Stop/Presença	Pisca	Nevoeiro	Marcha-Atrás
Top	3,78 lm	2,4 lm	3,78 lm	6 lm
Power Top	6,1 lm	6,1 lm	6,1 lm	5,88 lm
Power Top com cúpula	5,1 lm	5 lm	5,1 lm	—

Tabela 3.2: Abertura angular dos LEDs.

Leds	Stop/Presença	Pisca	Nevoeiro	Marcha-Atrás
Top	120°	120°	120°	120°
Power Top	120°	120°	120°	120°
Power Top com cúpula	60°	30°	60°	—

A tabela 3.3 ilustra a cor de emissão dos LEDs a serem utilizados, com VM a representar a cor vermelha, AM a representar a cor âmbar/amarela e BR a cor branca.

Tabela 3.3: Gama de LEDs a ser analisada.

Leds	Stop/Presença	Pisca	Nevoeiro	Marcha-Atrás
Top	VM	AM	VM	BR
Power Top	VM	AM	VM	BR
Power Top com cúpula	VM	AM	VM	—

3.2.1 Análise das propriedades óticas dos LEDs

Com recurso ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro, foi efetuada uma montagem experimental com o intuito de se avaliar o caráter ótico dos LEDs em análise constituída por uma 1 PCB com 4 LEDs incorporados, de acordo com a tabela 3.3, e um espetrómetro como célula de medição, colocando-se a fonte luminosa a uma distância de, aproximadamente, 29 cm da célula de medição. Esta análise permitiu analisar propriedades de colorimetria, a partir dos quais foi possível determinar as coordenadas de cor (x, y), e obter espetros de transmissão de cada categoria de LEDs onde se permitiu observar o comprimento de onda dominante (λ_{dom}), comprimento de onda de pico (λ_{pico}), taxa de pureza e a largura a meia altura do espetro de transmissão característico.

As figuras 3.5, 3.6 e 3.7 representam espetros de transmissão característicos da cada PCB para Top LEDs, PowerTop LEDs e PowerTop LEDs com cúpula, respetivamente.

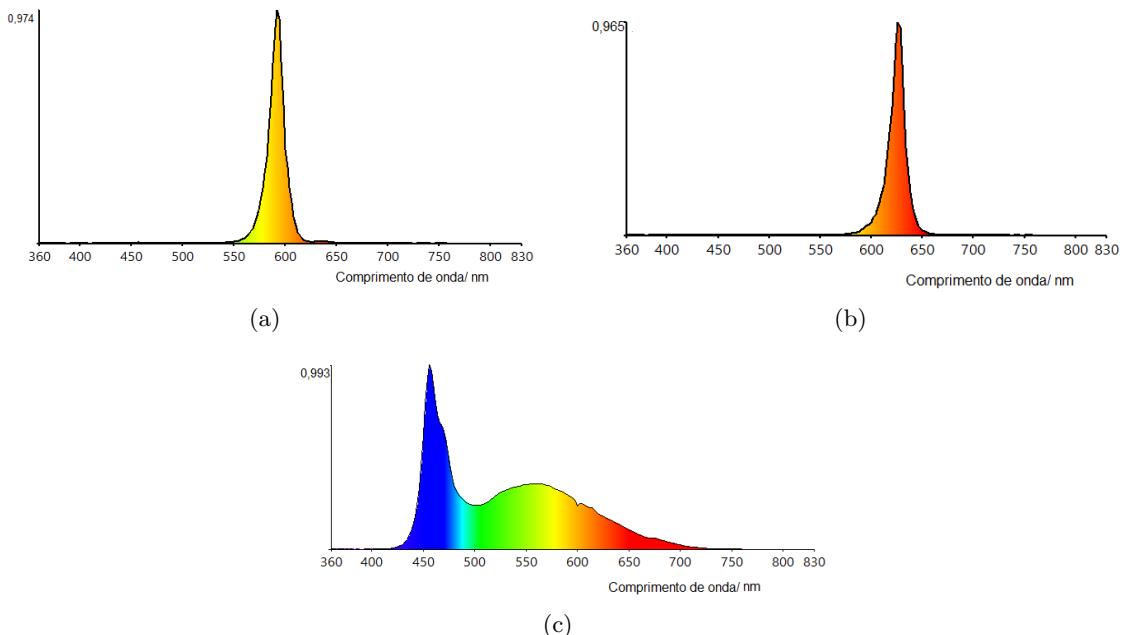


Figura 3.5: Espetros de transmissão de Top LEDs: 3.5(a) associado a um Top âmbar, 3.5(b) associado a um Top vermelho e 3.5(c) associado a um Top branco. As intensidades dos picos de emissão correspondem a intensidades normalizadas.

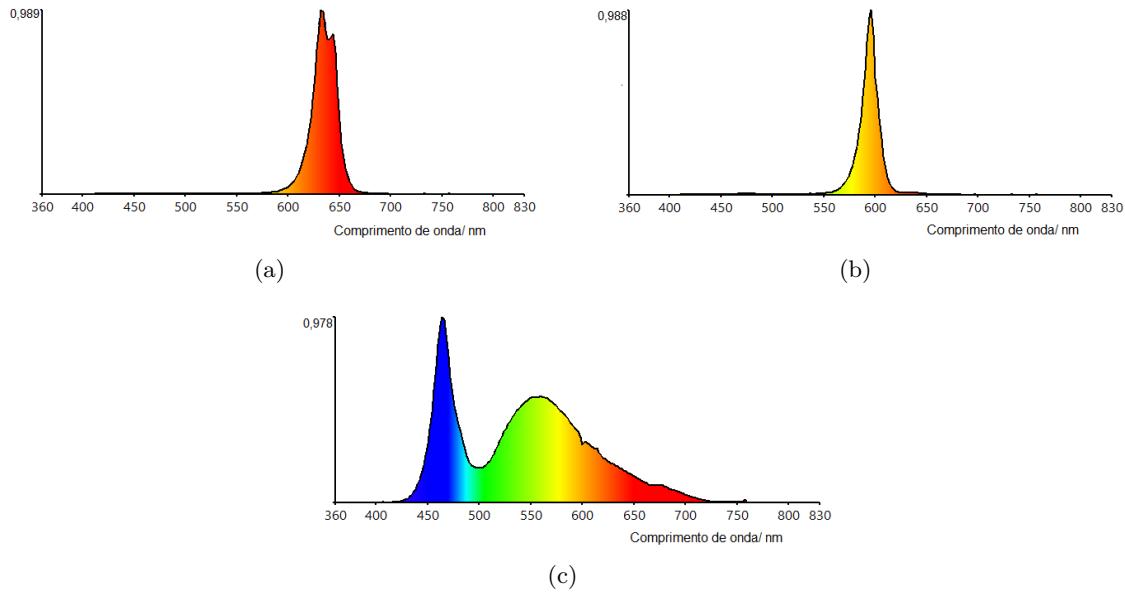


Figura 3.6: Espetros de transmissão de PowerTop LEDs: 3.6(a) associado a um PowerTop vermelho, 3.6(b) associado a um PowerTop âmbar e 3.6(c) a ilustrar um PowerTop branco. As intensidades dos picos de emissão correspondem a picos de intensidade normalizada.

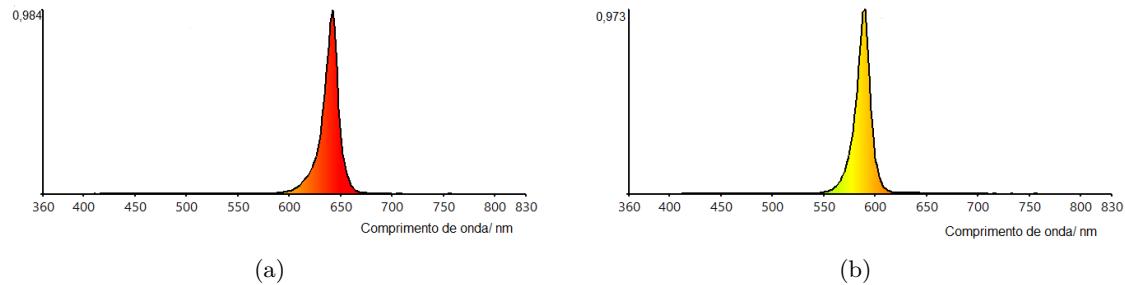


Figura 3.7: Espetros de transmissão de PowerTop LEDs com cúpula: 3.7(a) associado a um PowerTop vermelho com cúpula e 3.7(b) associado a um PowerTop âmbar com cúpula. As intensidades dos picos de emissão correspondem a picos de intensidade normalizada.

O comportamento ótico dos LEDs é detalhado na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades óticas da gama de LEDs a analisar.

Leds	x	y	λ_{dom}/nm	λ_{pico}/nm	FWHM/nm	Pureza/%
Top VM	0,6782	0,3137	617,7	622	14,7	97,6
Top AM	0,5686	0,4250	589,6	589,7	14,8	98,3
Top BR	0,2850	0,3085	484,8	529,9	-	18,3
PowerTop VM	0,6910	0,3017	624	633	25,4	97,8
PowerTop AM	0,5814	0,4099	592,2	592,1	16,1	97,6
PowerTop BR	0,3184	0,3686	526,6	542,2	-	7,2
PowerTop com cúpula VM	0,7007	0,2952	628,1	637,4	12,9	98,8
PowerTop com cúpula AM	0,5519	0,4455	586,3	586,9	13,3	94,4

A tabela 3.4 mostra o caráter ótico dos LEDs em análise. Estes parâmetros foram obtidos com recurso ao *ColorCalculator*, ilustrando que efetivamente cada espetro de emissão corresponde à cor de emissão do LED descrito pelas fichas técnicas. De notar que, dentro dos parâmetros analisados, a FWHM dos LEDs brancos (não representada na tabela) é a maior dada a gama de comprimentos de onda que estes incorporam. A FWHM é maior para o PowerTop LED e menor para os PowerTop LED com cúpula, como esperado. A pureza dos LEDs brancos é muito baixa, dada a gama de comprimentos de onda, enquanto a pureza para LEDs vermelho e amarelo seja superior a 95%. Observam-se 2 picos de emissão para o espetro de emissão do PowerTop LED vermelho o que não corresponde ao estipulado pela ficha técnica. A resposta espectral provém de um conjunto de 4 LEDs, em que pelo menos um deles tinha uma emissão num comprimento de onda ligeiramente diferente dos restantes.

