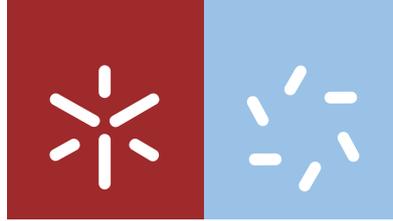




**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Ana Raquel de Pinho Moreira

**A Influência de Iluminação Colorida nos  
Parâmetros Acomodativos Oculares**



**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

Ana Raquel de Pinho Moreira

## **A Influência de Iluminação Colorida nos Parâmetros Acomodativos Oculares**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Optometria Avançada

Trabalho realizado sob orientação da  
**Professora Doutora Sandra Maria de Braga Franco**  
e do  
**Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares**

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

## Agradecimentos

---

É difícil transformar toda esta jornada em palavras, mas não posso deixar de agradecer a algumas pessoas, que à sua maneira, estiveram do meu lado e me ajudaram nesta caminhada tão importante na minha vida.

Em primeiro lugar agradeço ao mais importante que tenho no mundo, a minha família, mas em especial às pessoas que com esforço, sacrifício e dedicação tornaram isto possível. Agradeço aos meus pais e à minha irmã Sandra, pois sem vocês não seria a pessoa que sou hoje.

Um obrigado muito especial à minha pessoa de todas as horas, o Filipe. Obrigada pela paciência e apoio incansável.

Não posso esquecer as pessoas que mais me incentivaram nesta jornada. Obrigada pela amizade ao longo destes anos incríveis, que não teriam sido os mesmos sem vocês: Andreia Gomes, Andreia Pinho, Cristiana, Filipa, Jéssica, João e Simão. E ainda à minha Débora por a distância não significar nada quando a amizade é tudo.

Um obrigado à pessoa que desde o momento em que se cruzou comigo, sempre me encorajou a correr atrás dos meus sonhos e nunca desistir. Obrigada Vera, por tudo.

Aos meus orientadores, Professora Doutora Sandra Franco e Professor Doutor João Linhares o mais sincero obrigado pela paciência, disponibilidade, incentivo, mas sobretudo pelo conhecimento transmitido.

À Jéssica Gomes pela ajuda preciosa, mas principalmente pelo sorriso nas horas de aflição no laboratório. E não menos importante, à minha incansável ajudante, Márcia. Obrigada por todos os *tu és capaz* nos momentos de desespero.

Deixo, ainda, uma palavra de reconhecimento a todos os voluntários que foram sempre prestáveis no decorrer do trabalho.

O meu agradecimento às restantes pessoas maravilhosas que se foram cruzando comigo e de algum modo deixaram a sua marca, muitas vezes sem saber sequer a importância que isso teve para mim. E por último, mas não menos importante, às pessoas com quem tive e tenho o prazer de trabalhar e aprender dia após dia. Todos os dias, é um novo dia para aprender!

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PTDC/FIS-OTI/31486/2017.

**A todos o meu muito obrigada!**



**GOVERNO DE  
PORTUGAL**

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

## DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

### A Influência de Iluminação Colorida nos Parâmetros Acomodativos Oculares

Os sistemas de iluminação que utilizamos nas nossas tarefas diárias são um fator importante para o desempenho visual. Estes sistemas devem ser adequados às necessidades visuais exigidas por este tipo de tarefa. O objetivo deste estudo foi analisar a influência de determinados parâmetros da iluminação, nomeadamente a iluminância, cor e temperatura de cor, nos parâmetros acomodativos oculares.

Foram avaliados 26 sujeitos com idades compreendidas entre os 18 e os 35 anos, sem problemas acomodativos e com visão das cores normal. Primeiro, determinou-se o erro refrativo, os parâmetros acomodativos e de visão binocular de todos os participantes. De seguida, os parâmetros acomodativos foram determinados em diferentes condições de iluminação. Foi medida a amplitude de acomodação e flexibilidade acomodativa em diferentes níveis de iluminância (30lx, 150lx e 400lx), iluminação colorida (verde e vermelho) e em iluminações com diferentes temperaturas de cor correlacionada (2500 K e 4500 K) que procuravam mimetizar condições de luz do dia para temperaturas de cor correspondentes. Para a realização das medidas sob diferentes condições foi utilizada a lâmpada Ledigma (Ledigma Ltd, Vilnius, Lithuania).

Na variação da iluminância, verificou-se um aumento estatisticamente significativo na amplitude de acomodação dos 30lx para os 150lx ( $p < 0,001$ ; t-student test). A amplitude de acomodação medida com a iluminância de 400lx também apresentou um aumento estatisticamente significativo ( $p < 0,001$ ; t-student test) quando comparado à obtida com iluminância de 30lx. Contudo a amplitude de acomodação medida com a iluminância de 150lx não apresentou diferenças estatisticamente significativas quando compara à obtida com a iluminância de 400lx ( $p > 0,05$ ). Em termos de flexibilidade acomodativa, esta apresentou um aumento estatisticamente significativo dos 30lx para os 400lx ( $p < 0,001$ ; t-student test).

Relativamente à iluminação colorida, os valores de amplitude de acomodação apresentaram uma diminuição estatisticamente significativa com a iluminação vermelha, quando confrontados com os obtidos com a luz branca ( $p = 0,016$ ; t-student test). A amplitude de acomodação medida sob a iluminação vermelha, apresentou uma diminuição estatisticamente significativa quando comparada com a obtida com a cor verde ( $p < 0,001$ ; t-student test). No entanto, a amplitude de acomodação medida com a luz de cor verde não apresentou diferenças estatisticamente significativas quando comparada à obtida com a luz branca ( $p > 0,05$ ). Em termos de flexibilidade acomodativa, não foram encontrados valores estatisticamente significativos ( $p > 0,05$ ; t-student test) para as condições testadas. O mesmo aconteceu com a temperatura de cor, em que não foram encontrados valores estatisticamente significativos entre os 2500 K e os 4500 K ( $p > 0,05$ ; t-student test).

Os resultados encontrados sugerem uma associação entre alguns parâmetros acomodativos e condições de iluminação específica. Iluminação imprópria ou com parâmetros desajustados podem causar uma variação nos parâmetros acomodativos e gerar sintomatologia.

**Palavras-chave:** Acomodação ocular, Iluminação colorida, Iluminância, Temperatura de cor correlacionada

### The Influence of the Coloured Lighting on Ocular Accommodation

The lighting systems that is used in our daily tasks are an important factor in our vision performance. These systems must be suitable to the visual needs required by these types of tasks.

The aim of this work was to evaluate the influence of specific lighting parameters, in particular illuminance, color and color temperature, on ocular accommodative parameters.

Twenty-six subjects were accessed with ages between 18 and 35 years, without accommodative disorders and with normal vision color. First, refractive error, accommodative parameters and binocular vision of all the participants were measured. Then, the accommodative parameters were determined in different illumination conditions. The amplitude of accommodation and accommodative facility were measured under different illuminance levels (30lx, 150lx and 400lx), colored lighting (green and red) and under different correlated color temperature (2500K and 4500K) that trying to imitate daylight conditions for corresponding color temperatures. Measurements under the different conditions were done using a Ledigma luminary (Ledigma Ltd, Vilnius, Lithuania).

Considering the illuminance, there was a statistically significant increase in the amplitude of accommodation from 30lx to 150lx ( $p < 0.001$ ; t-student test). The amplitude of accommodation measured with 400lx illuminance also showed a statistically significant increase ( $p < 0.001$ ; t-student test) when compared to that obtained with 30lx illuminance. However, the amplitude of accommodation measured with the illuminance of 150lx didn't present statistically significant differences when compared to that obtained with the illuminance of 400lx ( $p > 0.05$ ). In terms of accommodative flexibility, this increased significantly from 30lx to 400lx ( $p < 0.001$ ; t-student test).

Regarding the colored lighting, the accommodation amplitude values presented significantly lower values with red lighting when compared with those obtained with white light ( $p = 0.016$ ; t-student test). Accommodation amplitude measured under red illumination, showed a statistically significant decrease when compared to that obtained with the green color ( $p < 0.001$ ; t-student test). However, the amplitude of accommodation measured with green light did not present statistically significant differences when compared to that obtained with white light ( $p > 0.05$ ). In terms of accommodative flexibility, no statistically significant values were found for the conditions tested ( $p > 0.05$ ; t-student test). The same happened to the color temperature, where no statistically significant values were found between 2500K and 4500K ( $p > 0.05$ ; t-student test).

Results seemed to show that particular light conditions influenced the amplitude of accommodation and accommodative facility. Improper lighting or inadequate parameters can cause a variation in accommodative parameters and cause symptomatology.

**Key words:** Colored lighting, Illuminance, Correlated color temperature, Ocular accommodation

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xiii
Abreviaturas e Acrónimos.....	xiv
Publicações e comunicações relacionadas com esta dissertação.....	xvi
<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 2 – Revisão bibliográfica.....</b>	<b>6</b>
2.1. Sistema Visual.....	6
2.1.1. Anatomia ocular.....	6
2.1.2. Meios de refração ocular.....	12
2.1.3. Acomodação.....	13
2.1.4. Aberrações oculares.....	15
2.2. Luz e cor.....	20
2.2.1. Visão escotópica e fotópica.....	21
2.2.2. Sensibilidade dos cones e bastonetes.....	22
2.2.3. Radiometria e fotometria.....	25
2.2.4. Iluminação.....	28
2.3. Impacto das propriedades da luz na visão.....	36
<b>Capítulo 3 - Material e Métodos.....</b>	<b>41</b>
3.1. Tipo de estudo.....	41
3.2. Caracterização da amostra.....	41
3.3. Material.....	42
3.4. Procedimento experimental.....	45

3.4.1. Exames preliminares .....	45
3.4.2. Avaliação da visão das cores.....	46
3.4.3. Avaliação do estado refrativo.....	46
3.4.4. Avaliação da visão binocular .....	46
3.4.5. Avaliação dos parâmetros acomodativos .....	47
3.5. Análise estatística.....	51
<b>Capítulo 4 - Resultados.....</b>	<b>53</b>
4.1. Caracterização da amostra .....	53
4.2. Análise dos parâmetros acomodativos em diferentes iluminâncias .....	56
4.3. Análise dos parâmetros acomodativos com diferentes cores de iluminação .....	59
4.4. Análise dos parâmetros acomodativos em diferentes temperaturas de cor.....	61
<b>Capítulo 5 – Discussão de resultados .....</b>	<b>64</b>
5.1. Iluminância .....	64
5.2. Cor .....	65
5.3. Temperatura de cor.....	71
<b>Capítulo 6 – Conclusões e trabalho futuro .....</b>	<b>73</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>74</b>
<b>Anexo 1: Consentimento Informado .....</b>	<b>84</b>
<b>Anexo 2: Tabela de aleatorização.....</b>	<b>86</b>

## Índice de Figuras

---

<b>Figura 1.</b> Representação de um corte transversal do globo ocular e seus principais constituintes. Adaptado de Shiland (2015) <sup>12</sup> .....	6
<b>Figura 2.</b> Representação de um corte transversal do olho com as principais estruturas anatómicas das camadas externa e intermédia do globo ocular. Adaptado de VanPutte (2013) <sup>13</sup> .....	7
<b>Figura 3.</b> Contração e dilatação da pupila, vista anterior. Adaptado de Marieb e Hoehn (2014) ..	8
<b>Figura 4.</b> Secção transversal das camadas da retina e as suas principais células. Adaptado de Marieb e Hoehn (2014) <sup>7</sup> .....	10
<b>Figura 5.</b> A - Estrutura dos cones (esquerda) e dos bastonetes (direita). "N" corresponde ao núcleo e o "M" as mitocôndrias. B - Segmentos externos dos cones e bastonetes. Adaptado de Schwartz (2010) <sup>21</sup> .....	11
<b>Figura 6.</b> Distribuição de bastonetes e cones na retina. Localização em graus em relação à fóvea. Adaptado de Schwartz (2010) <sup>21</sup> .....	12
<b>Figura 7.</b> Secção sagital do olho durante mecanismo de acomodação e não-acomodação: (A) não-acomodação; (B) acomodação. Adaptado de Benjamim (2007) <sup>4</sup> .....	13
<b>Figura 8.</b> Pirâmide de Zernike até à 4 <sup>o</sup> ordem, com respetivo nome e ordem. Os polinómios de Zernike estão ordenados verticalmente pela ordem radial e horizontalmente pela frequência angular. Adaptado de Resan (2012) <sup>40</sup> .....	17
<b>Figura 9.</b> Efeito geral da aberração cromática. Adaptado de Cholewiak (2017) <sup>47</sup> .....	18
<b>Figura 10.</b> Aberração cromática longitudinal do olho humano. Desfocagem relativa em dioptrias em função do comprimento de onda.....	19
<b>Figura 11.</b> Espectro eletromagnético, com respetivo intervalo da luz visível. Adaptado de Goldstein (2010) <sup>8</sup> .....	20
<b>Figura 12.</b> Linha tracejada: curva de sensibilidade espectral em visão escotópica (bastonetes). Linhas preenchidas: curvas de sensibilidade espectral dos três diferentes tipos de cones, S, M e L, responsáveis pela visão fotópica. Adaptado de Hunt (2011) <sup>50</sup> .....	22
<b>Figura 13.</b> Os gráficos à esquerda representam a sensibilidade relativa espectral dos cones e bastonetes nos diferentes tipos de visão. A linha vermelha representa a curva de sensibilidade relativa espectral dos cones L, a verde dos cones M e a azul dos cones S. A linha preta corresponde à sensibilidade relativa espectral fotópica (junção das curvas dos três tipos de cones) e a cinza	

corresponde à sensibilidade relativa espectral escotópica. Durante a visão mesópica ambos os fotorreceptores estão ativos. As imagens à direita ilustram as mudanças na visão conforme a adaptação do olho às condições de iluminação. Adaptado de Barbur (2010)<sup>55</sup> ..... 24

**Figura 14.** Eficiência luminosa dos bastonetes,  $V'(\lambda)$ , e dos cones,  $V(\lambda)$ , ou curvas de sensibilidade relativa espectral escotópica e fotópica, respetivamente. Adaptado de Schwartz (2010)<sup>21</sup> ..... 25

**Figura 15.** Representação das grandezas fotométricas, e respetivas unidades SI. .... 26

**Figura 16.** Distribuição de energia espectral do radiador de Planck a diferentes temperaturas. À medida que a temperatura diminui, o pico da curva de radiação do corpo negro desloca-se para menores intensidades e maiores comprimentos de onda. Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup> ..... 29

**Figura 17.** Distribuição de energia espectral do radiador de Planck, apenas na zona do visível, para quatro temperaturas: 2000 K, 2400 K, 3000 K e 3400 K. Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup> ..... 29

**Figura 18.** Distribuição de energia espectral relativa típica da luz do dia (curva preenchida), e do radiador de Planck com a mesma temperatura de cor correlacionada, neste caso a 5630 K (curva tracejada). Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup> ..... 31

**Figura 19.** Distribuição de energia espectral de uma lâmpada de tungsténio comparada à de um corpo negro. Adaptado de Narisada (2004)<sup>63</sup> ..... 32