3.3 TESTES EXPERIMENTAIS PARA MEDIÇÃO DA ILUMINÂNCIA

Na mesma linha da montagem efetuada para caracterização dos LEDs (referida na secção anterior 3.2), efetuou-se na empresa uma montagem experimental com a incorporação do material em análise, entre a fonte luminosa e um luxímetro. O material a ser analisado foi colocado a 2,1 cm da fonte de iluminação. Para todos os ensaios efetuados, foi fornecida uma tensão de 18 V, 100 mA à fonte, realizando-se 5 ensaios para cada PCB.

A figura 3.8 ilustra a montagem experimental efetuada, com a figura 3.9 a demonstrar os valores médios de iluminância para os diferentes LEDs com os materiais. A tabela 3.5 ilustra a transmitância obtida experimentalmente para os diversos materiais de espessura de 2 mm, com I_0 a representar a intensidade dos 4 LEDs sem qualquer obstáculo entre eles e o luxímetro.

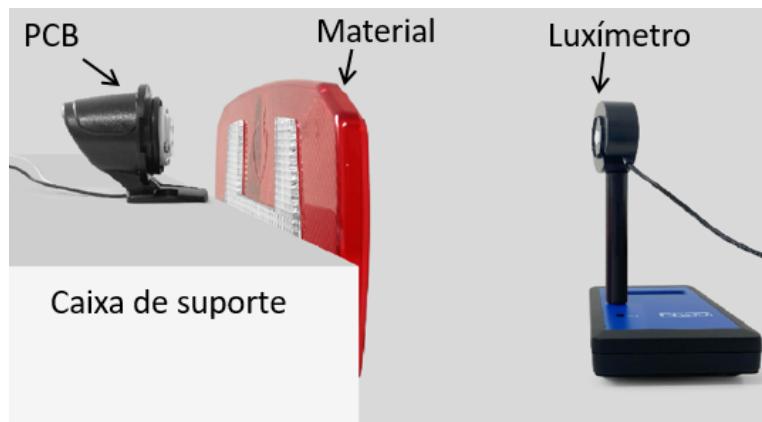


Figura 3.8: Montagem experimental realizada para medição das propriedades óticas dos materiais. O luxímetro ficou à mesma altura da PCB de modo a medir o máximo de radiação perpendicularmente incidente. As distâncias não se encontram à escala.

A transmissão (t) de luz é dada pela relação entre a intensidade de luz que atravessa o material e chega à célula - representada na tabela 3.5 - e a intensidade de radiação I_0 .

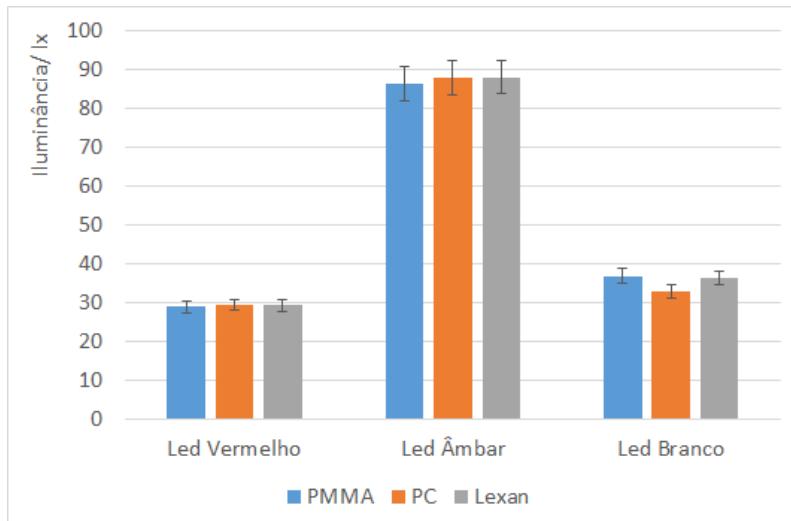


Figura 3.9: Iluminância medida experimentalmente para os diferentes materiais. Os resultados evidenciam que parte da radiação emitida pelos LEDs foi absorvida, para os diferentes materiais. O PMMA é o menos refrativo dos materiais descritos, o que permite refratar menos o feixe incidente e, deste modo, abrange uma maior área, de acordo com a equação 2.3[36]. Dada a semelhança do caráter ótico de PC e Lx, obteve-se níveis de transmitância idênticos exceto para o LED branco, em que há uma discrepância de aproximadamente 10%. A intensidade medida I_0 foi mais alta para o LED âmbar, seguida do LED branco, o que permitiu ter níveis de iluminância mais altos.

Tabela 3.5: Medição da transmissão (t) para os materiais em análise.

Materiais/ Leds	Vermelho/lx	Âmbar/lx	Branco/lx
PMMA	93,4%	87,9%	92,2%
PC	94,9%	89,3%	81,9%
Lx	94,8%	89,6%	90,9%

Em segunda instância, analisou-se a influência da cor do material na radiação de emissão, observando-se possíveis variações no comprimento de onda de emissão e na colorimetria da radiação. Em análise, o material consistiu em PC visto ser um polímero de um farolim com as 3 cores sem qualquer tipo de lente incorporada tal como ilustra a figura 3.2. Esta experiência foi realizada no Departamento de Física da Universidade de Aveiro, recorrendo a um espetrómetro.

A influência da cor na radiação de saída é ilustrada na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Análise da influência da cor do material nas propriedades óticas de radiação.

Leds	Cor material	x	y	λ_{dom}/nm	λ_{pico}/nm	FWHM/nm	Pureza/%
Top BR	BR	0,2862	0,3101	485,1	530,1	26,5	17,8
Top BR	VM	0,6196	0,3597	602,5	622,2	68,6	93,9
Top BR	AM	0,5295	0,4688	582,7	600,2	85,1	94,8
Top VM	BR	0,6894	0,3105	619	624	16,7	100
PowerTop com cúpula VM	BR	0,7079	0,2920	630	638,5	12,6	100

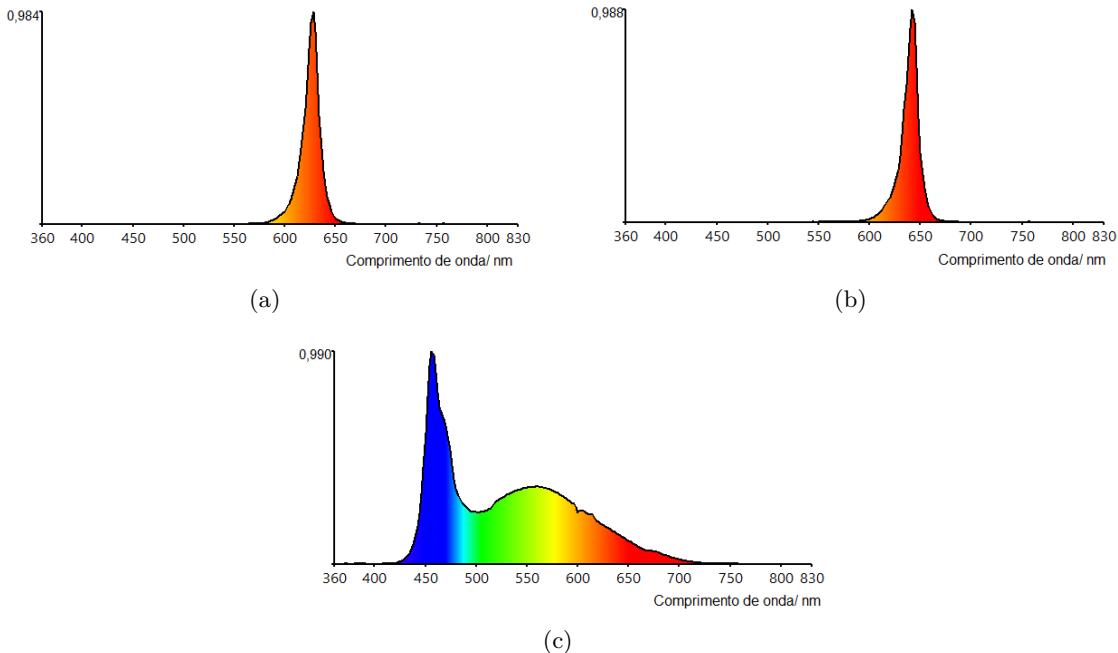


Figura 3.10: Espetros de transmissão na figura 3.10(a) para Top LEDs vermelho e na figura 3.10(b) para PowerTop LEDs vermelho com cúpula, enquanto a figura 3.10(c) está associada a Top LEDs branco, para uma cor branca do material em análise. As intensidades dos picos de emissão observadas encontram-se normalizadas.

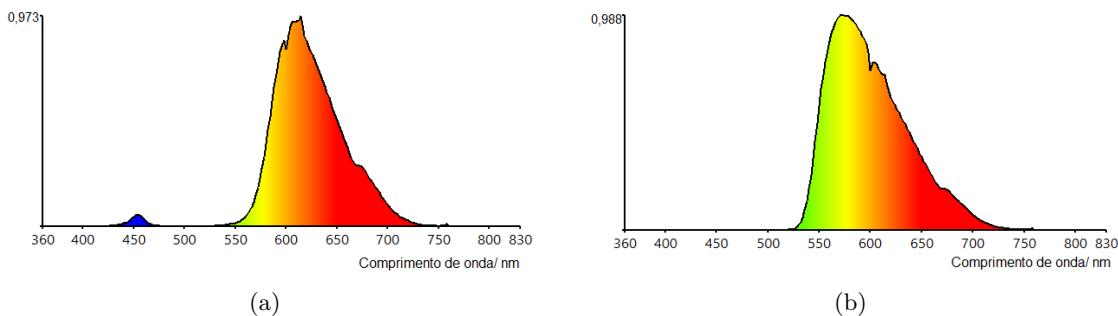


Figura 3.11: Espetros de transmissão para Top LEDs branco com a cor vermelha do material em 3.11(a) e com a cor amarela em 3.11(b). As intensidades de pico observadas correspondem a picos de emissão de intensidade normalizada.