**Figura 20.** Métodos para produzir luz branca através de LEDs. .... 34

**Figura 21.** Distribuição de energia espectral de um LED "branco" composto por um LED vermelho, verde e azul em separado. Adaptado de Schreuder (2008)<sup>64</sup> ..... 35

**Figura 22.** Distribuição de energia espectral de um LED "branco" composto por um LED a emitir luz azul e com partículas de fósforo. Adaptado de Schreuder (2008)<sup>64</sup> ..... 35

**Figura 23.** Média e desvio-padrão da amplitude de acomodação para os diferentes níveis de iluminância. Adaptado de Majumder (2017)..... 37

**Figura 24.** Variação do diâmetro pupilar em função da iluminância, obtida através da fórmula de Watson & Yellott (2012)<sup>72</sup> ..... 38

**Figura 25.** Lâmpada Ledigma. Lâmpada utilizada como fonte de iluminação para as diferentes condições de iluminação. (Ledigma Ltd, Vilnius, Lithuania)..... 43

**Figura 26.** Distribuição de energia espectral da fonte de luz Ledigma. UV (UV), azul real (N), ciano (C), verde (G), lima (L), amber (A), vermelho (R), vermelho escuro (D) e branco (W). A linha preta representa a lâmpada sintonizada para a luz branca com todos os LEDs individuais na potência máxima. .... 43

**Figura 27.** Distribuição de energia espectral para o LED verde (G) e vermelho (R). .... 44

<b>Figura 28.</b> Luxímetro utilizado na medição da iluminância nas diferentes condições de iluminação (Illuminance meter T-10; Konica Minolta Sensing Inc., Japan) Retirado de <sup>84</sup> .....	45
<b>Figura 29.</b> Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da amplitude de acomodação em: A- iluminância de 30lx, B- iluminância de 150lx, C- iluminância de 400lx. De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste.....	49
<b>Figura 30.</b> Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da flexibilidade acomodativa em: A- iluminância de 30lx, B- iluminância de 400lx. De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste. ....	49
<b>Figura 31.</b> Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da amplitude de acomodação em: A- iluminação de cor verde (515nm), B- iluminação de cor vermelha (635nm). De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste.....	50
<b>Figura 32.</b> Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da flexibilidade acomodativa em: A- iluminação de cor verde (515nm), B- iluminação de cor vermelha (635nm). De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste.....	50
<b>Figura 33.</b> Caracterização geral da amostra por género (n=26). Percentagem do género feminino (cinza escuro) e masculino (laranja).....	53
<b>Figura 34.</b> Caracterização da amostra por idade (n=26).....	53
<b>Figura 35.</b> Caracterização geral da amostra por ametropia (n=26). Percentagem de emetropes (n=21) a cinza e hipermetropes (n=5) a laranja.....	54
<b>Figura 36.</b> Distribuição da amostra por valor da amplitude de acomodação monocular medida na primeira consulta.....	55
<b>Figura 37.</b> Distribuição da amostra por valor de flexibilidade acomodativa monocular medida na primeira consulta.....	56
<b>Figura 38.</b> Comparação dos valores de amplitude de acomodação obtidos nos três níveis de iluminância (30lx, 150lx e 400lx).....	58
<b>Figura 39.</b> Comparação dos valores de flexibilidade acomodativa obtidos nos dois níveis de iluminância (30lx e 400lx).....	58

<b>Figura 40.</b> Comparação dos valores de amplitude de acomodação obtidos nas três diferentes cores de iluminação (branca, verde e vermelho).....	60
<b>Figura 41.</b> Comparação dos valores de flexibilidade acomodativa obtidos nas duas diferentes cores de iluminação (verde e vermelho).....	61
<b>Figura 42.</b> Comparação dos valores de amplitude de acomodação obtidos nas duas diferentes temperaturas de cor correlacionada (2500K e 4500K).....	62
<b>Figura 43.</b> Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação vermelha na medição da amplitude de acomodação. A – Olho não acomodado, ponto focal atrás da retina, quando colocada uma lente negativa de 7D. B – Ponto focal na retina, quando o olho acomoda 7D, na presença de uma lente de -6,75D.....	67
<b>Figura 44.</b> Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação verde na medição da amplitude de acomodação. A – Olho não acomodado, ponto focal atrás da retina quando colocada uma lente negativa de 7D. B – Ponto focal na retina quando o olho acomoda 7D, na presença de uma lente de -7,40D.....	68
<b>Figura 45.</b> Variação da amplitude de acomodação teórica e experimental para a iluminação branca, verde e vermelha.....	69
<b>Figura 46.</b> Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação vermelha na medição da flexibilidade acomodativa. A – Olho acomoda 0,75D na presença de uma lente de +2,00. B – Olho acomoda 4,75D correspondentes à distância de trabalho e LCA, quando colocada uma lente de -2,00D.....	70
<b>Figura 47.</b> Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação verde na medição da flexibilidade acomodativa. A – Olho acomoda apenas 0,10D na presença de uma lente de +2,00D. B – Olho acomoda 4,10D correspondentes à distância de trabalho menos a LCA, quando colocada a lente de -2,00D.....	70

## Índice de Tabelas

---

<b>Tabela 1.</b> Correspondência entre as grandezas radiométricas e fotométricas e suas unidades SI. Adaptada de McCluney (1994) <sup>53</sup> .....	26
<b>Tabela 2.</b> Critérios de diagnóstico das disfunções acomodativas. Adaptado de Scheiman (2014) <sup>80</sup> .....	42
<b>Tabela 3.</b> Ordem das consultas realizadas ao longo do estudo, com respectivos exames e tipo de iluminação utilizada em cada consulta .....	48
<b>Tabela 4.</b> Valores médios e desvio padrão (DP) de M de cada ametropia encontrada na amostra, e respectivos valores mínimo e máximo obtidos.....	55
<b>Tabela 5.</b> Valores médios, desvio-padrão (DP) e intervalo dos parâmetros acomodativos nos diferentes níveis de iluminância .....	57
<b>Tabela 6.</b> Comparação entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes iluminâncias e a respectiva significância estatística ( <i>p-value</i> ) .....	57
<b>Tabela 7.</b> Valores médios, desvio-padrão (DP) e intervalo dos parâmetros acomodativos nas diferentes cores de iluminação.....	59
<b>Tabela 8.</b> Comparação entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes cores de iluminação e a respectiva significância estatística ( <i>p-value</i> ).....	59
<b>Tabela 9.</b> Valores médios, desvio-padrão (DP) e intervalo da amplitude de acomodação em iluminações com diferentes temperaturas de cor.....	61
<b>Tabela 10.</b> Comparação entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes cores de iluminação e a respectiva significância estatística ( <i>p-value</i> ).....	62

## Abreviaturas e Acrónimos

---

AA	Atraso acomodativo
AC/A	Convergência acomodativa/Acomodação
Am	Amplitude de acomodação
ARN	Acomodação relativa negativa
ARP	Acomodação relativa positiva
AV	Acuidade visual
CCT	Temperatura de cor correlacionada ( <i>correlated color temperature - CCT</i> )
Cd	Candelas
CIE	<i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>
Cpm	Ciclos por minuto
D	Dioptrias
DP	Desvio padrão
EE	Equivalente esférico
FA	Flexibilidade Acomodativa
HOA	Aberrações de alta ordem ( <i>high order aberration</i> )
J <sub>0</sub>	Componente vetorial do astigmatismo horizontal
J <sub>45</sub>	Componente vetorial do astigmatismo oblíquo
K	Kelvin
LCA	Aberração cromática longitudinal ( <i>longitudinal chromatic aberration</i> )
LED	Díodo emissor de luz ( <i>light emitting diode</i> )
Lm	Lúmen
LOA	Aberrações de baixa ordem ( <i>low order aberration</i> )
lx	Lux
M	Componente vetorial esférica
MEM	<i>Monocular estimation method</i>
mm	Milímetros
MTF	<i>Modulation transfer function</i>
nm	Nanómetros
OD	Olho direito

OE	Olho esquerdo
PPC	Ponto próximo de convergência
RMS	<i>Root mean square</i>
TCA	Aberração cromática transversal
VL	Visão de longe
VP	Visão de perto
$\lambda$	Comprimento de onda (em nm)

## Publicações e comunicações relacionadas com esta dissertação

---

Sandra Franco, Raquel Moreira, João Linhares (2019). “The influence of coloured lighting on ocular amplitude of accommodation”, Proceedings of the IV International Conference on Applications of Optics and Photonics, Lisboa, Portugal, May 2019. (Aceite para publicação em junho 2019)

Raquel Moreira, João Linhares, Sandra Franco (2019). The Influence of the illumination intensity on Ocular Accommodation. CIOCV 2019, Braga, Portugal (Comunicação Oral)

Raquel Moreira; João Linhares, Sandra Francoa, (2019). The Influence of Coloured Lighting on Ocular Accommodation. IV International Conference on Applications in Optics and Photonics, AOP 2019, Lisbon, Portugal. (Poster)

*Aos meus pais, que sempre acreditaram em  
mim e me fizeram querer ser melhor...*

# Capítulo 1

---

Introdução

Quando necessários, os sistemas de iluminação utilizados nas nossas tarefas diárias são um fator importante para o desempenho visual. Esses sistemas devem ser adequados às necessidades visuais exigidas por esse tipo de tarefa. A associação entre o uso de iluminação artificial a mudanças nos aspetos cognitivos e físicos dos seres humanos, como o caso do conforto visual foram já descritas na literatura.<sup>1,2</sup> Um dos parâmetros oculares envolvido no desempenho das tarefas visuais de perto, e conseqüentemente no desempenho visual, é a acomodação. A acomodação é o processo no qual o cristalino altera o seu poder dióptrico, permitindo ao olho focar objetos a diferentes distâncias sendo a diferença entre a vergência de um ponto próximo e um ponto distante denominado por amplitude de acomodação.<sup>3,4</sup>

O principal objetivo deste trabalho foi estudar e analisar a influência e impacto de determinados parâmetros da iluminação nos parâmetros acomodativos oculares numa população emetropia e sem problemas acomodativos. Os parâmetros de iluminação testados foram a iluminância, cor e temperatura de cor correlacionada (CCT). Com base no objetivo do estudo, pretendeu-se responder às seguintes hipóteses:

H1: O nível de iluminância influencia os parâmetros acomodativos oculares

H2: A cor da iluminação influencia os parâmetros acomodativos oculares

H3: A temperatura de cor correlacionada da iluminação influencia os parâmetros acomodativos oculares

O trabalho foi dividido em sete capítulos, incluindo este: introdução, revisão bibliográfica, material e métodos, resultados, discussão de resultados, conclusões e trabalho futuro e, por fim, bibliografia.

O segundo capítulo consiste na definição de conceitos importantes referentes ao sistema visual, luz e cor e o impacto da luz artificial no olho humano. No terceiro capítulo é descrita a tipologia do estudo e os critérios de seleção da amostra utilizados no trabalho. É também apresentada uma breve descrição dos exames realizados na recolha de dados e da análise estatística utilizada na interpretação dos resultados obtidos. O quarto capítulo refere-se aos resultados obtidos e respetiva análise estatística dos mesmos. No quinto, faz-se a discussão dos resultados obtidos e comparação com estudos realizados anteriormente relativamente ao tema

em questão. No sexto capítulo, são referidas as conclusões mais importantes, assim como as suas limitações e, ainda, propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

---

Revisão bibliográfica

### 2.1. Sistema Visual

A visão começa com a projeção de radiação eletromagnética na retina. A luz refletida pelos objetos é refratada pela córnea, passa através do humor aquoso, dirigindo-se à íris que controla a quantidade de luz que passa para o cristalino. No cristalino volta a ser refratada e converge para um ponto focal na retina, a fóvea.<sup>5-8</sup>

#### 2.1.1. Anatomia ocular

O globo ocular é constituído por três camadas: camada externa ou camada fibrosa, camada intermédia ou vascular e pela camada interna ou nervosa.<sup>7,9-11</sup> Na Figura 1 encontra-se identificado um corte transversal do OE com a indicação dos principais componentes anatómicos.

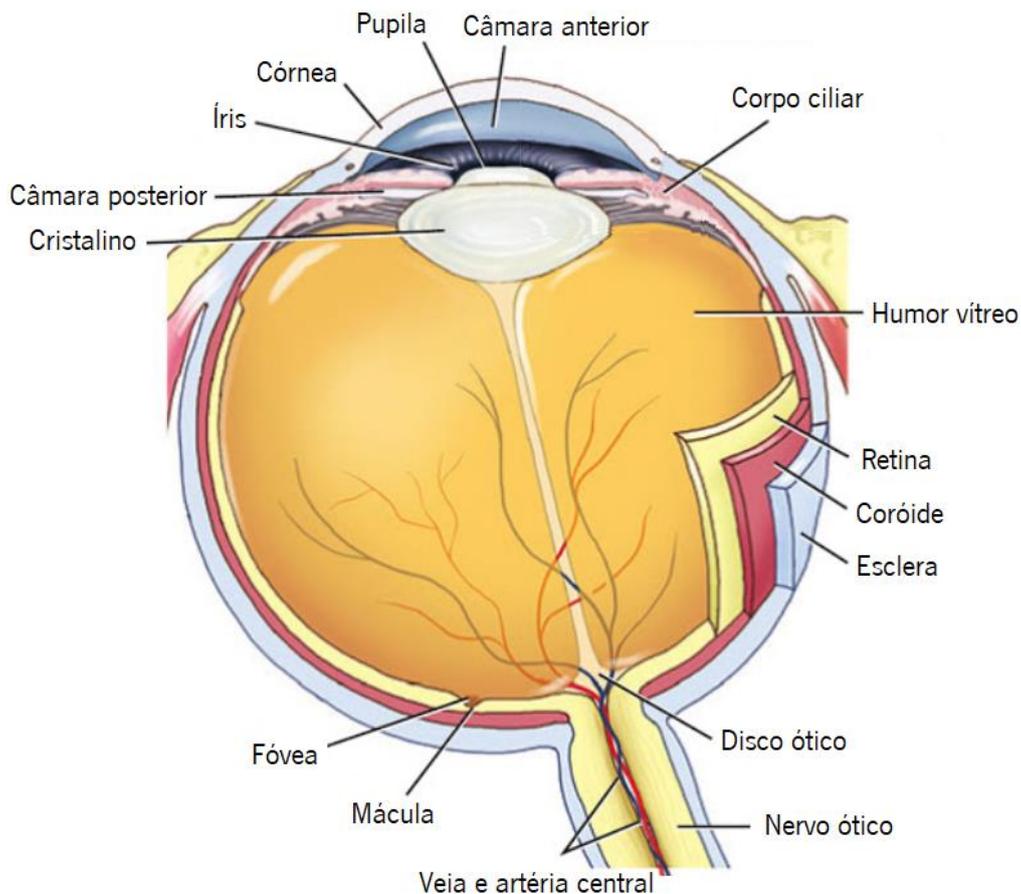


Figura 1. Representação de um corte transversal do globo ocular e seus principais constituintes. Adaptado de Shiland (2015)<sup>12</sup>

### *Camada externa ou fibrosa*

A camada externa ou fibrosa é constituída por tecido denso e avascular, nomeadamente, pela esclera na parte posterior e medial, e pela córnea na parte anterior.<sup>7,9-11</sup> Os constituintes da camada externa encontram-se representados na Figura 2.

A esclera é um tecido fibroso, denso e opaco responsável por dar suporte e proteção ao olho. A sua grande resistência, juntamente com a pressão intraocular, mantém os constituintes do olho na posição correta e sustentam a sua forma. A esclera está ligada à córnea através do limbo esclero-corneal, e estende-se até ao nervo ótico.<sup>7,9-11</sup>

A córnea é o tecido transparente com maior poder dióptrico do globo ocular e em conjunto com o cristalino, transmitem e refratam a luz levando à projeção da luz na retina.<sup>9,11</sup>

### *Camada intermédia ou vascular*

A camada intermédia ou vascular também conhecida por úvea é composta pela coróide, corpo ciliar e íris.<sup>7,9-11</sup> Os constituintes da camada intermédia encontram-se representados na Figura 2.

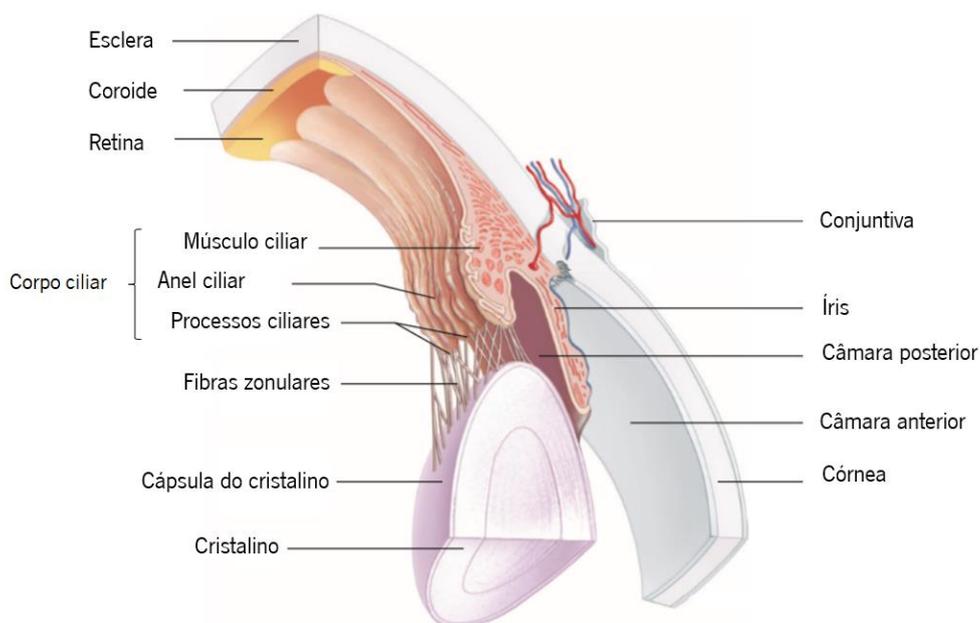


Figura 2. Representação de um corte transversal do olho com as principais estruturas anatómicas das camadas externa e intermédia do globo ocular. Adaptado de VanPutte (2013)<sup>13</sup>

A coroide é uma camada vascular fina de cor castanha que se estende desde o nervo ótico até à ora serrata. Pela sua alta vascularização é responsável pela nutrição das camadas do globo ocular com que está em contacto.<sup>7,9-11</sup>

O corpo ciliar tem o formato de um anel e trata-se de uma estrutura contínua entre a face posterior da íris estendendo-se até à ora serrata onde se funde com a coroide. No corpo ciliar é possível encontrar os processos ciliares responsáveis pela produção de humor aquoso e ainda o músculo ciliar que, durante o processo de acomodação, muda a forma do cristalino.<sup>9-11</sup>

A íris é um diafragma fino e pigmentado, situado entre a córnea e o cristalino, com ligação ao músculo ciliar através das fibras ciliares.<sup>7,9,10,13</sup> Possui uma abertura central, denominada pupila, que através da contração e dilatação dos músculos da íris regula a quantidade de luz que entra no olho.<sup>6,7,9,10,13,14</sup> Este mecanismo de contração e dilatação da pupila encontra-se representado na Figura 3. As condições de iluminação ambiental são a principal e mais importante causa de variação do diâmetro pupilar.<sup>6,14</sup> Os níveis de iluminação podem fazer o diâmetro pupilar variar de cerca de 2mm em iluminação elevada até cerca de 8mm no escuro.<sup>3,6,14</sup> Estas variações vão ao encontro do estudo realizado por Winn *et al.*<sup>15</sup> em que é comparado o diâmetro pupilar com o nível de luminância. Segundo o autor, consoante se aumentava o nível de luminância, o diâmetro pupilar diminuía. Além disso, a resposta pupilar ocorre de forma consensual em situações normais.<sup>6</sup>

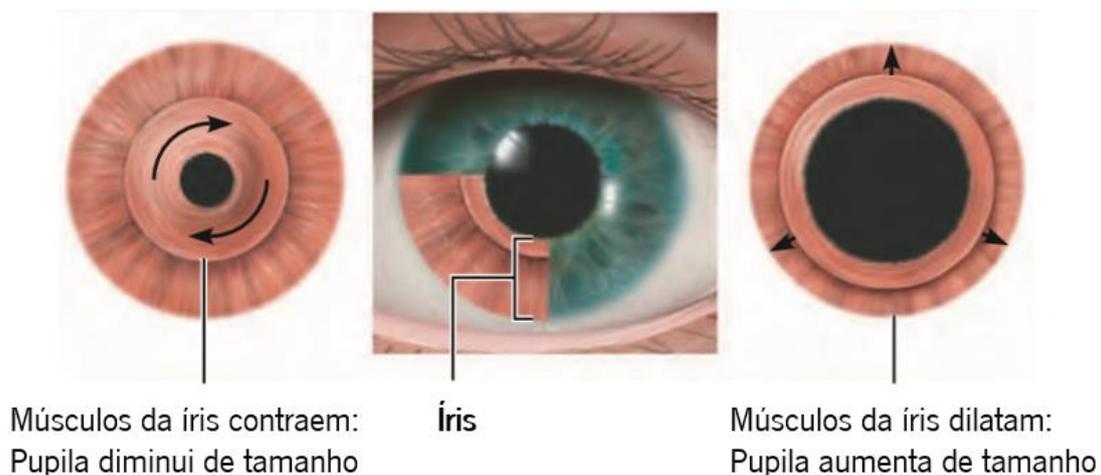


Figura 3. Contração e dilatação da pupila, vista anterior. Adaptado de Marieb e Hoehn (2014)

A pupila, como parte da tríade proximal (acomodação, convergência e miose) também varia de tamanho conforme a distância de fixação, aumentando de diâmetro quando está a focar objetos a longas distâncias e diminuindo em objetos a distâncias muito curtas.<sup>7,16</sup> Além disso, segundo Koch *et al.*<sup>17</sup> o diâmetro pupilar apresenta diferenças significativas entre indivíduos, para a mesma tarefa, iluminação e distância de trabalho.

### *Camada interna ou nervosa*

A retina, camada mais interna do globo ocular, é composta por células nervosas responsáveis por receber e transformar o sinal luminoso em sinal elétrico.<sup>7,9-11,16</sup> A sua superfície interna encontra-se em contacto com o humor vítreo, e a externa pela camada mais interna da coróide, a membrana de Bruch.<sup>9,10</sup>

A retina pode ser decomposta microscopicamente em dez camadas diferentes, como ilustrado na Figura 4. Contudo, é dividida de uma forma simplificada em duas partes, pigmentar e neuronal.<sup>7,9,10</sup>

A camada mais externa é a camada pigmentar, também conhecida como epitélio pigmentar da retina (EPR) e consiste numa única camada de células hexagonais, que se estendem desde a *ora serrata* até o nervo ótico.<sup>7,9,10</sup> Esta camada possui diversas funções essenciais à homeostase da retina, como a absorção de luz não absorvida pelos fotorreceptores de modo a impedir que esta se disperse no olho e o armazenamento de vitamina A necessária no processo de fototransdução (conversão da luz em sinais elétricos) que acontece nas células fotorreceptoras.<sup>7,9,18</sup> Estas células têm ainda um papel importante na renovação celular dos fotorreceptores e a função de barreira seletiva no sangue-retiniano impedindo a circulação de iões e prevenindo a difusão de moléculas tóxicas provenientes da coróide.<sup>7,9,18</sup>

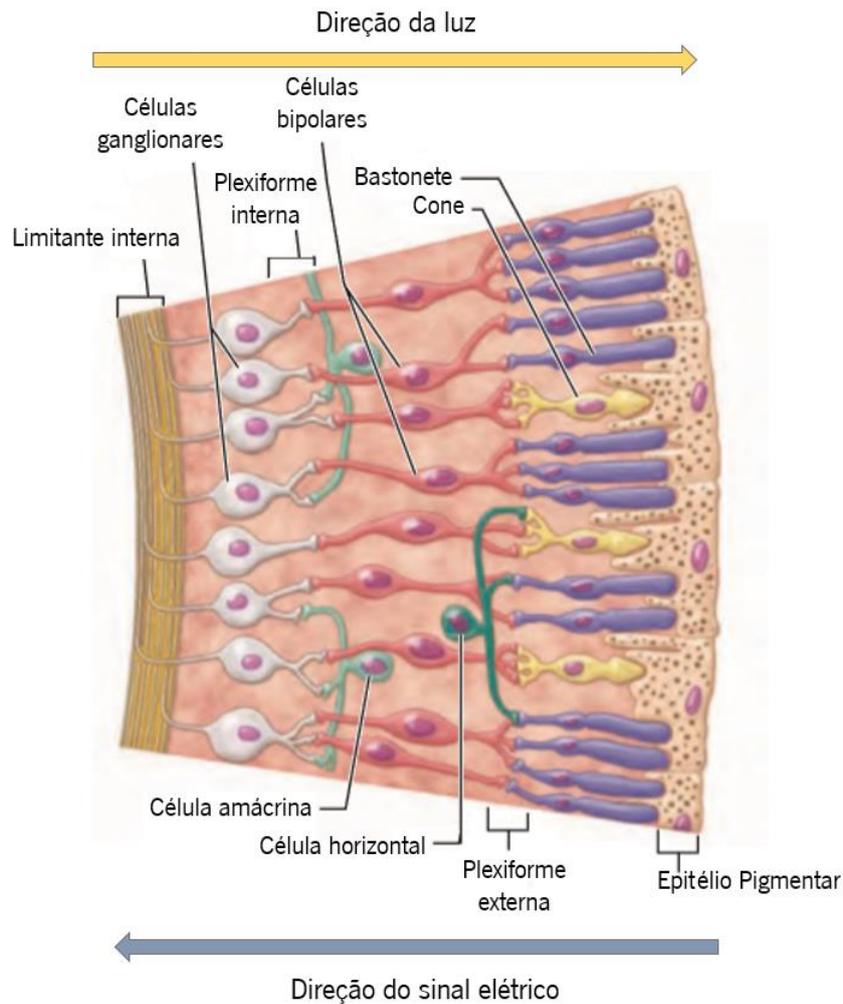


Figura 4. Secção transversal das camadas da retina e as suas principais células. Adaptado de Marieb e Hoehn (2014)<sup>7</sup>

A camada mais interna é a camada neural composta pelos fotorreceptores, células bipolares e células ganglionares. O sinal eletromagnético, após passar pela retina até aos fotorreceptores e produzido como resposta à luz que chega ao olho, é transmitido desde os fotorreceptores, passando pelas células bipolares até às células ganglionares, onde são gerados os potenciais de ação.<sup>7,9,10</sup> Esta camada possui também outras células importantes; as células horizontais e as células amácrinas, que também desempenham um papel no processamento visual.<sup>7,9</sup>

Na parte posterior do globo ocular existe o disco ótico ou ponto cego, que corresponde à zona de perfuração do nervo ótico, responsável por parte do suprimento sanguíneo através da artéria e veia central da retina e é também o local de saída das células ganglionares. Nesta área não existem fotorreceptores e por isso não há sensibilidade à luz. A cerca de 3mm para o lado

temporal do disco óptico, fica a mácula, uma área oval de cor amarelada que possui no seu centro uma depressão designada por fóvea. Somente nesta área existe uma densidade de cones suficiente para fornecer a melhor resolução visual.<sup>9-11,19</sup>

### *Fotorreceptores*

Os fotorreceptores encontram-se estreitamente alinhados paralelamente uns aos outros entre o epitélio pigmentar da retina e a membrana limitante externa. São receptores nervosos especializados em absorver energia luminosa e transformá-la em impulso eletromagnético. Possuem uma forma alongada e são constituídos por três componentes morfológicamente distintos: o segmento externo, o corpo celular e o segmento interno. Na Figura 5 encontram-se representados os fotorreceptores, cones e bastonetes utilizados na visão.<sup>9,20</sup>

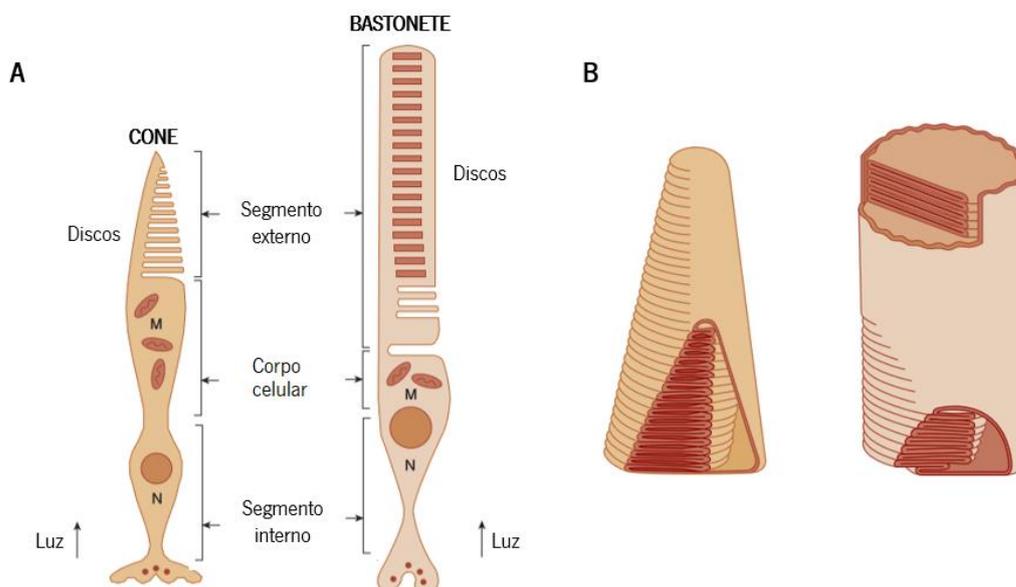


Figura 5. A - Estrutura dos cones (esquerda) e dos bastonetes (direita). "N" corresponde ao núcleo e o "M" as mitocôndrias. B - Segmentos externos dos cones e bastonetes. Adaptado de Schwartz (2010)<sup>21</sup>