Este tipo de análise permitiu observar o modo como a cor do material influenciava na cor de emissão da radiação. Para LEDs vermelhos, a cor branca do material não influencia no espetro de transmissão, devido à gama de comprimento de onda em que os LEDs emitem ($\approx [600,650]$ nm). No caso de LEDs com cor branca de emissão, a cor vermelha do material promove uma maior transmissão da cor vermelha, comprovado pelo comprimento de onda dominante característico, havendo uma diminuição de intensidade. A cor amarela do material permitiu concentrar o espetro num comprimento de onda superior a 500 nm, abrangendo alguns comprimentos de onda relativos à cor verde de emissão como ilustra a figura 3.11(b) - a utilização de LEDs branco pode comprometer, em termos de propriedades colorimétricas, a implementação da função.

Conceção Tecnológica do Farolim

O desenvolvimento tecnológico conferido ao farolim centra-se no esquemático da figura 4.1.

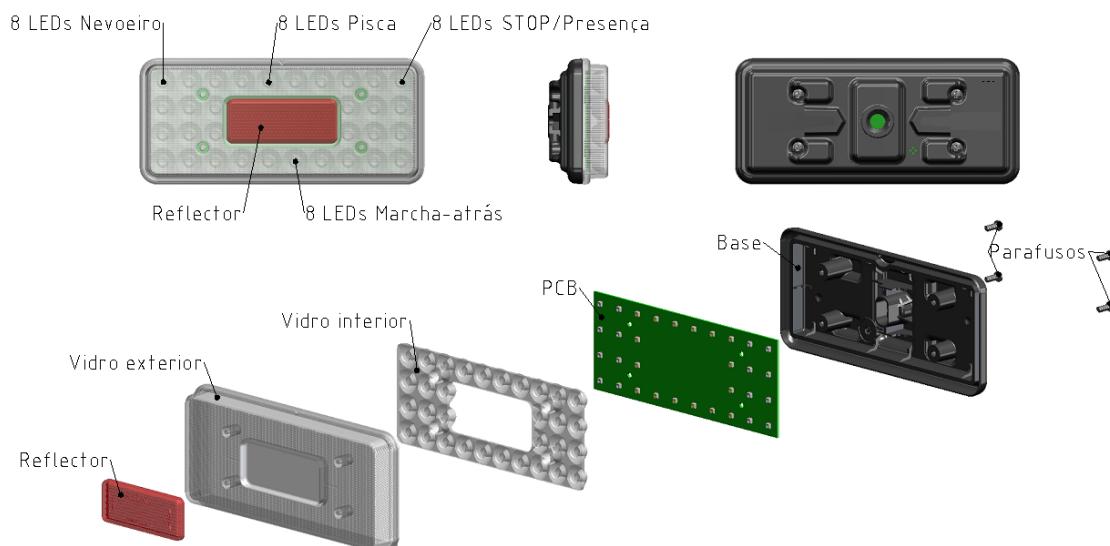


Figura 4.1: Esquema ilustrativo do farolim em desenvolvimento. Em termos de indústria, vidro interior corresponde à rede de colimadores a implementar e vidro exterior corresponde ao conjunto de malha de lentes + polímero de saída. O refletor é fornecido por empresa externa.

Por importação de um ficheiro .step deste farolim (desenvolvido pelo Departamento Técnico), iniciou-se o desenvolvimento do projeto em ambiente gráfico *LucidShape*. O desenho técnico do farolim permitiu incorporar todos os LEDs no plano XZ. Por uma questão de estética (nomeadamente, simetria do farolim) cada uma das funções do farolim é constituída por 8 LEDs. Como descrito, a implementação destes LEDs está dependente da cor requerida segundo o regulamento 148 [14]. Para as funções STOP e nevoeiro, com a mesma cor de saída requerida, estas têm de estar distanciadas entre si de 100 mm, de acordo com o regulamento [14]. As funções marcha-atrás e pisca, as cores branca e âmbar são as requeridas segundo o regulamento 148, respetivamente [14]. De acordo com as dimensões dos LEDs, desenvolveu-se

uma rede de colimadores que incorporassem a dimensão dos LEDs, permitindo variar a distância (focal) do LED à zona plana da rede de colimadores, tal como ilustra a figura 3.1.

O controlo eletrónico dos emissores é realizado em PCBs (do termo inglês, *printed circuit board*). Não será uma PCB única devido ao estudo que se efetuou na influência da variação da distância focal (d_F) na homogeneidade de luz criada [37]. As figuras 4.2(a) e 4.2(b) ilustram o raciocínio a aplicar, no caso do projeto, na análise da variação da distância (focal) entre LED e colimador.

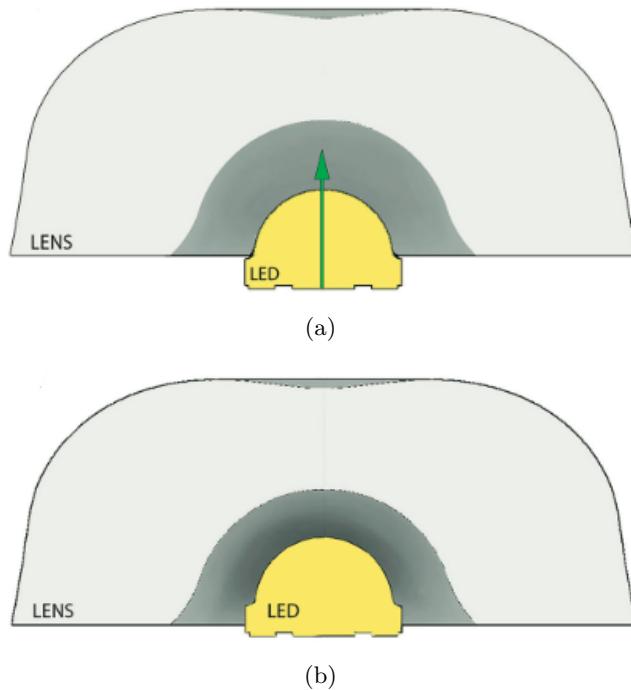


Figura 4.2: Processo de aproximar o LED a uma lente ao diminuir-se a distância (focal). Retirado de [37].

A nova rede de colimadores será concebida analisando-se os parâmetros de *spread* que permitam refletir os raios óticos e ter radiação altamente focada [38, 39, 40]. A figura 4.3 ilustra o design ótico de um colimador a ser implementado, assim como a sua parametrização de *spreads*.

A malha de colimadores a implementar neste projeto tem como parâmetros *reflector spread* ($-10^\circ, 10^\circ$), *center spread* ($0,0$) $^\circ$ e ângulo de linha, α , a 5° .

A curvatura da lente esférica, por parametrização dos *spreads*, permite definir a concavidade de cada lente, tal como ilustram os exemplos das figuras 4.4(a) e 4.4(b).

Para tal, as lentes desenhadas consistiram em lentes plano convexas. Em software *LucidShape*, pode-se optar pelo design ótico de lentes Macro focal (MF) (proveniente do inglês, *macrofocal*) ou por PS (proveniente do inglês, *procedural surfaces*) [42]. Optou-se por implementar lentes MF nas funções pisca, nevoeiro e stop/ presença, uma vez que este tipo de design permite controlar o perfil de cada lente presente na malha, enquanto na função marcha-atrás, optou-se por lentes PS dado poder definir-se a espessura da malha. Ambas as curvaturas das lentes são definidas por *spreads*. Lentes com tamanho diferente foram

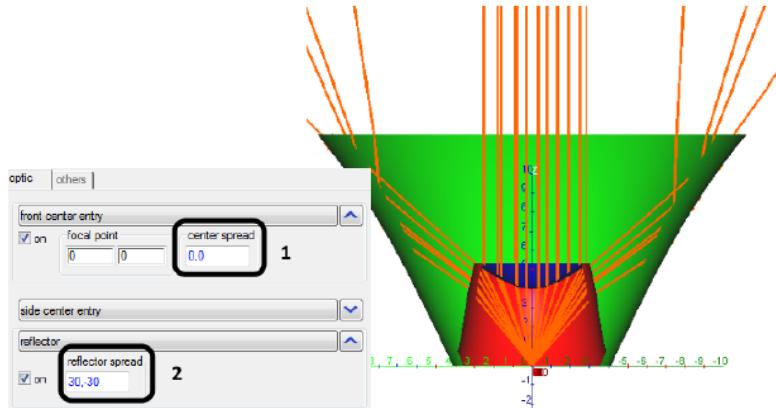


Figura 4.3: Este design ótico do colimador permite, por definição do *center spread*, considerar que os raios óticos estão centrados na origem e a parametrização *reflector spread* ($30^\circ, -30^\circ$) projetar angularmente a luz nesses ângulos. O plano frontal é constituído por um conjunto de planos convexo e frontal que permite direcionar a luz criando um foco de luz. Retirado de [41].

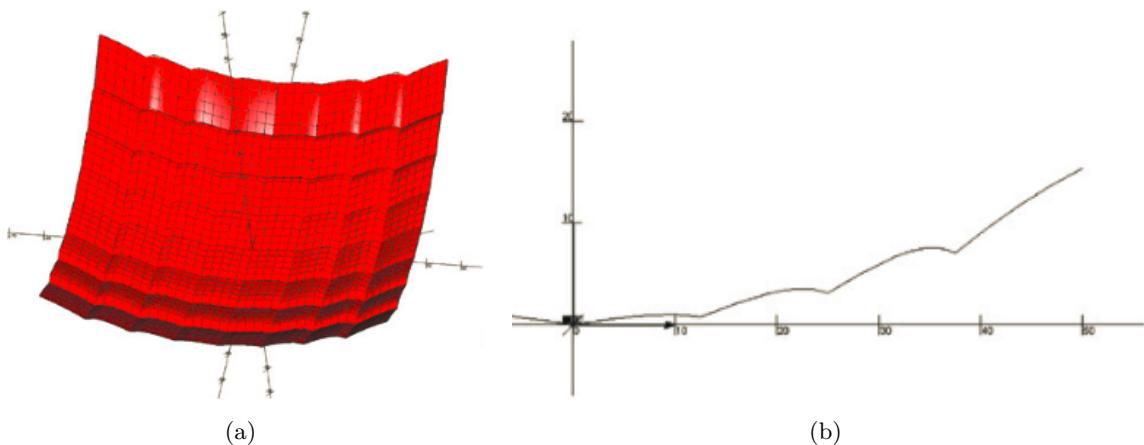


Figura 4.4: Figura 4.4(a) ilustra uma geometria 3D de uma lente por PS constituída por 8 faces em cada eixo, com *spread* a $\pm 20^\circ$ na componente horizontal e $\pm 15^\circ$ na componente vertical, enquanto a figura 4.4(b) ilustra a evolução da lente pelo *spread* definido segundo o eixo horizontal. Retirado de [42].

implementadas, dada a gama de valores de intensidade luminosa exigida para as diversas funções do equipamento tal como se analisará no capítulo 4.

Neste desenvolvimento, o polímero aplicado à frente da malha de lentes terá como funções divergir mais o feixe ótico e, em simultâneo, garantir a cor de emissão correspondente à estipulada pela normas de cor estabelecidas no regulamento [14]. O fluxograma ilustrado 4.5 ilustra o raciocínio desenvolvido em contexto de *LucidShape*.

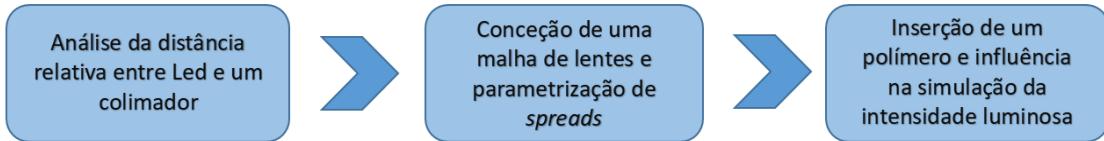


Figura 4.5: Fluxograma representativo da análise efetuada para a conceção do farolim.

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO INICIAL DO DESENVOLVIMENTO A IMPLEMENTAR

A análise efetuada a diversos tipos de lentes existentes na empresa, nomeadamente a lentes convencionais 4x2 mm na função Stop revelou a necessidade de implementar uma rede de colimadores, visto verificar-se uma vasta divergência angular com a criação de *spots* no plano central e a $\pm 20^\circ$, tal como a figura 4.6 ilustra. A distribuição luminosa e os pontos de intensidade luminosa detalhados neste capítulo são obtidos pelo varrimento angular de um sensor. Em *LucidShape*, um sensor de intensidade luminosa efetua um varrimento angular ao longo de um eixo perpendicular ao do feixe ótico (neste caso, ao longo do eixo Y).

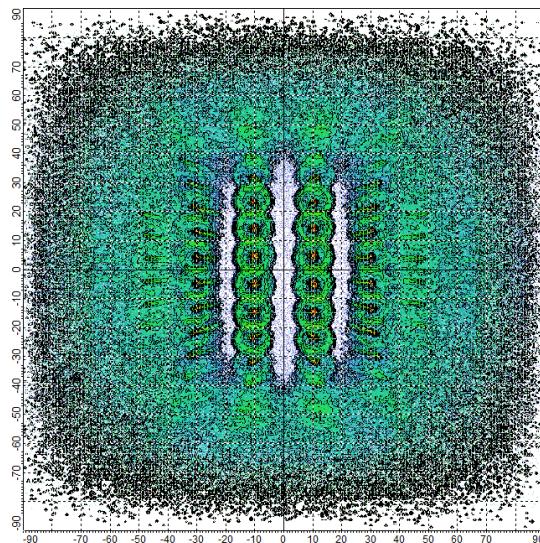


Figura 4.6: Simulação em *LucidShape* a representar a distribuição luminosa para a função Stop com uma lente convencional 4x2 mm com uso de Top leds.

A criação de *spots* provém da distância a que os LEDs se encontram da malha de lentes e da sua abertura angular. Uma aproximação dos LEDs à malha promoveria uma distribuição de luz mais homogénea. Deste modo, iniciou-se o resultado de implementar uma rede de colimadores, entre os LEDs e a malha de lentes, com o sensor a efetuar o varrimento angular. A primeira etapa consistiu em implementar-se uma rede de colimadores, constituída por PC, com parametrização *reflector spread* $(-10,10)^\circ$ e ângulo de linha de 10° . A figura 4.7(a) ilustra a distribuição luminosa da malha de colimadores com parametrização descrita.

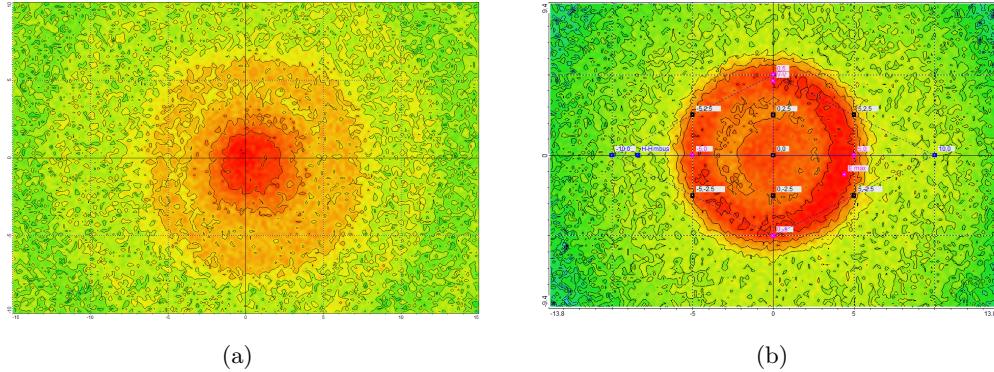


Figura 4.7: A figura 4.7(a) ilustra a radiação de saída proveniente de uma rede de colimadores com parametrização $(-10,10)^\circ$ e ângulo de linha 10° , mas pretendia-se uma maior concentração de luz. Para tal, diminuíram-se os parâmetros, concebendo-se uma malha de colimadores com parametrização $(-5,5)^\circ$ e ângulo de linha 5° . A homogeneidade de distribuição pretendida é ilustrada na figura 4.7(b) com ilustração dos pontos requeridos para a função nevoieiro [13].

Compara-se a distribuição luminosa para diferentes tamanhos de lente. A figura 4.8(a) ilustra a distribuição de luz no espaço com uma rede de colimadores já embutida no sistema ótico para uma malha de lentes 4×2 mm, apresentando uma distribuição luminosa simétrica mas em termos de intensidade luminosa heterogénea.

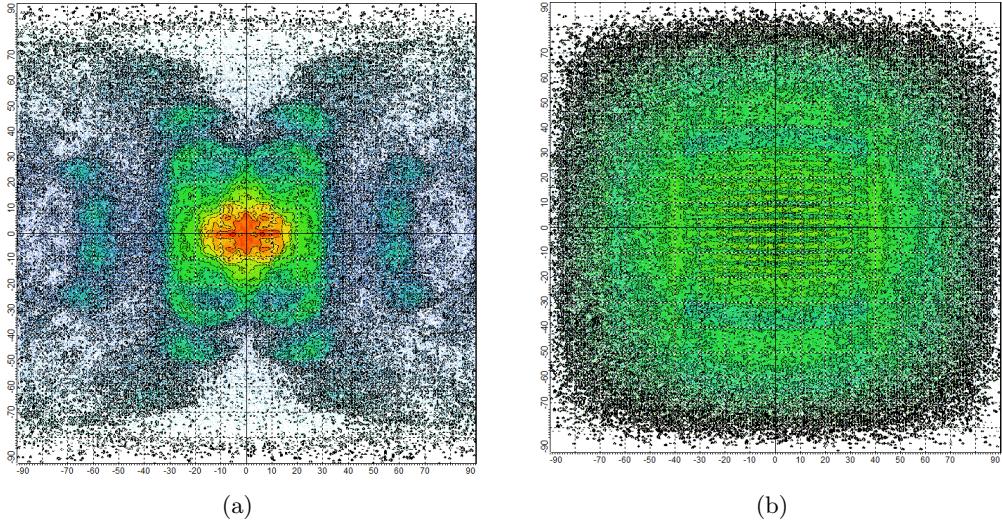


Figura 4.8: Figura 4.8(a) ilustra a distribuição luminosa para a função Stop para uma malha de lentes 4×2 mm, com uma malha de colimadores adicionada no sistema ótico e a figura 4.8(b) ilustra a distribuição luminosa nas mesmas condições da simulação anterior com uma lente 1.31×1 mm.

A análise da figura 4.8(b) mostra uma distribuição com maior projeção angular. Nesta simulação, o tamanho de lente da malha foi diminuído, de modo a ter uma lente mais côncava e a promover distribuição de luz de forma mais homogénea relativamente à distribuição luminosa da figura 4.8(a). Esta diminuição do tamanho de lente promove uma maior abrangência angular. A malha de lentes foi desenhada com um tamanho de 1,31 mm horizontalmente e 1

mm, na componente vertical.

4.2 DESCRIÇÃO DAS FUNÇÕES IMPLEMENTADAS

4.2.1 Função Nevoeiro

A função nevoeiro consistiu em aproximar a PCB constituída por PowerTop LEDs vermelho à rede de colimadores de 0,2 mm, numa malha de lentes 4x2 mm com uma parametrização de *spreads* (-10,-5,0,5,10)U e (4,5;-4,5)V, com um polímero de PMMA à frente. A distribuição luminosa e o espetro obtido para a função nevoeiro estão representados nas figuras 4.9 e 4.10, respectivamente.

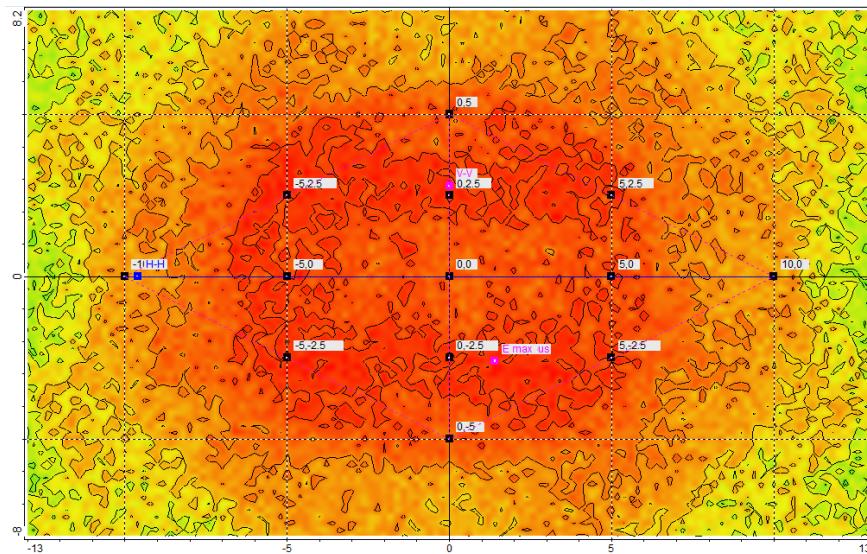


Figura 4.9: Distribuição luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho. O gráfico ilustra um espetro simétrico e homogéneo.