Existem dois tipos de fotorreceptores, os cones e os bastonetes, cujos nomes advêm do seu aspeto e forma.<sup>9,20</sup> Os bastonetes, de aspeto cilíndrico, estão ausentes na fóvea e são os responsáveis pela visão em baixas condições de iluminação e proporcionam visão monocromática devido à existência de apenas um tipo de bastonetes.<sup>7-9,19</sup> Os cones são os responsáveis pela visão em condições de iluminação intensa ou moderada e pela visão das cores, existindo três tipos distintos de cones que serão descritos mais à frente.<sup>11</sup>

A densidade a nível da retina não é igual para os dois tipos de fotorreceptores. Apesar de em toda a retina existir um maior número de bastonetes, estes encontram-se ausentes na fóvea. Representa-se na Figura 6 a densidade de fotorreceptores em função da excentricidade na retina. Na região da fóvea apenas existem cones, que vão diminuindo de densidade em direção à periferia. Na zona do ponto cego não existem fotorreceptores.<sup>8,11,21</sup>

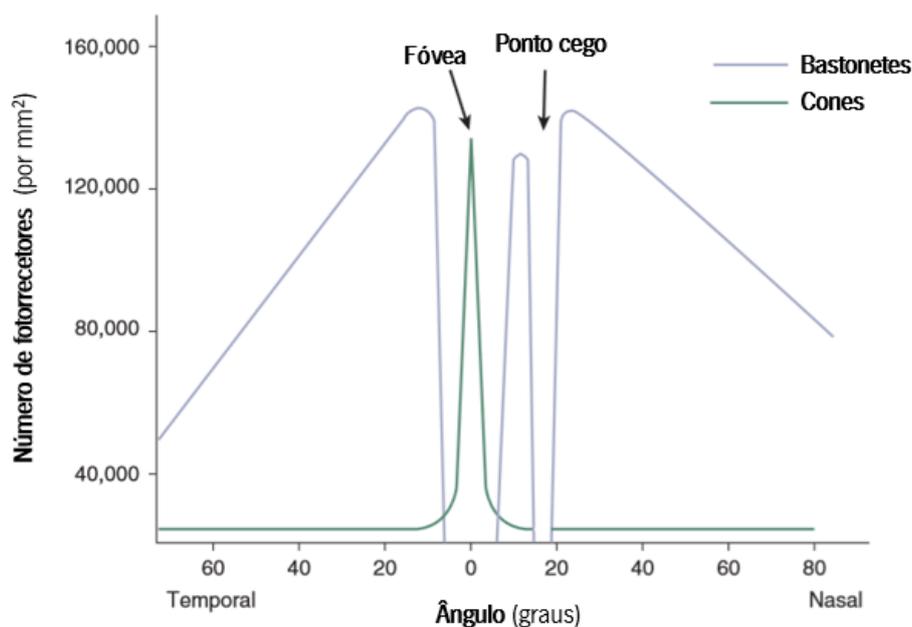


Figura 6. Distribuição de bastonetes e cones na retina. Localização em graus em relação à fóvea. Adaptado de Schwartz (2010)<sup>21</sup>

### 2.1.2. Meios de refração ocular

A córnea, o humor aquoso, o humor vítreo e o cristalino são as estruturas transparentes responsáveis pela refração da luz que chega ao olho.<sup>9</sup>

O humor aquoso é um fluido transparente que preenche as câmaras anterior e posterior do globo ocular. Encontra-se em constante movimento entre as câmaras sendo produzido nos processos ciliares na câmara posterior. É o responsável pela nutrição e suporte das estruturas internas do olho.<sup>7,9</sup>

A câmara vítrea encontra-se preenchida pelo humor vítreo.<sup>7,9,10</sup> Trata-se de um gel transparente constituído maioritariamente por água, com um índice de refração semelhante ao do humor aquoso: 1,33.<sup>9,10</sup> Tem como função transmitir a luz e ajudar a manter a camada neuronal da retina contra a camada pigmentar.<sup>9</sup>

O cristalino é uma das estruturas responsáveis pelo poder dióptrico do olho<sup>3</sup> e, em conjunto com a córnea, transmite e refrata a luz levando à formação da imagem na retina.<sup>10,16</sup> Trata-se de uma lente biconvexa e transparente<sup>7</sup> localizada entre o humor aquoso e o humor vítreo.<sup>3,9,10</sup> Encontra-se envolvido por uma cápsula altamente elástica, suspensa numa estrutura de ligamentos, denominados por zónula de Zinn.<sup>3,4,10,16</sup> Estes estendem-se da periferia da cápsula até ao corpo ciliar circundante, mantendo o cristalino na sua posição e controlando a curvatura das superfícies através de variações na tensão produzida pela ação do músculo ciliar. Esta capacidade rápida do cristalino de alterar o seu poder dióptrico permitindo-lhe focar a diferentes distâncias designa-se por acomodação.<sup>3,4,10,16</sup>

### 2.1.3. Acomodação

A acomodação é um processo dinâmico, que consiste na alteração da curvatura do cristalino. Este mecanismo leva a uma variação do seu poder refrativo permitindo obter uma imagem nítida na retina.<sup>3,4</sup> O processo de acomodação encontra-se representado na Figura 7.

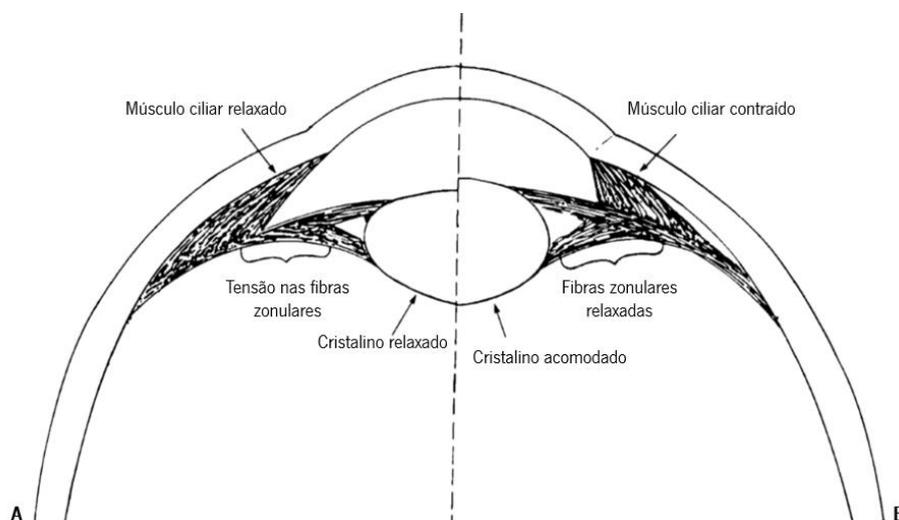


Figura 7. Secção sagital do olho durante mecanismo de acomodação e não-acomodação: (A) não-acomodação; (B) acomodação. Adaptado de Benjamim (2007)<sup>4</sup>

Apesar das várias teorias propostas sobre a acomodação, a teoria que vigora atualmente é a de Helmholtz com modificações de Fincham. Helmholtz sugeriu que quando se observam objetos ao longe, as fibras zonulares provocam maior tensão sob o cristalino e menor tensão quando o objeto visualizado está próximo. Esta tensão das fibras é provocada pelo músculo ciliar. Quando o músculo ciliar contrai desloca-se centriptamente para a frente diminuindo o seu

diâmetro e as fibras zonulares anteriores relaxam, aumentando a tensão no ligamento de *Weiger* e nas fibras zonulares posteriores. Estes movimentos opostos das fibras levam a uma diminuição do raio de curvatura das faces anterior e posterior do cristalino, tornando-o mais convexo e conseqüentemente, mais potente. No estado não acomodado, o músculo ciliar relaxa e as fibras zonulares anteriores ficam sob tensão. Desta forma o cristalino torna-se mais plano e menos potente.<sup>5,22,23</sup>

Wick & Hall<sup>24</sup> estudaram as relações entre três áreas da acomodação (amplitude, flexibilidade e resposta) que são frequentemente testadas na prática clínica. Foram analisadas 200 crianças e, depois de eliminar crianças com problemas de visão binocular, concluíram que apenas 4% tinha déficit nas três funções acomodativas. Estes resultados sugeriram a impossibilidade de prever os resultados de um teste com base nos resultados de outro. Portanto, quando existe suspeita de disfunções acomodativas, todos os aspectos da acomodação, amplitude, flexibilidade e resposta (atraso acomodativo) devem ser considerados. Uma avaliação completa da acomodação deve incluir uma avaliação clínica da amplitude de acomodação, flexibilidade acomodativa e atraso acomodativo.<sup>25</sup>

### ***Amplitude de acomodação***

Define-se por amplitude de acomodação a distância, em dioptrias, entre o ponto remoto e o ponto próximo. Ou seja, é o valor entre o ponto mais afastado a que é possível focar, com a acomodação relaxada, e o ponto mais próximo onde tem uma visão nítida, com o seu máximo esforço acomodativo.<sup>34</sup> Alguns exames permitem-nos obter o valor da amplitude de acomodação, sendo eles o Método de *Donders* e o Método de *Sheard*.<sup>25</sup>

### ***Atraso acomodativo***

O atraso acomodativo consiste na diferença entre o estímulo acomodativo e a resposta acomodativa.<sup>26</sup> Em jovens e adultos saudáveis até aos 45 anos de idade, é considerado normal para valores entre as 0,00D e as +0,50D, valores maiores ou valores negativos (adiantos acomodativos), em idade adulta, podem indicar a presença de disfunções acomodativas. A obtenção do atraso acomodativo pode ser efetuada objetivamente através da retinoscopia

dinâmica, Método de Estimação Monocular (MEM), o *Nott* e pelo auto-refratômetro de campo aberto e, subjetivamente, através dos Cilindros Cruzados.<sup>25</sup>

### ***Flexibilidade acomodativa***

A flexibilidade acomodativa consiste na capacidade do sistema acomodativo em realizar alterações entre acomodar e relaxar a acomodação, de forma rápida e eficaz, quando se alterna as distâncias focais em condições monoculares e binoculares.<sup>27</sup> Este parâmetro pode ser medido tanto em visão de perto como em visão de longe. Em visão de perto é comumente utilizado lentes de potência  $\pm 2,00D$ , alternando de lentes positivas, em que relaxam a acomodação, para lentes negativas, em que estimulam a acomodação, durante um minuto. No caso da visão de longe, utiliza-se lentes de potência neutra/ $-2,00D$ . O ritmo da flexibilidade acomodativa é medido em ciclos por minuto (cpm).<sup>25</sup>

#### **2.1.4. Aberrações oculares**

A qualidade da imagem formada na retina é influenciada pela difração, dispersão e aberrações óticas do sistema visual.<sup>28,29</sup>

Num sistema ótico perfeito, os raios de luz emitidos por uma fonte de luz pontual atravessam os elementos refrativos pela pupila em diferentes zonas e convergem para o mesmo plano, a retina.<sup>30,31</sup> Na existência de imperfeições no sistema ótico, os raios de luz dispersam e não convergem no mesmo ponto.<sup>28</sup> Esses desvios na propagação da luz, denominados por aberrações óticas, resultam em imagens desfocadas e diminuem o desempenho visual.<sup>29,32</sup>

A forma mais comum de interpretar as aberrações do sistema ótico é pela aberração de frente de onda<sup>1</sup>, que representa a diferença entre frente de onda formada por esse sistema ótico e a frente de onda de um sistema ótico ideal (perfeito).<sup>30,33</sup>

Vários estudos<sup>28,30,33,34</sup> referem as irregularidades da superfície anterior da córnea e do cristalino como os principais responsáveis pelo aparecimento das aberrações óticas. Outros fatores, como a estabilidade do filme lacrimal<sup>35,36</sup>, a posição das pálpebras<sup>37</sup>, a idade<sup>38</sup>, o tamanho

---

<sup>1</sup>Frente de onda: Região do espaço que reúne todos os pontos da onda que estão em igual fase, e que se encontram ao longo do mesmo percurso ótico da fonte de luz.<sup>28</sup> A esfera de referência consiste numa construção perfeita e serve para comparar com outras frentes de onda.<sup>29</sup>

da pupila<sup>33</sup>, a acomodação<sup>30</sup>, o erro refrativo e os movimentos oculares<sup>39</sup> contribuem para as alterações de tais aberrações.

As aberrações oculares podem ser classificadas em dois grupos: monocromáticas e cromáticas.<sup>28-30</sup>

### ***Aberrações monocromáticas***

As aberrações monocromáticas ocorrem para luz monocromática e podem ser classificadas por aberrações de baixa e alta ordem.<sup>28</sup>

As aberrações de baixa ordem (*low order aberrations* – LOA) correspondem a cerca de 90% das aberrações totais do olho, sendo o desfocado hipermetrópico e miópico as aberrações dominantes, seguidas do astigmatismo.<sup>33,40</sup> Podem ser compensadas com óculos, lentes de contacto ou cirurgia refrativa.<sup>30,33</sup>

As aberrações de alta ordem (*high order aberrations* – HOA) apresentam-se em menor percentagem, cerca de 10%, das aberrações totais do olho<sup>33</sup>, e são designadas por coma, aberração esférica e trefoil.<sup>40</sup> Apesar da pequena percentagem, é associado ao aumento deste tipo de aberração ocular uma maior perda no desempenho visual<sup>41</sup>, podendo provocar problemas visuais como dificuldade na visão noturna, halos, desfocado, encandeamento ou diplopia.<sup>40</sup>

Os Polinómios de Zernike representados na Figura 8 são usualmente utilizados para descrever matematicamente as aberrações, tanto as de baixa ordem como as de alta ordem.<sup>41</sup> Os polinómios são divididos em várias ordens, dispostas em forma de pirâmide. De acordo com a ordem, são divididos em aberrações de baixa ordem (da ordem 0 à 2<sup>o</sup> ordem) e alta ordem (3<sup>o</sup> ordem em diante).<sup>30</sup> A unidade de medida é o micron ( $\mu$ )<sup>28</sup>, e os valores obtidos nos polinómios são dependentes do diâmetro pupilar.<sup>40</sup>

Por vezes, as representações das aberrações de frente de onda são difíceis de interpretar através dos Polinómios de Zernike. Então, é utilizada a média do erro de frente de onda, *root mean square* (RMS).<sup>28,41</sup> O RMS fornece apenas uma visão geral da aberração de frente de onda<sup>28,33,40</sup>

Uma forma de estimar a deterioração da qualidade da imagem retiniana e consequente performance visual, originada pelas aberrações, é através de métricas como a *modulation transfer function* (MTF). A MTF consiste numa função que descreve a variação de contraste ao variar a

frequência espacial. O valor de MTF pode variar de 0 a 1, sendo que 0 corresponde a uma imagem completamente degradada e 1 a 100% do contraste que foi mantido depois da luz passar o sistema ótico.<sup>33,42</sup>