Ângulos Luminosos ($^{\circ}$)	-10	-5	0	5	10
5			300 cd 199 cd 150 cd		
2.5		300 cd 253 cd 75 cd	300 cd 244 cd 150 cd	300 cd 263 cd 75 cd	
0	300 cd 160 cd 150 cd	300 cd 255 cd 150 cd	300 cd 200 cd 150 cd	300 cd 245 cd 150 cd	300 cd 173 cd 150 cd
-2.5		300 cd 237 cd 75 cd	300 cd 281 cd 150 cd	300 cd 253 cd 75 cd	
-5			300 cd 193 cd 150 cd		

Figura 4.10: Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho. A intensidade luminosa medida no ponto H-V cumpre o estipulado.

Em sentido contrário, a PCB de Top LEDs vermelho, na parametrização definida na malha de lentes para Power Top LEDs, ilustra uma intensidade de luz focada no plano central,

não alcançando os ângulos a $\pm 10^\circ$ U e $\pm 5^\circ$ V. A distribuição de luz e o espetro obtido para a função nevoeiro com Top LEDs estão representados nas figuras 4.11 e 4.12, respectivamente. Foi considerada uma aproximação de 0,7 mm.

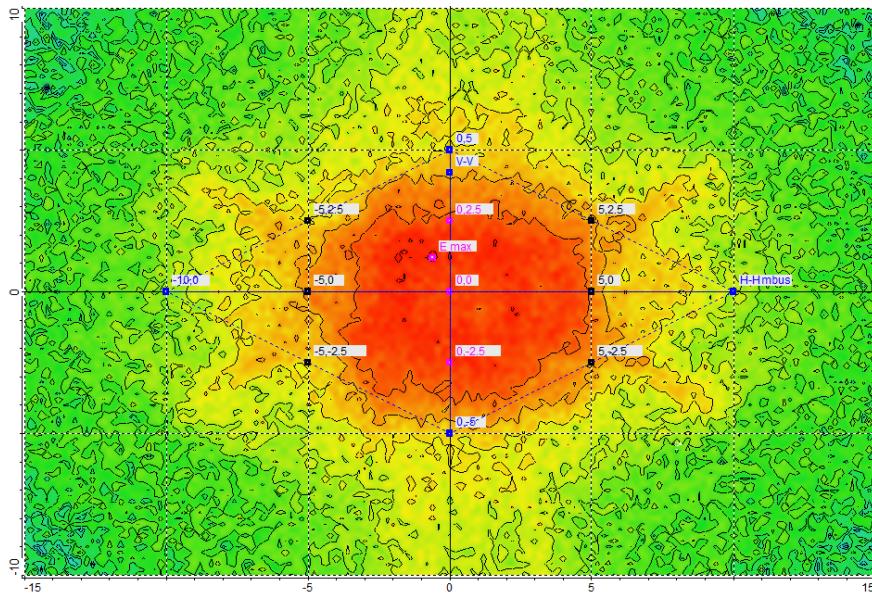


Figura 4.11: Gráfico de distribuição luminosa para uma PCB de Top LEDs vermelho. É verificada uma distribuição luminosa bastante simétrica, no entanto a radiação encontra-se focada no plano central, não alcançando os ângulos a $\pm 10^\circ$ U e $\pm 5^\circ$ V essenciais para cumprimento do regulamento 148 [14].

Ângulos Luminosos (º)	-10	-5	0	5	10
5			300 cd		
			127 cd		
			150 cd		
2.5			300 cd	300 cd	
			98 cd	184 cd	
			75 cd	75 cd	
0	300 cd				
	57 cd	217 cd	322 cd	208 cd	40 cd
	150 cd				
-2.5			300 cd	300 cd	
			127 cd	180 cd	
			75 cd	75 cd	
-5			300 cd		
			122 cd		
			150 cd		

Figura 4.12: Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de Top LEDs vermelho [14]. Valores a vermelho representam intensidades luminosas abaixo do valor mínimo, enquanto valores a azul representam valores acima do requerido como é caso do ponto H-V.

4.2.2 Função Stop/Presença

A função stop/ presença tem na sua base, o mesmo espetro de intensidade luminosa, embora exija diferentes valores de intensidade nos pontos de distribuição luminosa necessários para cumprimento do regulamento 148 [14]. Tal como na função prévia, estudou-se o efeito de

aproximar a PCB com Top LEDs vermelho à rede de colimadores, considerando-se para tal uma aproximação de 0,2 mm, numa malha de lentes 1,31x1 mm com uma parametrização de spreads (-10,10)U e (4,-4)V e um polímero de PMMA à frente.

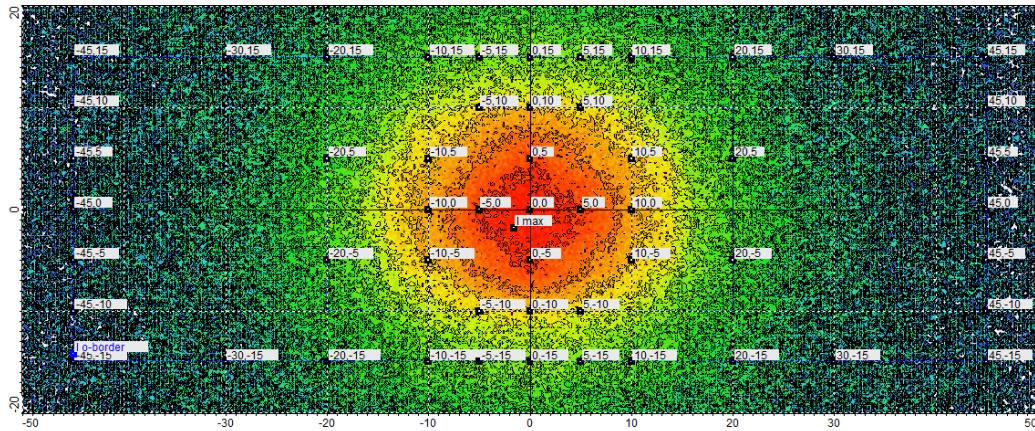


Figura 4.13: Distribuição luminosa para a função Stop tendo como fonte luminosa uma PCB com Top LEDs vermelho. O gráfico ilustra uma distribuição luminosa homogénea. Ao centro, o valor centra-se na gama de valores definida.

<u>Ángulos Luminosos (º)</u>	-45	-20	-10	-5	0	5	10	20	45
15	260 cd 1,5 cd 0,3 cd								260 cd 1,5 cd 0,3 cd
10				260 cd 60 cd 12 cd		260 cd 42 cd 12 cd			
5	260 cd 14 cd 6 cd	260 cd 71 cd 12 cd		260 cd 159 cd 42 cd		260 cd 66 cd 12 cd	260 cd 9 cd 6 cd		
0		260 cd 76 cd 21 cd	260 cd 137 cd 54 cd	260 cd 210 cd 60 cd	260 cd 163 cd 54 cd	260 cd 79 cd 21 cd			
-5	260 cd 7 cd 6 cd	260 cd 58 cd 12 cd		260 cd 160 cd 42 cd		260 cd 59 cd 12 cd	260 cd 12 cd 6 cd		
-10				260 cd 53 cd 12 cd		260 cd 57 cd 12 cd			
-15	260 cd 1 cd 0,3 cd								260 cd 1 cd 0,3 cd

Figura 4.14: Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de Top LEDs vermelho.

De notar que, com PowerTop LEDs consegue-se alcançar perfeitamente as intensidades necessárias para homologação dada a configuração atual da malha de lentes imposta. O fluxo luminoso de PowerTop LEDs vermelho é superior ao do Top LED, segundo a tabela 3.1, o que permitirá ter um maior brilho e mais intensidade de acordo com a equação 2.1. A análise seguiu-se para uma PCB com PowerTop LEDs vermelho com cúpula, dada a sua menor abertura angular. A PCB manteve-se no plano $z = 0$ mm.

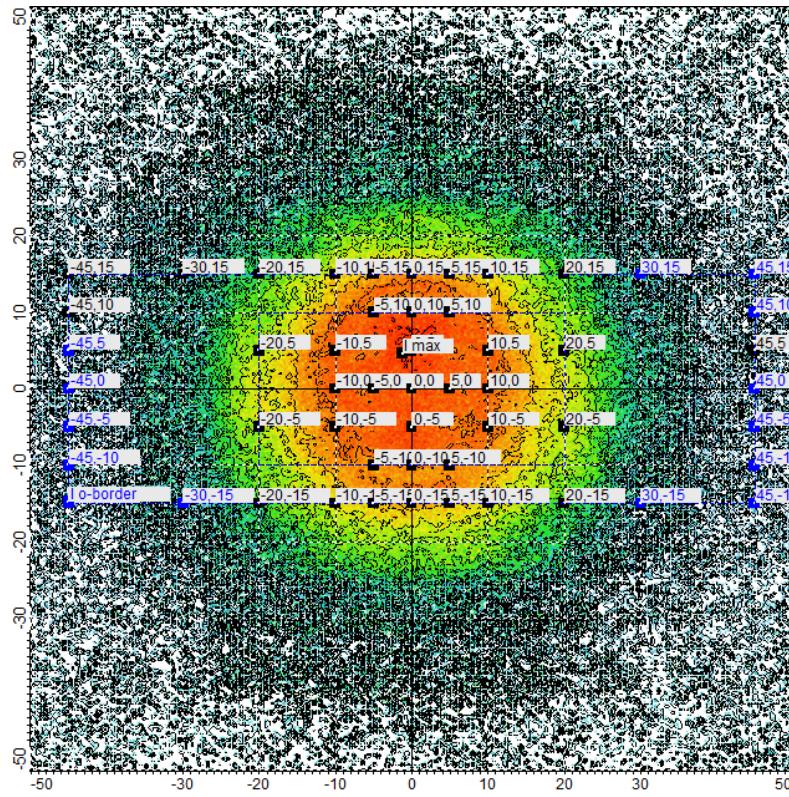


Figura 4.15: Gráfico de distribuição luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho com cúpula. Proveniente da menor distribuição angular dos LEDs, a partir dos $\pm 30^\circ$ U a radiação apresenta distribuição de luz residual.