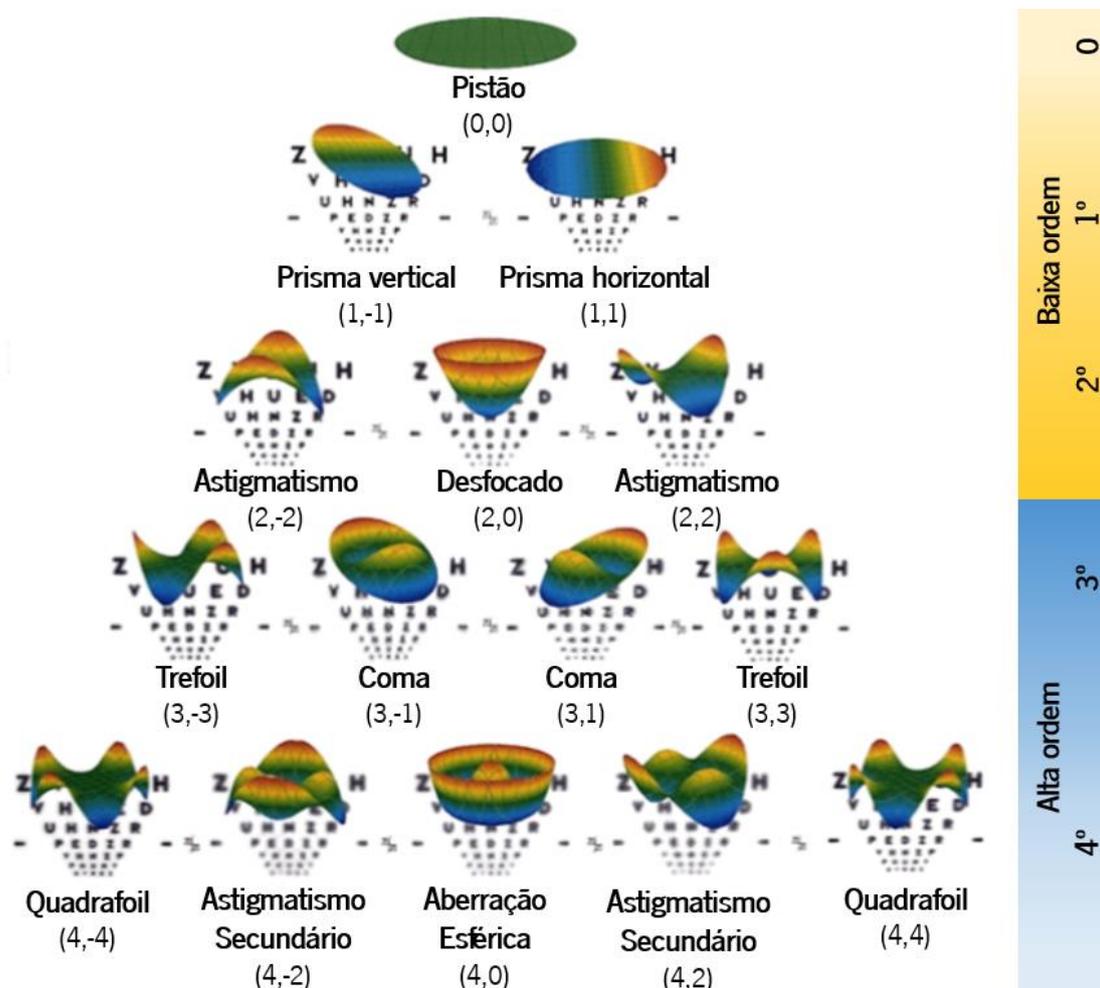


Figura 8. Pirâmide de Zernike até à 4<sup>o</sup> ordem, com respetivo nome e ordem. Os polinómios de Zernike estão ordenados verticalmente pela ordem radial e horizontalmente pela frequência angular. Adaptado de Resan (2012)<sup>40</sup>

Fatores como a acomodação são fortemente associados a alterações nas aberrações monocromáticas. Wang *et al.*<sup>43</sup> reportaram um aumento nas aberrações de alta ordem com o aumento da acomodação. Esses resultados sugeriram uma associação entre as variações na curvatura e posição do cristalino, sendo este um fator importante na qualidade de visão. Também Li *et al.*<sup>44</sup> encontraram alterações nas aberrações de alta ordem, com a variação na acomodação; sendo que o aumento da aberração esférica foi significativamente maior que as restantes aberrações com o aumento da acomodação. Apesar da variação nas aberrações entre

indivíduos<sup>45,46</sup>, verificou-se uma tendência para o aumento das aberrações monocromáticas com o aumento do estímulo acomodativo.

### ***Aberrações cromáticas***

As aberrações cromáticas são defeitos provocados pela diferente refração dos vários comprimentos de onda que integram a luz policromática ao atravessarem um determinado elemento óptico.<sup>28,29</sup> As duas principais aberrações cromáticas são a aberração cromática longitudinal (*longitudinal chromatic aberration* - LCA) e a aberração cromática transversal (*transverse chromatic aberration* - TCA).

A aberração cromática longitudinal consiste na variação da distância focal do olho para diferentes comprimentos de onda, sendo a sua unidade a dioptria (D).<sup>28,47</sup> Comprimentos de onda curtos (por exemplo, azul) são refratados mais do que os de comprimento de onda longo (vermelho), de modo que as imagens azuis e vermelhas tendem a ser focadas, respetivamente, à frente e atrás da retina como representado na Figura 9.<sup>28,29,47,48</sup>

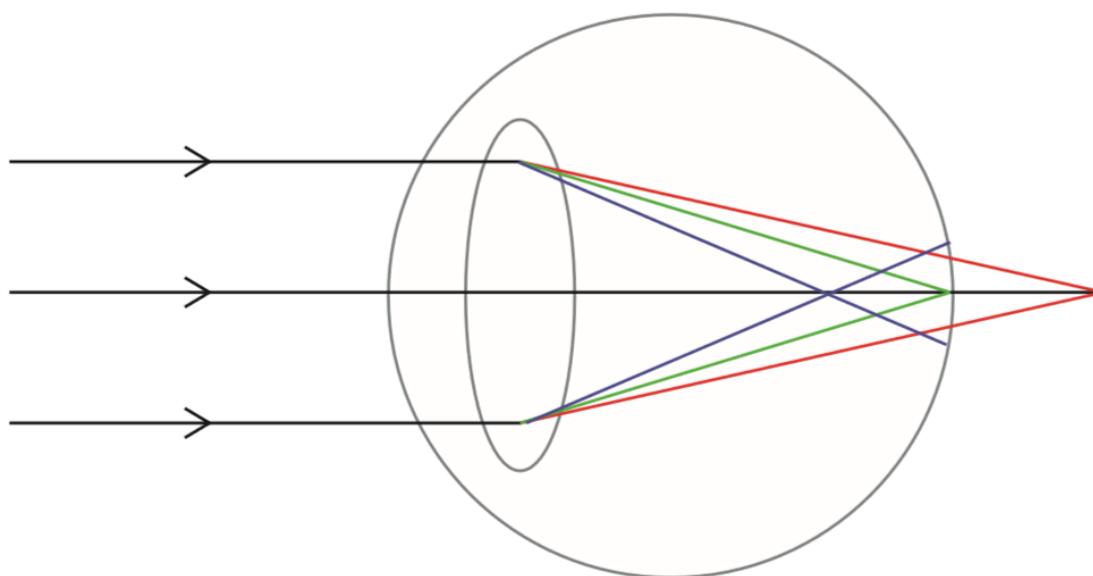


Figura 9. Efeito geral da aberração cromática. Adaptado de Cholewiak (2017)<sup>47</sup>

A aberração cromática longitudinal pode ser calculada pela seguinte fórmula<sup>49</sup>:

$$\delta D = A - B - p \left( \frac{\lambda - 350}{50} \right)$$

Para um olho com ponto de focagem em 580nm, onde  $A = 0,82476$ ,  $B = 3,5450$ ,  $p = 0,7261$  e  $\lambda$  representa o comprimento de onda.

Segundo esta equação, é possível calcular a aberração cromática longitudinal em todos os comprimentos de onda da região visível do espectro eletromagnético. Os valores encontram-se representado na Figura 10.

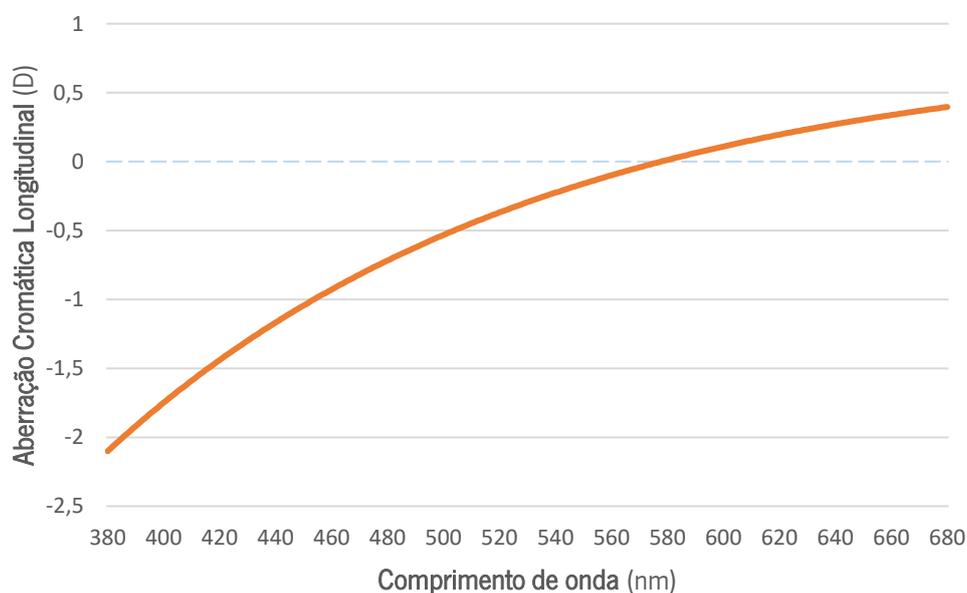


Figura 10. Aberração cromática longitudinal do olho humano. Desfocagem relativa em dioptrias em função do comprimento de onda.

Na presença de um objeto, a aberração cromática longitudinal produz efeitos de cores diferentes (por exemplo, franjas coloridas), para diferentes distâncias do objeto, em relação à distância de focagem atual. Por exemplo, quando o olho está a focar um ponto branco, o verde é nítido na imagem da retina e o vermelho e o azul não, de modo que uma franja roxa é vista em torno de um centro esverdeado. Mas, quando o olho está a focar mais perto que o ponto branco, a imagem tem um centro vermelho vivo rodeado por uma franja azul. Para um ponto de focagem distante, a imagem tem um centro azul e uma franja vermelha. Estes efeitos de cor, geralmente não são percebidos conscientemente.<sup>47</sup>

A aberração cromática transversal refere-se à variação da ampliação ou a uma mudança na localização da imagem para diferentes comprimentos de onda.<sup>28</sup> Contudo, esses efeitos são menores, quando comparados aos efeitos da aberração cromática longitudinal.<sup>16</sup>

## 2.2. Luz e cor

A luz que chega à retina proveniente de um objeto pode ser descrita através do espectro eletromagnético.<sup>6</sup> Um espectro eletromagnético representa o intervalo completo de todas as energias eletromagnéticas radiadas por ondas, desde radiações com comprimentos de onda muito baixos, raios gama, até radiações com altos comprimentos de onda, ondas rádio.<sup>6-8,21,50</sup> O comprimento de onda serve para descrever a energia no espectro eletromagnético e consiste na distância entre os picos das ondas eletromagnéticas.<sup>8,21</sup>

Apenas uma pequena porção do espectro eletromagnético é detetada pelo olho humano, sendo que esta radiação varia em comprimento de onda, de aproximadamente 380 a 720 nanômetros e denomina-se por radiação visível.<sup>5-8,21,51</sup> Os outros comprimentos de onda não são visíveis, por os meios oculares não os transmitirem ou por os fotopigmentos da retina não serem capazes de os absorver.<sup>8,21</sup> O espectro eletromagnético encontra-se representado na Figura 11.

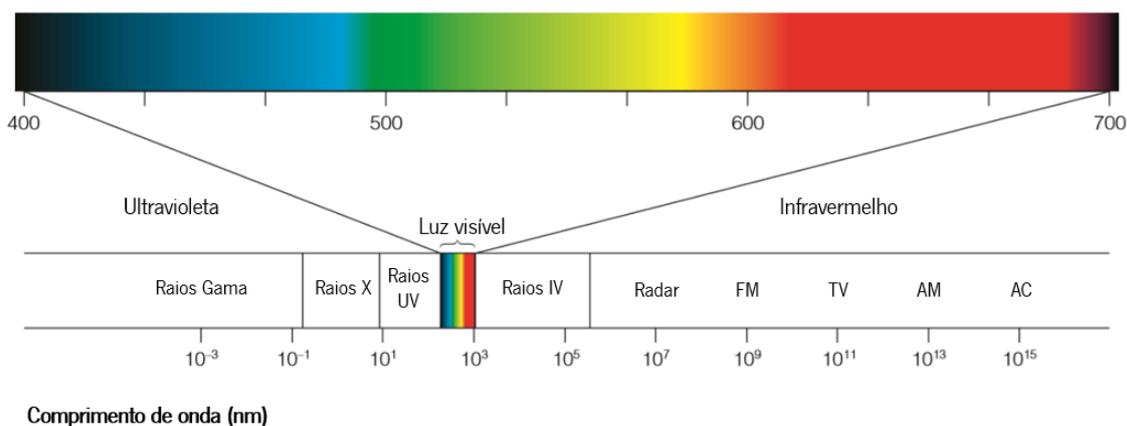


Figura 11. Espectro eletromagnético, com respectivo intervalo da luz visível. Adaptado de Goldstein (2010)<sup>8</sup>

Os comprimentos de onda da luz visível estão associados à percepção de diferentes cores, ou seja, a capacidade humana de distinguir as cores não é igual em todas as regiões do espectro visível.<sup>8,21,50,51</sup> Assim, comprimentos de onda curtos produzem a sensação de luz azul, os médios a sensação de luz verde e os longos a sensação de luz vermelha.<sup>8,50,51</sup> Além disso, a aparência da cor

da luz num determinado comprimento de onda depende das condições de visualização e varia de observador para observador.<sup>50</sup>

A luz branca consiste na mistura de todos os comprimentos de onda da zona do visível do espectro eletromagnético.<sup>21,50</sup>

Apesar de normalmente descrevermos a radiação eletromagnética pelo seu comprimento de onda, podemos também descrevê-la pela sua frequência, ou seja, o número de vezes por segundo que ocorre uma oscilação completa da onda, ou como pequenas partículas ou pacotes de energia denominados por fótons, sendo o fóton o pacote mais pequeno de energia.<sup>4,8,21</sup>

A quantidade de energia de cada fóton, pode ser dada através das seguintes equações:<sup>21</sup>

$$E = h\nu$$

Onde  $E$  corresponde à energia por fóton,  $h$  a constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-37}$  J/Hz) e  $\nu$  a frequência.

Ou,

$$E = hc/\lambda$$

Onde  $c$  corresponde à velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s) e  $\lambda$  ao comprimento de onda.