Ángulos Luminosos (º)	-45	-20	-10	-5	0	5	10	20	45
15	260 cd 0,69 cd 0,3 cd								260 cd 0 cd 0,3 cd
10				260 cd 62 cd 12 cd		260 cd 78 cd 12 cd			
5	260 cd 20 cd 6 cd	260 cd 64 cd 12 cd		260 cd 85 cd 42 cd			260 cd 102 cd 12 cd	260 cd 15 cd 6 cd	
0		260 cd 96 cd 21 cd	260 cd 86 cd 54 cd	260 cd 62 cd 60 cd	260 cd 93 cd 54 cd	260 cd 62 cd 21 cd			
-5	260 cd 12 cd 6 cd	260 cd 71 cd 12 cd		260 cd 79 cd 42 cd			260 cd 81 cd 12 cd	260 cd 7,4 cd 6 cd	
-10				260 cd 72 cd 12 cd		260 cd 48 cd 12 cd			
-15	260 cd 0 cd 0,3 cd								260 cd 0 cd 0,3 cd

Figura 4.16: Espetro de intensidade luminosa medido segundo o regulamento 148 para uma PCB de PowerTop LEDs vermelho com cúpula. No ponto H-V, a intensidade luminosa simulada é de 62 cd sendo ligeiramente superior ao mínimo requerido. Valores sinalizados a vermelho correspondem a intensidades inferiores ao mínimo estipulado.

4.2.3 Função Marcha-Atrás

Nesta secção, a função requereu uma análise detalhada em termos óticos, visto que o espetro de intensidade luminosa abrange ângulos de intensidade luminosa a 45° , com um valor de intensidade de 15 cd. Dado os valores de intensidade luminosa altos para a projeção angular pretendida, optou-se pela conceção de uma PCB com PowerTop LEDs branco aproximados à rede de colimadores por 0,1 mm. Verificou-se que a malha de lentes de tamanho 2, 43x1, 18 mm com *spreads* (-48,48)U e (8,45;-8,45)V funciona.

A figura 4.17 mostra a distribuição de intensidade luminosa para a malha definida.

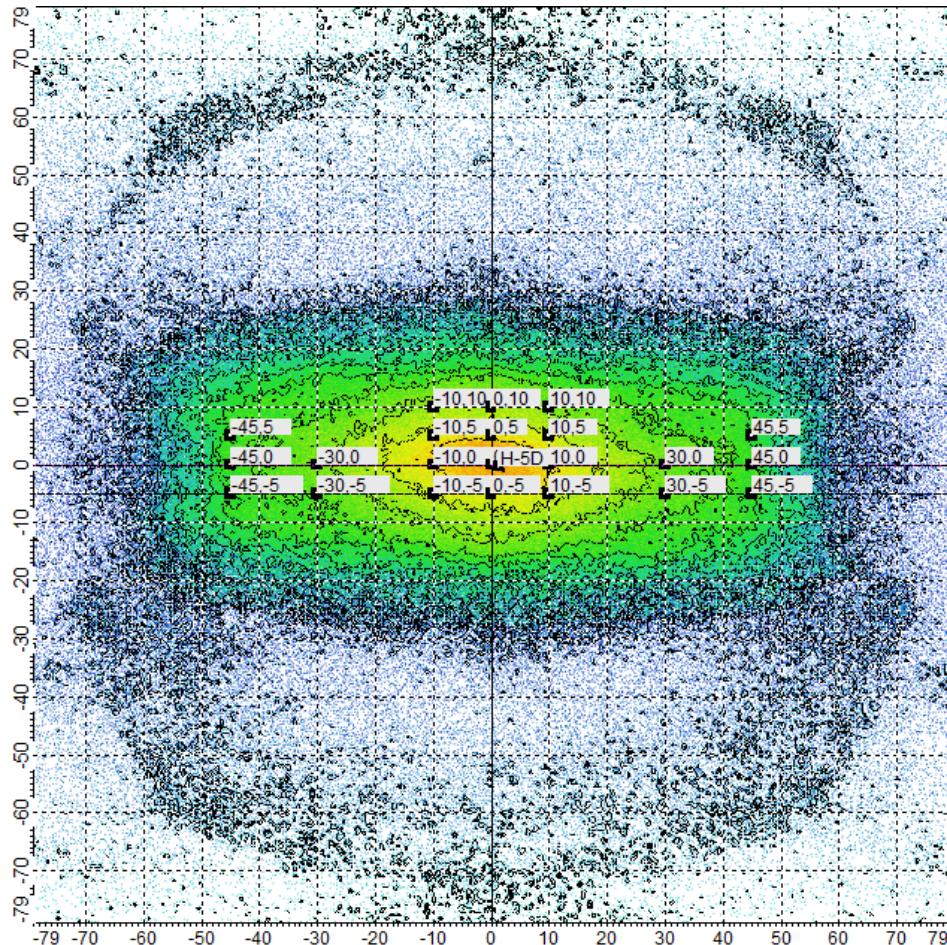


Figura 4.17: Distribuição luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs branco. O espetro de luz mostra um espetro característico da função, graças ao *spread* horizontal, que permitiu projetar luz até $\pm 45^\circ$ U. O *spread* vertical permitiu compactar a luz até ao plano $\pm 10^\circ$.

Ângulos luminosos (°)	-45	-30	-10	0	10	30	45
10				300 cd	300 cd	300 cd	
				47 cd	41 cd	37 cd	
				10 cd	15 cd	10 cd	
5	300 cd			300 cd	300 cd	300 cd	300 cd
				69 cd	83 cd	87 cd	19 cd
				20 cd	25 cd	20 cd	15 cd
0	300 cd	300 cd	90 cd	300 cd	300 cd	300 cd	300 cd
				20 cd	144 cd	99 cd	24 cd
				15 cd	50 cd	50 cd	15 cd
-5	600 cd						
				17 cd	89 cd	67 cd	18 cd
				15 cd	25 cd	50 cd	15 cd

Figura 4.18: Espetro de intensidade luminosa simulado para uma PCB de PowerTop LEDs branco, segundo o regulamento 148 [14]. A função cumpre em todos os pontos do espetro.

Para a mesma malha, efetuou-se uma simulação com uma PCB de Top LEDs brancos, mostrando a distribuição luminosa e os pontos de distribuição luminosa para os quais não se cumprem as intensidades requeridas. A PCB foi aproximada 0,1 mm à malha de colimadores.

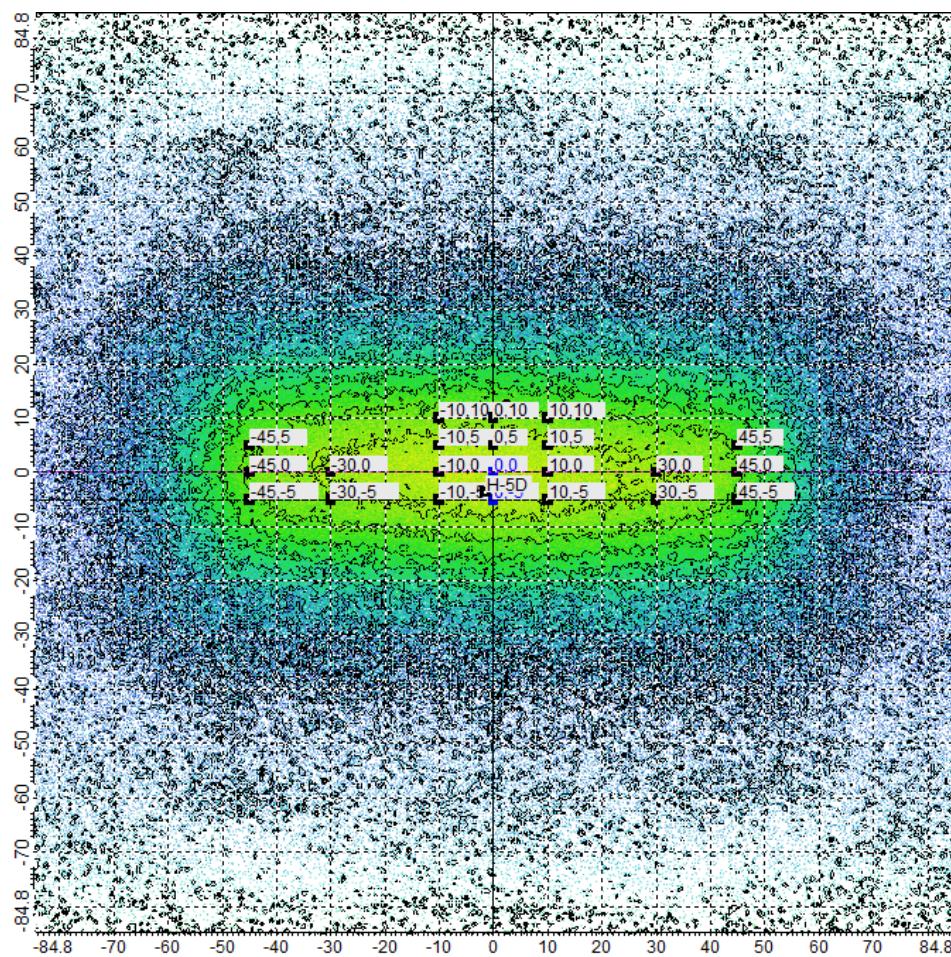


Figura 4.19: Distribuição luminosa da função Marcha-atrás para uma PCB de Top LEDs branco. Gráfico com distribuição homogénea de luz.