Estas relações mostram que os fótons de comprimentos de onda curtos possuem maior energia que os fótons de comprimento de onda longos. Isto é clinicamente relevante, porque comprimentos de onda mais curtos são mais energéticos, e por isso produzem mais danos do que os de baixa energia.<sup>21</sup>

### 2.2.1. Visão escotópica e fotópica

O olho não responde da mesma forma em todos os comprimentos de onda da região visível do espectro eletromagnético, depende do indivíduo, da intensidade da luz e das condições de adaptação.<sup>6,50,52</sup>

Em condições de baixa iluminação, como o luar e a luz das estrelas, ocorre a visão escotópica.<sup>6,21,50,52</sup> Os bastonetes são os mais sensíveis neste tipo de condição de visão, sendo os

únicos fotorreceptores funcionais. Esta visão caracteriza-se pela alta sensibilidade a luzes fracas e baixa acuidade visual (20/200).<sup>6-8,21,50,52,53</sup>

Os cones são os principais recetores em condições de iluminação intensa e moderada, sendo a sua resposta denominada por visão fotópica.<sup>6-8,21,50,52</sup> A visão, neste tipo de condições é mais nítida.<sup>6,21</sup>

A visão mesópica é quando o olho se adapta a níveis de iluminação intermédios e tanto os cones como os bastonetes são estimulados.<sup>6,21,52</sup>

### 2.2.2. Sensibilidade dos cones e bastonetes

Os cones e bastonetes, apesar de serem morfologicamente diferentes, possuem no seu segmento externo pigmento visual sensível à luz, que desencadeia o processo visual.<sup>7,21,50</sup> Esta sensibilidade dos fotorreceptores não é igual em todos os comprimentos de onda.<sup>50</sup>

No caso dos bastonetes, o fotorreceptor responsável por absorver a luz denomina-se por rodopsina.<sup>4,7,8,21,50</sup> Cada molécula de rodopsina é capaz de absorver um único fóton de luz, suficiente para ativar o bastonete<sup>21,54</sup>, sendo o seu pico de absorção na zona azul-esverdeada do espectro, diminuindo conforme o comprimento de onda se torne mais longo ou mais curto (curva a tracejado no gráfico da Figura 12).<sup>50</sup>

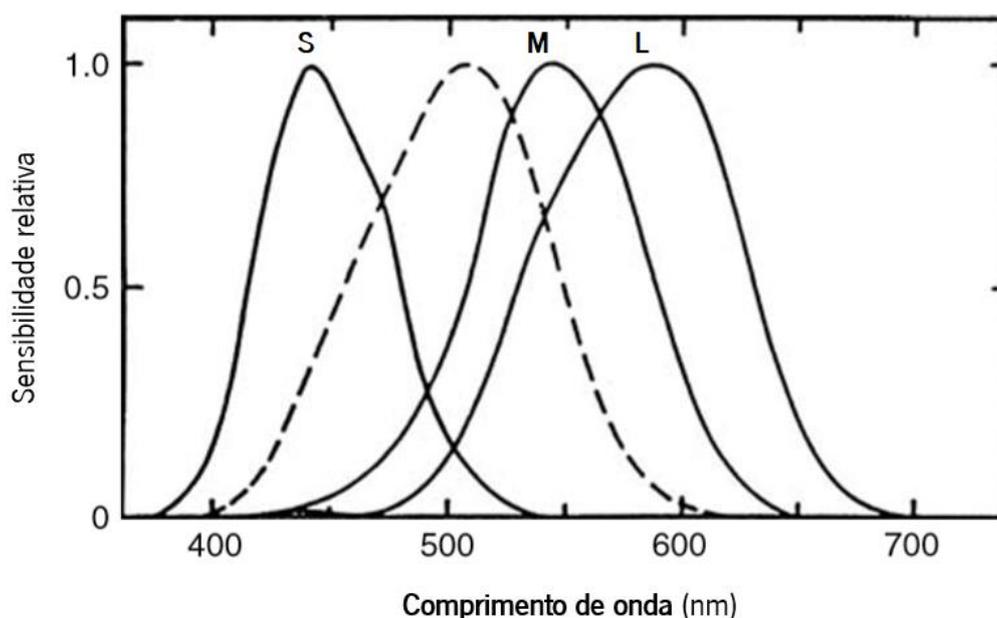


Figura 12. Linha tracejada: curva de sensibilidade espectral em visão escotópica (bastonetes). Linhas preenchidas: curvas de sensibilidade espectral dos três diferentes tipos de cones, S, M e L, responsáveis pela visão fotópica. Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup>

Relativamente à máxima absorção dos cones, é possível observar, na Figura 12, três curvas de sensibilidade correspondentes a três diferentes tipos de cones; cada um com um fotopigmento diferente.<sup>8,21,50,54</sup> Os cones S (do inglês “*short*”) apresentam maior sensibilidade em comprimentos de onda curtos, sendo a máxima absorção na zona azul-violeta. Os M (do inglês “*medium*”) maior sensibilidade em comprimentos de onda médios e a máxima absorção na zona do verde. A curva de sensibilidade L (do inglês “*long*”) apresenta maior sensibilidade em comprimentos de onda longos e a máxima absorção na zona do amarelo-laranja do espectro.<sup>8,21,50</sup>

Os bastonetes são mais sensíveis em comprimentos de onda mais curtos do que os cones, sucedendo-se uma alteração dos brilhos relativos da cor vermelha e azul, à medida que o nível de iluminação atinge a visão mesópica. Um exemplo deste acontecimento é flores vermelhas que aparentam ser mais claras que flores azuis em plena luz do dia, parecerem mais escuras que as azuis à medida que a luz se desvanece – Efeito de *Purkinje*.<sup>21,50</sup> Este efeito encontra-se representado na Figura 13.

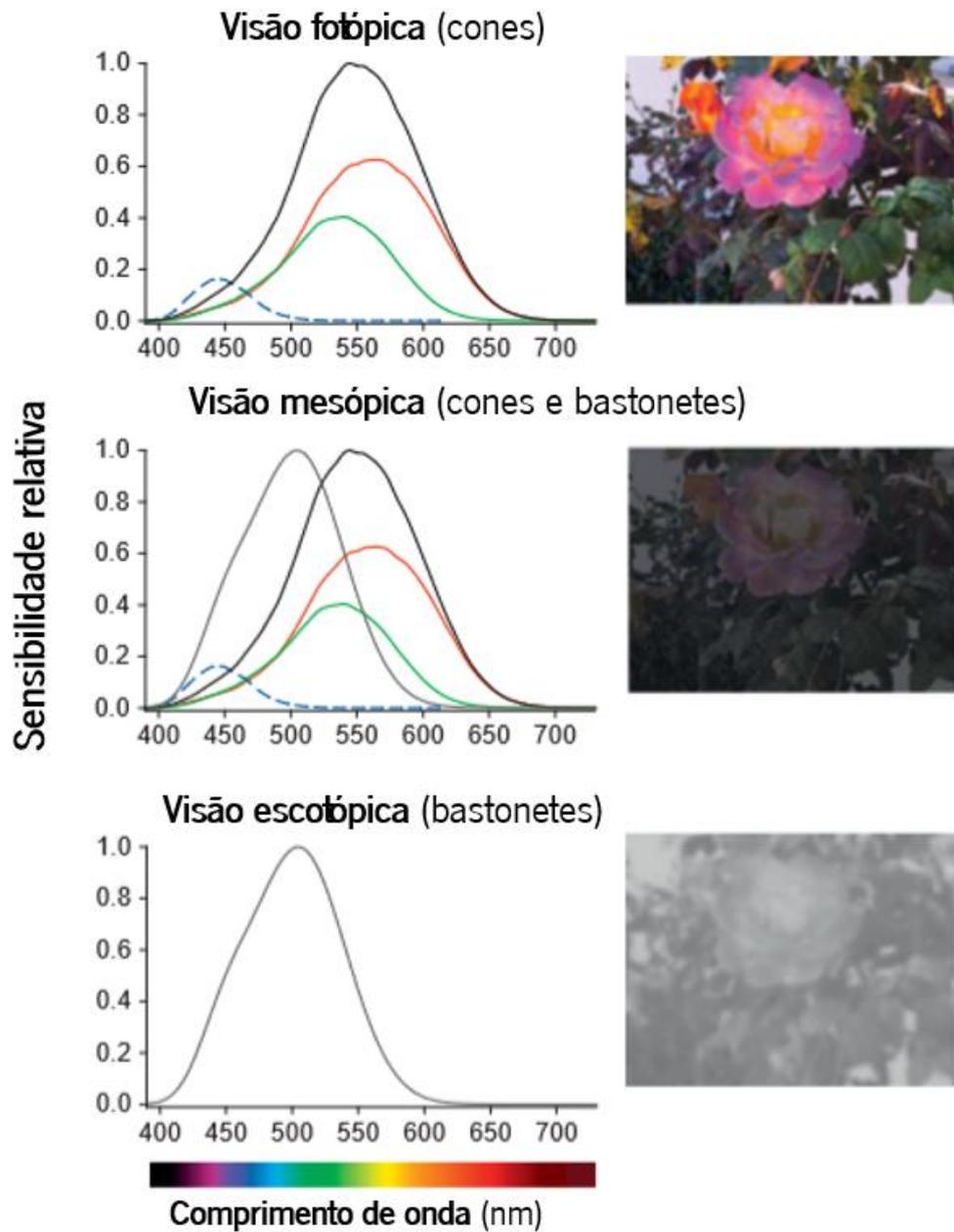


Figura 13. Os gráficos à esquerda representam a sensibilidade relativa espectral dos cones e bastonetes nos diferentes tipos de visão. A linha vermelha representa a curva de sensibilidade relativa espectral dos cones L, a verde dos cones M e a azul dos cones S. A linha preta corresponde à sensibilidade relativa espectral fotópica (junção das curvas dos três tipos de cones) e a cinza corresponde à sensibilidade relativa espectral escotópica. Durante a visão mesópica ambos os fotorreceptores estão ativos. As imagens à direita ilustram as mudanças na visão conforme a adaptação do olho às condições de iluminação. Adaptado de Barbur (2010)<sup>55</sup>

### 2.2.3. Radiometria e fotometria

A radiometria é o ramo da física que estuda a energia produzida por uma fonte de radiação eletromagnética. Os resultados da radiometria são geralmente obtidos em watts. Por comparação, a fotometria quantifica o efeito que essa radiação tem no sistema visual. Estas duas grandezas relacionam-se através das funções padronizadas internacionalmente de eficiência espectral, definidas pela *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE), em 1931, para um observador padrão; em que  $V(\lambda)$  representa a sensibilidade relativa espectral do olho humano em visão fotópica, e a função  $V'(\lambda)$  a sensibilidade relativa espectral em visão escotópica, ambas representadas na Figura 14.<sup>21,51,52,56,57</sup>

Por convenção, a sensibilidade relativa máxima apresenta um valor máximo de 1, onde os bastonetes apresentam uma sensibilidade escotópica máxima aos 507nm, e a sensibilidade fotópica um máximo aos 555nm, considerando um observador padrão e um campo de visão de  $2^\circ$ .<sup>50,52</sup> Para comprimentos de onda acima e abaixo do valor máximo, a sensibilidade diminui até atingir aproximadamente zero.<sup>52</sup>

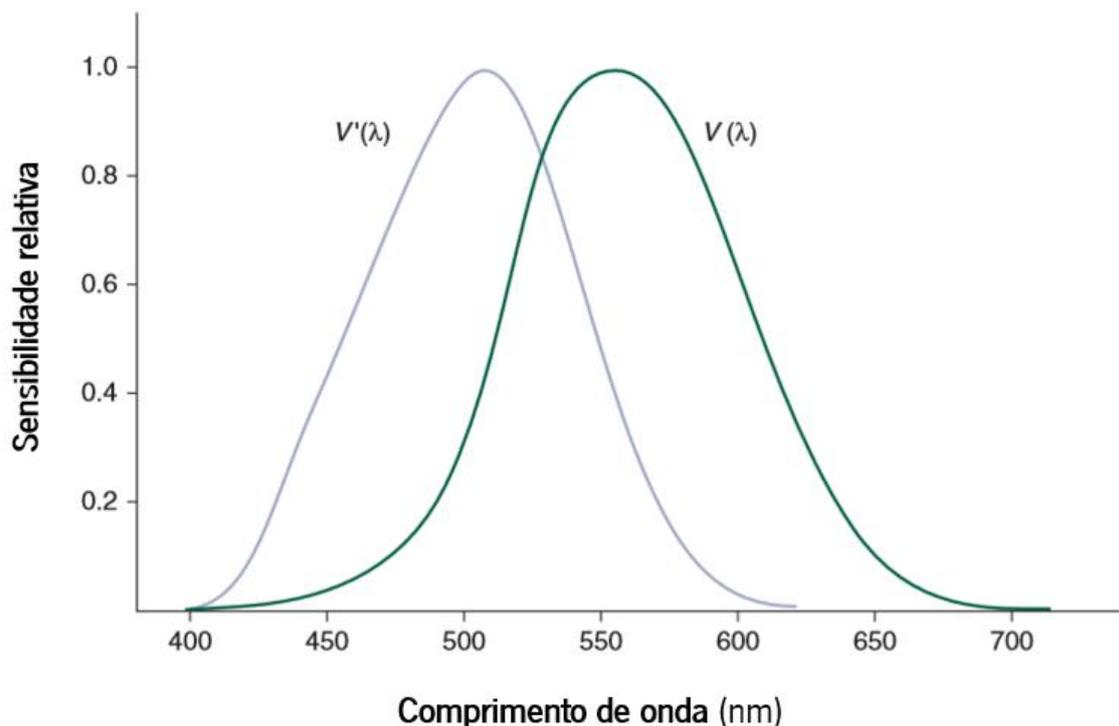


Figura 14. Eficiência luminosa dos bastonetes,  $V'(\lambda)$ , e dos cones,  $V(\lambda)$ , ou curvas de sensibilidade relativa espectral escotópica e fotópica, respetivamente. Adaptado de Schwartz (2010)<sup>21</sup>

As medidas fotométricas permitem determinar se duas luzes são igualmente brilhantes, ou, no caso de alguma ser mais brilhante, qual o fator que a menos brilhante deve aumentar em potência radiante (mantendo a mesma composição espectral relativa) para os dois brilhos parecerem iguais. No entanto, as medidas fotométricas não são capazes de indicar quão brilhante uma luz parecerá, pois depende das condições de visualização do observador, nomeadamente campo de visão, distância, objetos circundantes, fundo e tipo de iluminação utilizada.<sup>50</sup>

Todas as grandezas definidas em radiometria possuem um correspondente direto em fotometria e encontram-se representadas na Tabela 1.<sup>51,56,57</sup>

Tabela 1. Correspondência entre as grandezas radiométricas e fotométricas e suas unidades SI. Adaptada de McCluney (1994)<sup>57</sup>

Radiometria		Fotometria	
	Unidades SI		Unidades SI
Fluxo radiante	W	Fluxo luminoso	lm
Intensidade radiante	W/sr	Intensidade luminosa	lm/sr = cd
Irradiância	W/m <sup>2</sup>	Iluminância	lm/m <sup>2</sup> = lx
Radiância	W sr <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Luminância	cd/m <sup>2</sup>

Na Figura 15 encontram-se representadas as grandezas fotométricas.

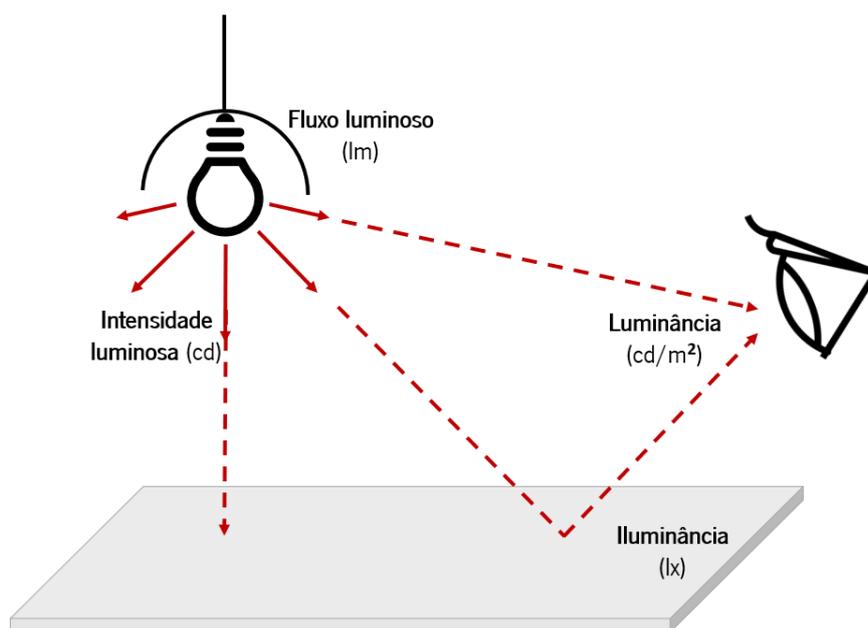


Figura 15. Representação das grandezas fotométricas, e respectivas unidades SI.

### *Fluxo luminoso*

O fluxo luminoso é o equivalente fotométrico do fluxo radiante. Trata-se da quantidade total de luz emitida por uma fonte luminosa, capaz de provocar uma ação visual sobre o observador. É representado por  $\Phi$  e a sua unidade é o lúmen (lm) que corresponde a 1/680W emitidos no comprimento de onda de 555nm e equivale à máxima sensibilidade do olho. O fluxo luminoso é medido com um aparelho denominado radiômetro ou fotômetro.<sup>6,56-58</sup>

### *Intensidade luminosa*

O equivalente fotométrico da intensidade radiante é a intensidade luminosa. Esta consiste na medida da percepção do brilho emitido por uma fonte de luz. É representada por I e a sua unidade é a candela (cd). A intensidade luminosa pode ser medida em laboratório com goniofotômetros.<sup>6,56-58</sup>

### *Iluminância*

A iluminância é o equivalente fotométrico da irradiância, que consiste no fluxo luminoso emitido por uma fonte que incide sobre uma superfície iluminada a uma certa distância da mesma, por unidade de área. É representada por E e a sua unidade é o lux (lx). A iluminância pode ser medida com um aparelho denominado luxímetro.<sup>6,56-58</sup>

### *Luminância*

A luminância é o correspondente fotométrico da radiância e trata-se da razão entre a intensidade luminosa numa determinada direção e a área da superfície aparente do observador. Esta grandeza é representada por L e a sua unidade é a candela por metro quadrado (cd/m<sup>2</sup>). A luminância máxima é obtida, quando os olhos do observador se encontram perpendicularmente à superfície luminosa. Pode ser direta ou indireta; é direta quando a superfície é um iluminante, e indireta no caso de a superfície ser iluminada. O luminancímetro é o aparelho que permite medir a luminância.<sup>6,56-58</sup>

A luminância é a responsável pela sensação de claridade, dado que a maior ou menor claridade com que vemos os objetos iluminados depende da sua luminância.<sup>56</sup>

#### 2.2.4. Iluminação

A luz é um elemento essencial na percepção de todas as cores. Uma fonte de iluminação pode ser quantificada através da sua distribuição de energia espectral (SPD). A distribuição de energia espectral, usualmente representada pelo símbolo  $S(\lambda)$ , descreve a potência por unidade de área e por unidade de comprimento de onda de uma iluminação.<sup>53</sup>

Existem diversos tipos de fontes de iluminação. A luz do dia é a mais importante e consiste na mistura de luz solar direta e dispersa pelo céu.<sup>50,59</sup> As fontes de luz artificial também são bastante utilizadas no nosso dia-a-dia, nas mais diversas tarefas.

#### *Temperatura de cor*

A temperatura de cor expressa a aparência de cor da luz emitida pela fonte de luz, e é medida em kelvin (K). Esta propriedade está diretamente relacionada com a emissão de um corpo negro, denominado por radiador de Plack.<sup>50</sup>

Um corpo negro ou radiador de Planck é definido como um corpo capaz de irradiar em todos os comprimentos de onda. Inicialmente emite radiação infravermelha e consoante a temperatura aumenta há emissão na zona do visível. Na zona do visível, começa por emitir luz vermelha, passa por laranja, amarelo, branco e azul, cobrindo todo espectro visível, dependendo da temperatura a que se encontra o corpo negro.<sup>58</sup>

Através da Figura 16 é possível observar que a quantidade de energia irradiada aumenta à medida que a temperatura aumenta. Em temperaturas abaixo de 5600 K, existe mais energia a ser radiada em comprimentos de onda mais longos do que em curtos do espectro visível, e a temperaturas acima de 5600 K, mais energia é irradiada em comprimentos de onda curto. Contudo, na Figura 17 no que se refere apenas à zona do visível, para temperaturas entre 2000 K e 3400 K, a componente espectral da luz passa a ter uma maior contribuição dos comprimentos de onda curtos, diminuindo nos longos.<sup>50</sup>

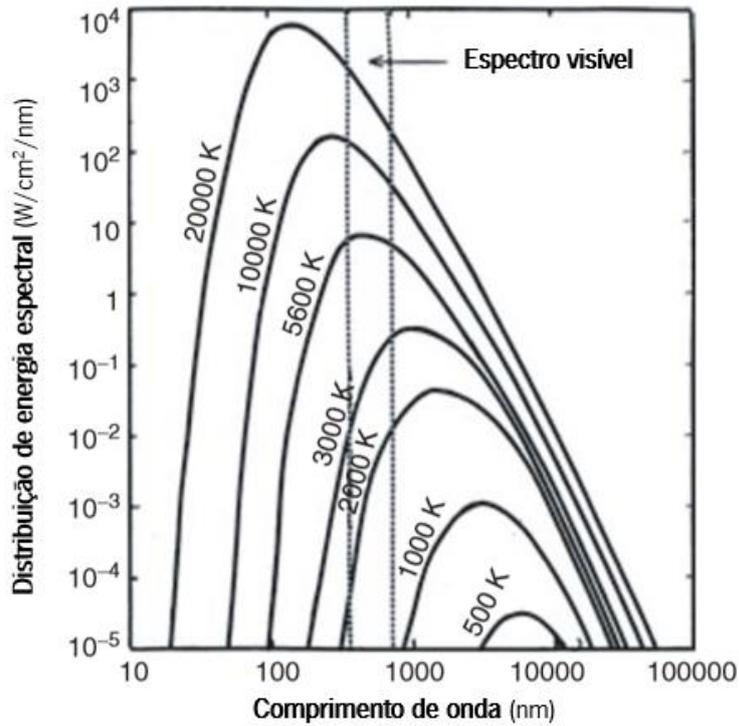


Figura 16. Distribuição de energia espectral do radiador de Planck a diferentes temperaturas. À medida que a temperatura diminui, o pico da curva de radiação do corpo negro desloca-se para menores intensidades e maiores comprimentos de onda. Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup>

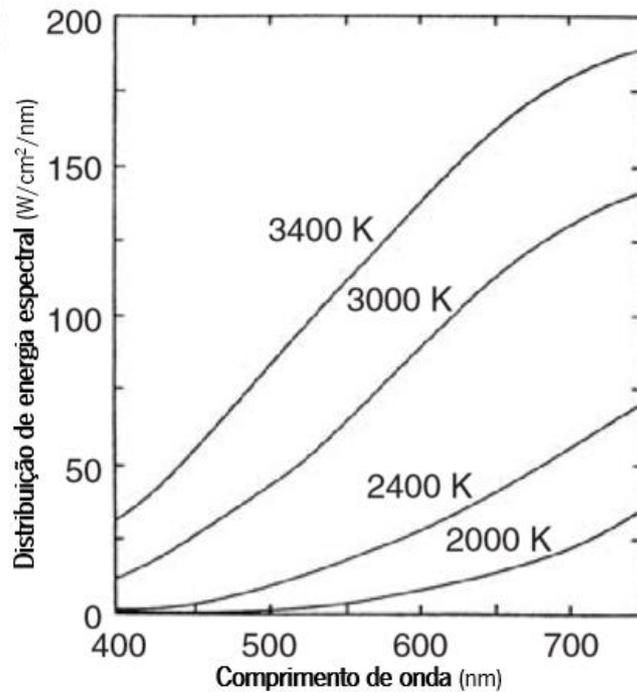


Figura 17. Distribuição de energia espectral do radiador de Planck, apenas na zona do visível, para quatro temperaturas: 2000 K, 2400 K, 3000 K e 3400 K. Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup>

Se a distribuição de energia espectral relativa de uma determinada fonte for a mesma que a de um radiador de Planck, a temperatura do radiador é referida como a temperatura de distribuição da fonte. Existem fontes com cromaticidade igual à de um radiador de Planck, mas não possuem igual distribuição espectral. Nestes casos, a fonte é caracterizada pela temperatura do corpo negro e é referida como temperatura de cor.<sup>50,59</sup>

Assim, a temperatura de cor correlacionada de uma fonte de luz é a temperatura em unidades de Kelvin (K) em que um corpo negro aquecido emite a mesma cor que a fonte. Geralmente, as fontes de iluminação são classificadas pela sociedade em geral, em termos de temperatura de cor por quentes, quando as temperaturas de cor estão abaixo de 3500 K, e frias, quando a temperatura de cor se encontra acima de 5000 K.<sup>58</sup>

Quando o estímulo possui cromaticidade semelhante à do radiador de Planck, mas não exatamente a mesma, caracteriza-se a cor do estímulo em função da temperatura do radiador de Planck, cuja cor percebida se assemelha mais à do dado estímulo. Esta temperatura é denominada por temperatura de cor correlacionada.<sup>50,59</sup>

### *Luz natural*

A fonte de iluminação mais importante é a luz do dia produzida pelo sol. Tanto a luz solar direta como a luz solar dispersa pela atmosfera e pelos objetos circundantes são componentes da luz natural, fundamental na percepção da cor.<sup>60</sup>

Toda a luz do dia é proveniente do sol, cuja temperatura é de milhões de graus no centro, contudo, na sua atmosfera, é apenas cerca de 5800 K. Como a luz do sol tem que passar tanto pela sua própria atmosfera, como pela da Terra, a sua temperatura de cor correlacionada vista da superfície da Terra é menor, sendo cerca de 5500 K. A Figura 18 representa a estimativa de uma distribuição de energia espectral típica do sol e da luz do céu recebidas na superfície da Terra. Na mesma figura, encontra-se representada a distribuição de energia espectral do radiador de Planck com a mesma temperatura de cor correlacionada.<sup>50,59</sup> A combinação da luz do sol e céu não tem uma distribuição suave como a do radiador de Planck, devido às absorções seletivas da luz pelas atmosferas do sol e da Terra. A atmosfera do sol absorve principalmente na forma de linhas de absorção muito estreitas. E as absorções mais significativas da atmosfera da Terra são de dois tipos: primeiro, a luz é perdida no final do comprimento de onda curto do espectro como resultado

da dispersão da radiação azul e ultravioleta, como é possível observar pela inclinação abrupta descendente no lado esquerdo da Figura 18; em segundo lugar, a luz é absorvida por moléculas de vários gases, particularmente o oxigénio e vapor de água, responsáveis pelas inúmeras ondulações. Contudo estas variações encontram-se maioritariamente fora da zona do visível, acabando por a divergência entre as curvas acontecer mais para comprimentos de onda onde o olho humano não consegue perceber, fora do intervalo do visível.<sup>50,59,60</sup>

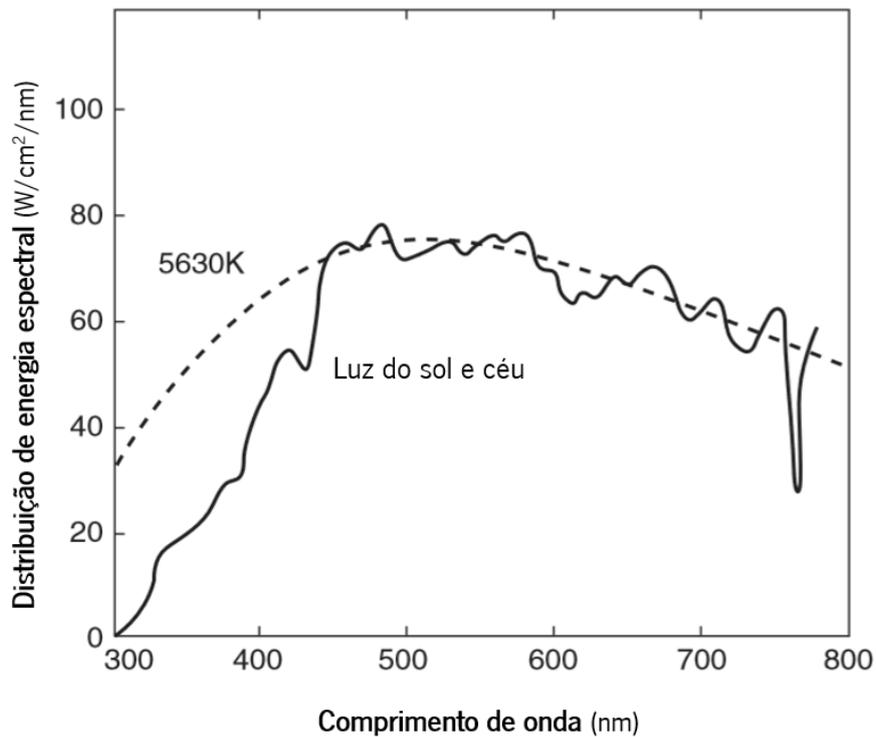


Figura 18. Distribuição de energia espectral relativa típica da luz do dia (curva preenchida), e do radiador de Planck com a mesma temperatura de cor correlacionada, neste caso a 5630 K (curva tracejada). Adaptado de Hunt (2011)<sup>50</sup>

### *Luz artificial*

A escolha de uma correta fonte de iluminação pode ajudar a criar um ambiente apropriado para pessoas com necessidades visuais especiais e, desta forma, melhorar a sua qualidade de vida<sup>58</sup>. Além disso, os sistemas de iluminação inadequados estão associados a diversos problemas de saúde, como o caso da iluminação noturna que pode alterar os ritmos circadianos, causando problemas de sono.<sup>51,62</sup>