Ângulos luminosos (°)	-45	-30	-10	0	10	30	45
10				300 cd 58 cd 10 cd	300 cd 43 cd 15 cd	300 cd 47 cd 10 cd	
5	300 cd 41 cd 15 cd			300 cd 99 cd 20 cd	300 cd 80 cd 25 cd	300 cd 55 cd 20 cd	300 cd 31 cd 15 cd
0	300 cd 39 cd 15 cd	300 cd 59 cd 25 cd	300 cd 83 cd 50 cd	300 cd 65 cd 80 cd	300 cd 78 cd 50 cd	300 cd 58 cd 25 cd	300 cd 53 cd 15 cd
-5	600 cd 31 cd 15 cd	600 cd 49 cd 25 cd	600 cd 77 cd 50 cd	600 cd 74 cd 80 cd	600 cd 68 cd 50 cd	600 cd 58 cd 25 cd	600 cd 34 cd 15 cd

Figura 4.20: Espetro de intensidade luminosa para a função Marcha-Atrás para uma PCB com Top LEDs branco. Valores a vermelho ilustram pontos requeridos para homologação abaixo do valor mínimo.

4.2.4 Função Pisca

A função Pisca apresentou um bom comportamento, nos ângulos de intensidade luminosa pretendidos. A 80° a função requer uma intensidade luminosa mínima de 0,3 cd. Para uma PCB com PowerTop LEDs âmbar, verificou-se que uma malha de lentes 3,4x1,54 mm, com spreads (-40,40)U e (15,-15)V, com uma aproximação de 0,35 mm à malha de colimadores funcionava. A figura 4.21 mostra o comportamento da radiação à saída do polímero de PMMA definido.

Na mesma linha de raciocínio, a figura 4.22 mostra o espetro de intensidade luminosa obtido para um pisca traseiro direito, alcançando-se os pontos de intensidade a 80°.

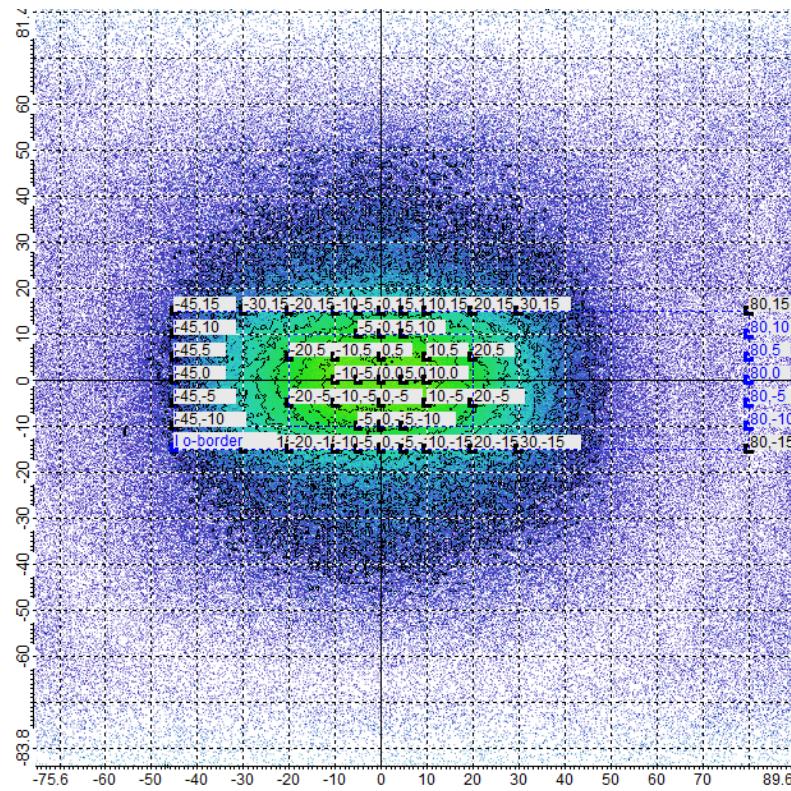


Figura 4.21: Distribuição luminosa para a função Pisca com uma PCB de PowerTop LEDs âmbar. A distribuição luminosa concentra-se em $\pm 30^\circ$ e $\pm 15^\circ$. A 80° , os valores requeridos são residuais, analisando-se somente o espetro de intensidade luminosa segundo o regulamento 148.

Ângulos luminosos ($^\circ$)	-45	-20	-10	-5	0	5	10	20	80
15	500 cd 4,1 cd 0,3 cd								500 cd 1,7 cd 0,3 cd
10				500 cd 72 cd 10 cd		500 cd 56 cd 10 cd			
5		500 cd 38 cd 5 cd	500 cd 90 cd 10 cd		500 cd 97 cd 35 cd		500 cd 105 cd 10 cd	500 cd 44 cd 5 cd	
0				500 cd 104 cd 17,5 cd	500 cd 118 cd 45 cd	500 cd 135 cd 50 cd	500 cd 128 cd 45 cd	500 cd 130 cd 17,5 cd	
-5				500 cd 33 cd 5 cd	500 cd 100 cd 10 cd	500 cd 85 cd 35 cd		500 cd 138 cd 10 cd	500 cd 69 cd 5 cd
-10					500 cd 69 cd 10 cd		500 cd 72 cd 10 cd		
-15									500 cd 1,7 cd 0,3 cd

Figura 4.22: Espetro de intensidade luminosa para uma PCB de PowerTop LEDs âmbar cumprindo o regulamento 148 [14]. No ponto H-V, cumpre-se confortavelmente o exigido e a 80° os valores são superiores a 0,3 cd, cumprindo o regulamento [14].

Analisou-se para uma PCB com Top LEDs âmbar localizada a 0,35 mm da malha de colimadores. A figura 4.23 mostra a distribuição luminosa para a PCB em análise e a figura 4.24 ilustra o espetro obtido.

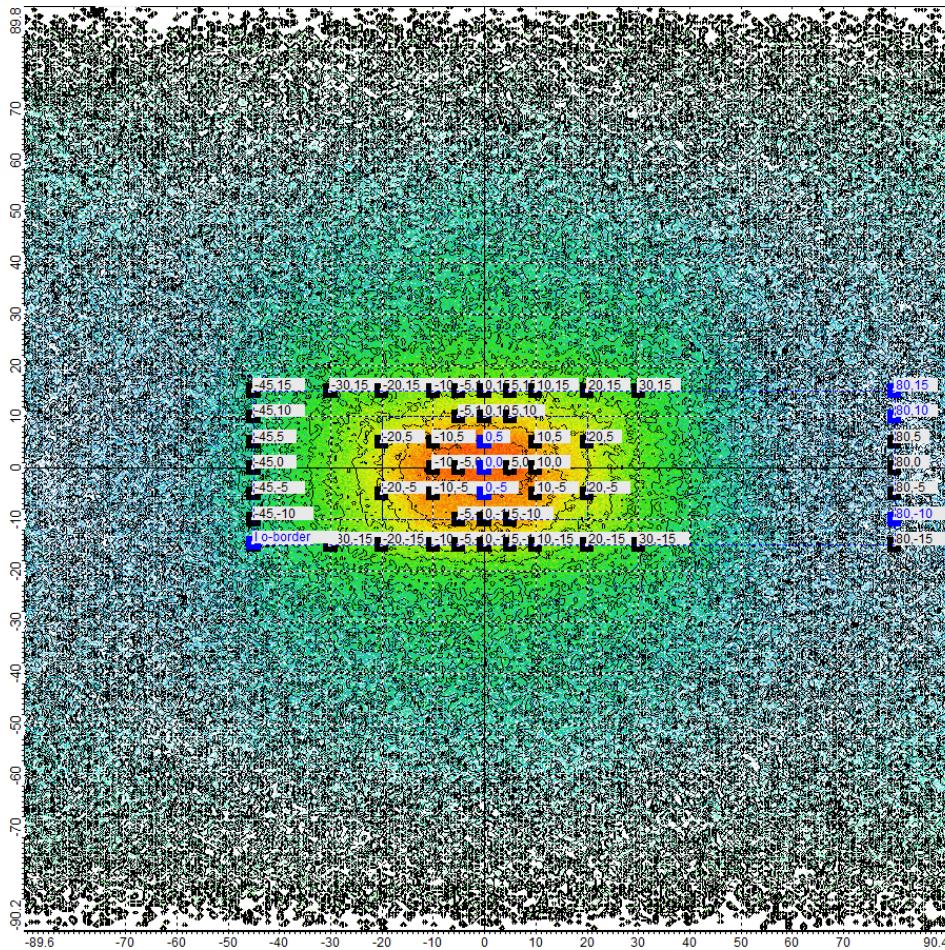


Figura 4.23: Distribuição luminosa para uma PCB com Top LEDs âmbar. Embora a distribuição esteja mais homogénea no espetro, no plano central não são verificadas as intensidades luminosas mínimas. Esta diminuição face à distribuição luminosa anterior (figura 4.21) provém de um fluxo luminoso, usado em simulação, menor.

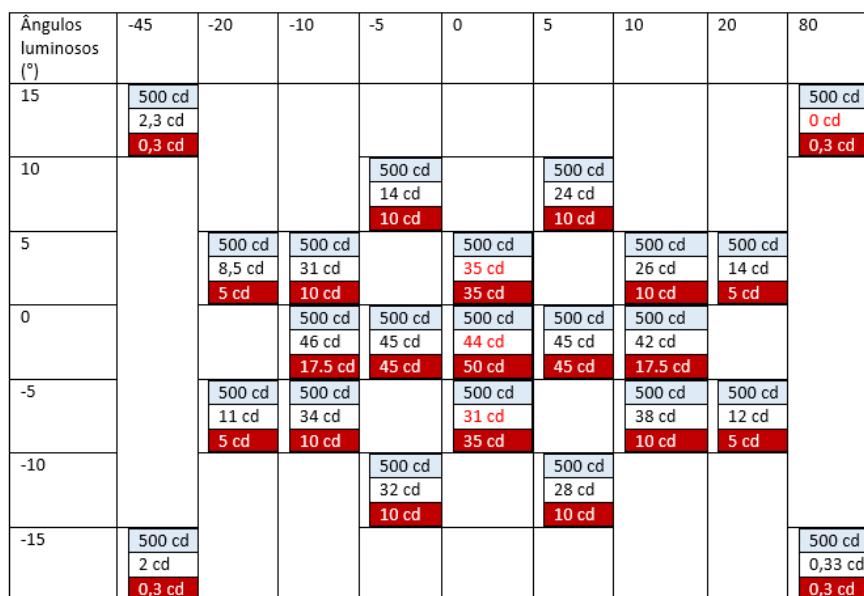


Figura 4.24: Espetro obtido para o sistema ótico com uma PCB de Top LEDs âmbar. No plano central, observam-se pontos de intensidade inferiores ao mínimo requerido para o regulamento 148 [14].

CAPÍTULO 5

Conclusão e Trabalho Futuro

Na realização deste projeto, alcançou-se o principal objetivo ao conceber-se um farolim para homologação. Durante o seu desenvolvimento, foram analisadas diversas etapas que permitisse à empresa confiar na progressão do projeto.

Pela caracterização dos LEDs e materiais disponíveis pela empresa, foi possível estabelecer um compromisso necessário em termos de propagação e projeção angular da luz, recorrendo ao *LucidShape* para confirmar valores de intensidade luminosa. A análise dos espetros obtidos para Top LEDs, PowerTop LEDs e PowerTop LEDs com cúpula para as cores vermelha, branca e âmbar, permitiu analisar as propriedades óticas dos mesmos e, deste modo, analisar-se a influência da cor do material nas propriedades colorimétricas da radiação de saída.

A inserção de uma rede de colimadores alavancou o projeto, graças ao processo ótico inerente de reflexão e de fluxo direcional da luz, criando um espetro homogéneo de radiação. Deste modo, garantir a projeção angular recaiu sobre a malha de lentes a desenvolver-se. O polímero de saída (vidro exterior no desenho técnico), de índice de refração menor comparativamente à da malha de lentes, permitiu projetar ainda mais alguma luz residual.

Para tal, diversos tipos de lentes foram analisadas, implementando-se lentes esféricas plano convexas, com diferentes tamanhos e *spreads*. Deste modo, foram desenhadas lentes com tamanho 4x2 mm com *spreads* (-10,-5,0,5,10)U e (4,5;-4,5)V para a função nevoeiro, lentes 1,31x1 mm com *spreads* (-10,10)U e (4,-4)V para a função stop/ presença, lentes 2,43x1,18 mm com *spreads* (-48,48)U e (8,45;-8,45)V para a função marcha-atrás e lentes com tamanho 3,4x1,54 mm com *spreads* (-40,40)U e (15,-15)V para a função pisca, cumprindo o regulamento atualmente em vigor [14].

A análise da influência da cor do material na radiação de saída da função permitiu definir uma série de combinações entre LEDs e cor do material que possibilitassem a homologação deste farolim. Por uma questão de design ótico, o caso ideal seria manter para as funções stop, presença e nevoeiro um polímero de saída com cor vermelha, para a função marcha-atrás um polímero com cor de saída branca e, na função pisca, um polímero com cor de saída âmbar.

Por fim, a próxima etapa deste projeto seria direcionada para o Departamento Técnico

onde se procederia à preparação das PCBs e à preparação de moldes para a base do farolim, para os colimadores e lentes necessárias. O polímero de saída seria produzido em empresa externa, com a qual a SIM costuma encomendar.

Referências

- [1] SIM. Acesso: 3 Junho 2024. URL: <https://www.sim-sa.com/>.
- [2] Burkard Wördenerweber et al. *Automotive lighting and human vision*. Vol. 1. Springer, 2007.
- [3] JR Martínez-Pérez et al. «LED biasing scheme with thermal compensation for automotive industry applications». Em: *Results in Engineering* 21 (2024), p. 101699.
- [4] Philip W Maurer. *History of automotive lighting in Europe*. Rel. téc. SAE Technical Paper, 1980.
- [5] Wolfgang Huhn e Guenter Hege. *High Intensity Discharge Headlamps (HID)-Experience for More Than 3-1/2 Years of Commercial Application of Litronic Headlamps*. Rel. téc. SAE technical paper, 1995.
- [6] Chan-Chuan Wen et al. «A Study of Optical Design of Automotive Lighting System with Laser Source». Em: *Journal of Internet Technology* 21.7 (2020), pp. 2039–2044.
- [7] M.Rice Lawrence e Osram Sylvania. «LED Illumination for Commercial Vehicles». Em: (2010).
- [8] «Optical design of LED-based automotive headlamps». Em: *Optics Laser Technology* 45 (2013), pp. 262–266. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.05.040>.
- [9] Muhsin Kilic, Mehmet Aktas e Gokhan Sevilgen. «Liquid cooling performance of the single and multi led circuit boards used in automotive lighting systems». Em: *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. IEEE. 2019, pp. 1–5.
- [10] United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 6: Uniform Provisions Concerning the Approval of Direction Indicators for Motor Vehicles and their Trailers*. 2020. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2020/R006r7e.pdf> (acedido em 03/06/2024).
- [11] United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 7: Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Installation of Lighting and Light-Signalling Devices*. 2020. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2020/R007r7e.pdf> (acedido em 03/06/2024).
- [12] United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 23: Uniform provisions concerning the approval of pneumatic tyres for motor vehicles and their trailers*. 2020. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2020/R023r5e.pdf> (acedido em 03/06/2024).
- [13] United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 38: Uniform Provisions Concerning the Approval of Retro-Reflecting Devices for Power-Driven Vehicles and their Trailers*. 2022. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2022-09/R038r4e%20%282%29.pdf> (acedido em 03/06/2024).
- [14] United Nations Economic Commission for Europe. *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the installation of light-signalling devices*. Accessed: 2024-06-07. 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R148e.pdf>.
- [15] United Nations Economic Commission for Europe. *Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles with regard to the installation of tyres*. Accessed: 2024-06-07. 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R149e.pdf>.
- [16] United Nations Economic Commission for Europe. *Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Road Safety of Autonomous Vehicles*. Accessed: 2024-06-07. 2021. URL: <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R150e.pdf>.

- [17] Ian Ashdown e P Eng. «Photometry and radiometry». Em: *President by Heart Consultants Limited* (2002).
- [18] James M Palmer. «Radiometry and photometry: Units and conversions». Em: *Handbook of Optics 3* (2010), pp. 7–1.
- [19] Stefaan Pommé. «The uncertainty of counting at a defined solid angle». Em: *Metrologia* 52.3 (2015), S73.
- [20] James M Palmer e Lewis Carroll. «Radiometry and photometry FAQ». Em: URL: <http://www.optics.arizona.edu/Palmer/rpfag/rpfag.htm#motivation> (1999).
- [21] James M Palmer. «The measurement of transmission, absorption, emission, and reflection». Em: *Handbook of optics 2* (1995), pp. 25–1.
- [22] Giampietro Casasanta e Roberto Garra. «Towards a generalized Beer-Lambert law». Em: *Fractal and Fractional* 2.1 (2018), p. 8.
- [23] MD Sharma. «Snell's law at the boundaries of real elastic media». Em: *Math. Stud.* 84.3–4 (2015), pp. 75–94.
- [24] V.P. Torchigin e A.V. Torchigin. «The momentum of an electromagnetic wave inside a dielectric derived from the Snell refraction law». Em: *Annals of Physics* 351 (2014), pp. 444–446. ISSN: 0003-4916. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aop.2014.08.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003491614002425>.
- [25] Prasanna Venkatesan Srinivasan et al. «Light as a Service—Techniques, Applications, Challenges in Automotive industry». Em: *2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18)*. IEEE. 2023, pp. 1–5.
- [26] Ching-Cherng Sun et al. «Review of optical design for vehicle forward lighting based on white LEDs». Em: *Optical Engineering* 60.9 (2021), pp. 091501–091501.
- [27] M Brandl. «Thin spherical lenses». Em: *Retrieved February 21* (2002), p. 2014.
- [28] M. A. Hardy e A. Aslam. «Chapter 5: Optical Radiation Metrology and Uncertainty». Em: *InTech Open* (2018).
- [29] O.E. Meslouhi et al. «Automatic detection and inpainting of specular reflections for colposcopic images». Em: 1 (set. de 2011), pp. 341–354. DOI: <10.2478/s13537-011-0020-2>.
- [30] Yatish Parauha e S J Dhoble. «Enhancement of photoluminescence and tunable properties for Ce³⁺, Eu²⁺ activated Na₂CaSiO₄ downconversion phosphor:» em: *Journal of Luminescence* 251 (ago. de 2022), p. 119173. DOI: <10.1016/j.jlumin.2022.119173>.
- [31] Bharat Bhushan. «Surface roughness analysis and measurement techniques». Em: *Modern tribology handbook, two volume set*. CRC press, 2000, pp. 79–150.
- [32] Milan Milosevic. «Internal reflection and ATR spectroscopy». Em: *Applied Spectroscopy Reviews* 39.3 (2004), pp. 365–384.
- [33] Jiuyang Zhao e Jacqueline M Cole. «Reconstructing chromatic-dispersion relations and predicting refractive indices using text mining and machine learning». Em: *Journal of Chemical Information and Modeling* 62.11 (2022), pp. 2670–2684.
- [34] Nina Sultanova, S Kasarova e Ivan Nikolov. «Dispersion properties of optical polymers». Em: *Acta Physica Polonica A* 116.4 (2009), pp. 585–587.
- [35] Daniel J Brunelle. «Polycarbonates». Em: *Encyclopedia of polymer science and technology* (2002).
- [36] Stefka Nikolova Kasarova et al. «Analysis of the dispersion of optical plastic materials». Em: *Optical Materials* 29.11 (2007), pp. 1481–1490.
- [37] Sebastian Ślomiński. «Advanced modelling and luminance analysis of LED optical systems». Em: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* 67.6 (2019).

- [38] Daniel Karg et al. «Development of photometric criteria for the design of registration plate illumination systems using light simulation methods». Em: (2024).
- [39] Jorge Manuel Mercado-Colmenero et al. «A new conformal cooling system for plastic collimators based on the use of complex geometries and optimization of temperature profiles». Em: *Polymers* 13.16 (2021), p. 2744.
- [40] Andreas Bielawny. «Reflectors in lighting design: reflector-based non-imaging optics for lighting applications». Em: *Advanced Optical Technologies* 8.6 (2019), pp. 469–481.
- [41] LucidShape Development Team. *LucidShape User's Guide*. <https://www.synopsys.com/optical-solutions/lucidshape.html>. 2024.
- [42] Andreas Bielawny. «Reflectors in lighting design: reflector-based non-imaging optics for lighting applications». Em: *Advanced Optical Technologies* 8.6 (2019), pp. 469–481.