As fontes de iluminação são geralmente definidas pela sua eficiência, cor da luz e propriedades de reprodução de cor.<sup>63</sup> A sua eficiência é obtida a partir da energia elétrica que as

fontes consomem para produzir luz. Esta relação entre o fluxo luminoso e a potência elétrica consumida é expressa por lumens por watt (lm/w).<sup>50,64</sup>

O índice de reprodução de cor foi definido pela CIE como o efeito de um iluminante na aparência das cores dos objetos, por comparação consciente ou subconsciente com a sua aparência de cor, sob um iluminante de referência.<sup>50,59</sup>

### *Fontes de luz incandescentes*

As fontes de iluminação incandescentes têm como base as leis da radiação de um corpo negro, e a temperatura, a que o filamento emite a luz, é o fator mais importante.<sup>50,58,59,64</sup>

O material mais utilizado como filamento é o tungstênio<sup>50,58,59,64</sup> devido a possuir um ponto de fusão em temperaturas elevadas de as suas propriedades mecânicas não mudarem sensivelmente até atingir uma temperatura próxima da temperatura do seu ponto de fusão.<sup>64</sup> Através da Figura 19, é possível observar as semelhanças entre a distribuição de energia espectral deste tipo de lâmpada e a de um radiador de Planck.<sup>50</sup> Todavia, a emissão de luz é menor que a de um corpo negro na mesma temperatura.<sup>50,63,64</sup> Consoante a temperatura do filamento aumenta, o fluxo luminoso gerado pelo filamento aumenta também.<sup>50,63,64</sup> Quando atinge uma temperatura elevada, cerca de 2500 K, o filamento torna-se “incandescente”.<sup>50,63,64</sup>

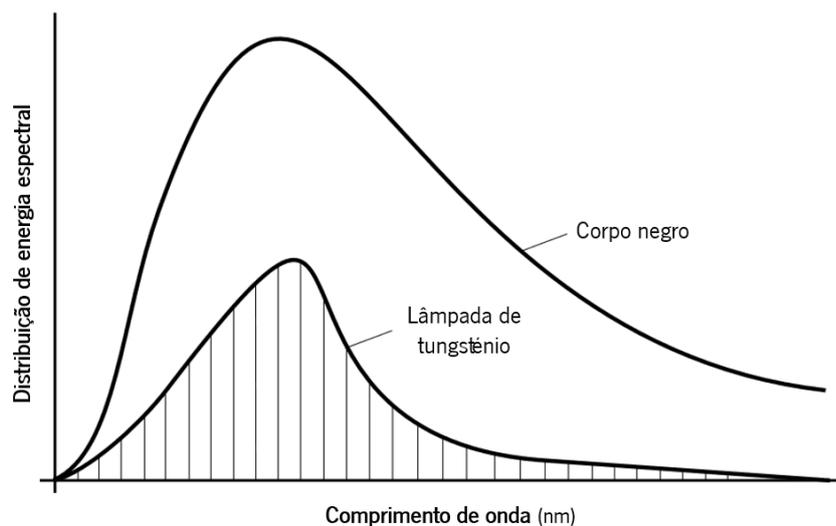


Figura 19. Distribuição de energia espectral de uma lâmpada de tungstênio comparada à de um corpo negro. Adaptado de Narisada (2004)<sup>63</sup>

Para melhorar a eficiência das lâmpadas incandescentes sem reduzir o seu tempo de vida útil, introduziu-se a chamada lâmpada incandescente de halogénio.<sup>63</sup> Este tipo de lâmpada pode funcionar com uma temperatura de cor mais elevada, cerca de 2850 K a cerca de 3300 K e com melhor eficácia.<sup>50</sup>

### ***Lâmpadas fluorescentes***

As lâmpadas fluorescentes são tipos de iluminação por descarga elétrica num gás.<sup>50,63,64</sup> Consistem em tubos de vidro com gás de mercúrio em baixa pressão, que emite radiação ultravioleta, e um revestimento fluorescente que origina a luz visível da lâmpada.<sup>50</sup> Os seus altos níveis de iluminação, alta eficiência e boa reprodução de cor, permitem que estas lâmpadas sejam geralmente utilizadas na iluminação geral, especialmente em ambientes industriais e comerciais.<sup>58,64</sup>

### ***Díodo emissor de luz (LED)***

O díodo emissor de luz, usualmente conhecido pela sigla LED (do inglês “*Light Emitting Diode*”), consiste num díodo semicondutor inorgânico.<sup>50</sup>

A luz emitida pelo LED não é monocromática. Contudo, possui uma banda espectral relativamente estreita (cerca de 40nm de largura).<sup>50,59,61</sup> A cor da radiação emitida depende da composição do material semicondutor utilizado e pode estar na região infravermelha, visível ou próxima do ultravioleta do espectro.<sup>50</sup>

Os LEDs coloridos são atualmente utilizados para diversos fins. Mas a luz branca é a mais requisitada em condições de iluminação geral. Existem diversas formas de produzir luz branca, ou quase branca, com os LEDs. Na Figura 20 encontram-se alguns dos métodos mais utilizados.<sup>50,58,59,64</sup>

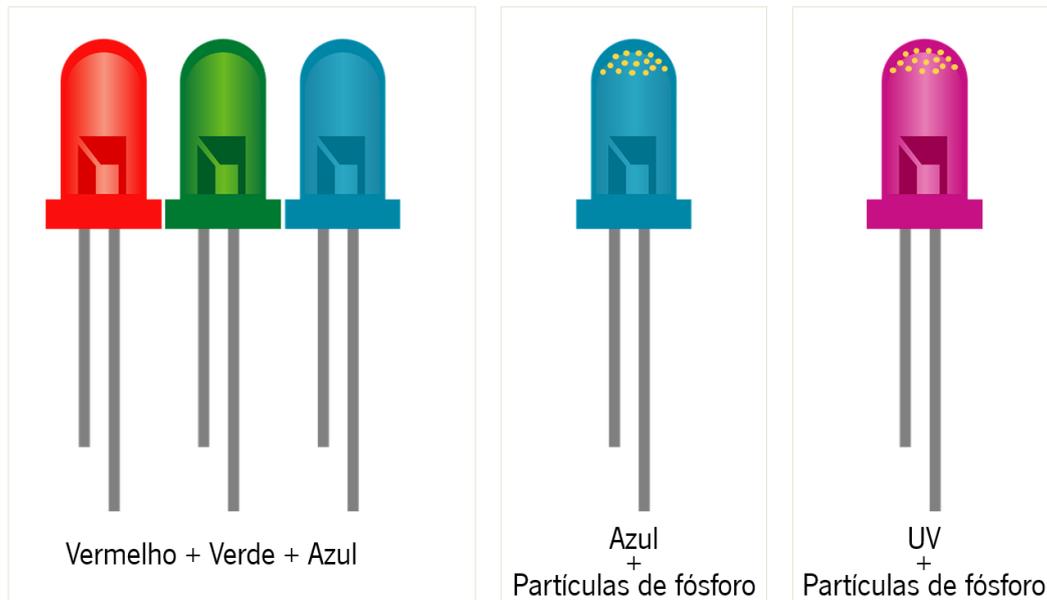


Figura 20. Métodos para produzir luz branca através de LEDs.

Um dos métodos mais utilizados em fontes de iluminação deste tipo, emite luz branca através da combinação de três LEDs na mesma lâmpada: vermelho, verde e azul. A distribuição de energia espectral deste método encontra-se representada na Figura 21. Contudo, é possível obter luz branca sem a necessidade de utilizar três LEDs diferentes: com apenas um LED azul a emitir luz azul em comprimentos de onda centrados entre os 450nm e os 470nm e partículas de fósforo que vão converter parte da luz azul em luz de comprimentos de onda mais longos, como representado na Figura 22, ou através da utilização de um LED a emitir luz UV e várias partículas de fósforo diferentes.<sup>50,58,64</sup>

Os LEDs possuem, então, algumas vantagens, quando comparados a outros tipos de iluminação. A sua alta eficiência, a vida útil longa e a economia de energia, que levou a um aumento da sua comercialização, são algumas dessas vantagens.<sup>65</sup>

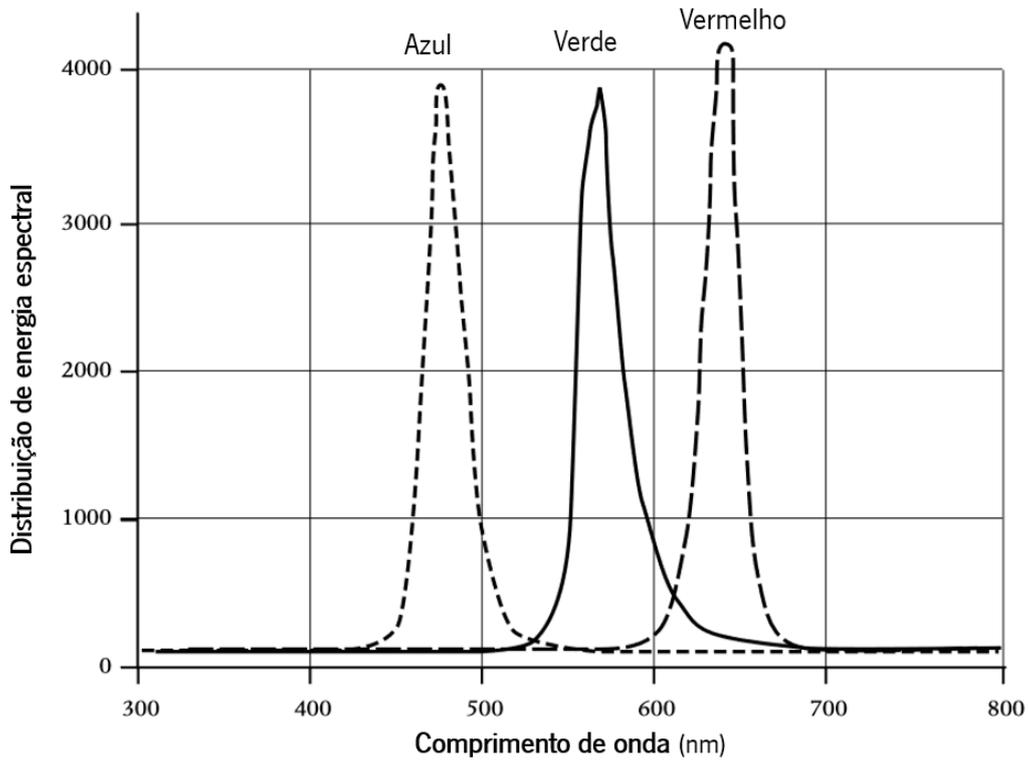


Figura 21. Distribuição de energia espectral de um LED "branco" composto por um LED vermelho, verde e azul em separado. Adaptado de Schreuder (2008)<sup>64</sup>

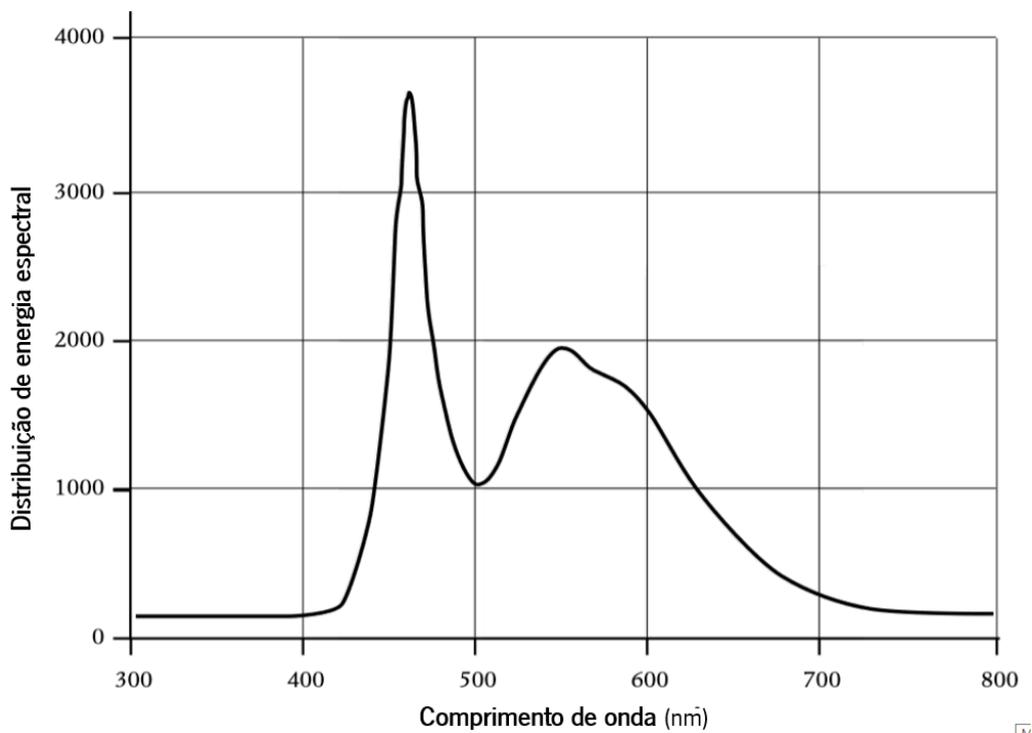


Figura 22. Distribuição de energia espectral de um LED "branco" composto por um LED a emitir luz azul e com partículas de fósforo. Adaptado de Schreuder (2008)<sup>64</sup>

### 2.3. Impacto das propriedades da luz na visão

Vários estudos relacionam a luz artificial emitida nos ambientes que nos rodeiam com aspetos cognitivos, físicos e de sensibilidade dos seres humanos, como o conforto visual.<sup>2,65</sup>

A luz interna artificial é classificada pela sua temperatura de cor correlacionada e iluminância como responsável pelas reações psicológicas humanas.<sup>2,65</sup>

A temperatura de cor correlacionada (CCT), como um descritor da cor da iluminação, é uma das propriedades da luz que foi estudada com base no seu impacto na visão. Julga-se que a percepção causada por esta propriedade seja um parâmetro psicológico influenciado por fatores subjetivos e objetivos.<sup>66</sup> As pessoas sentem-se mais propensas a sentir-se quentes em ambientes de luz com comprimentos de onda na zona do vermelho (luz quente). Pelo contrário, em comprimentos de onda com predominância no azul (luz fria) as pessoas sentem-se mais frias<sup>67</sup>.

Relativamente à iluminância, Baron *et al.*<sup>66</sup> analisaram os efeitos da iluminação interior, nomeadamente iluminância e temperatura de cor no desempenho de tarefas visuais cognitivas. Os parâmetros analisados mostraram diferenças estatisticamente significativas tanto com a iluminância como com a temperatura de cor. Outro estudo conduzido por Boyce *et al.*<sup>68</sup> avaliou a influência das diferentes iluminâncias nas tarefas visuais. Particularmente, a identificação da direção dos anéis de Landolt para oito tamanhos diferentes. Os resultados foram de encontro aos obtidos por Baron *et al.*<sup>66</sup>, em que a performance visual melhorou à medida que a iluminância aumentava.

Majumder & Zaimi<sup>69</sup> compararam a amplitude de acomodação, medida com um ecrã de computador (*visual display unit* – VDU) como alvo, em três iluminâncias diferentes: 23lx, 17lx e 4lx. Os autores não encontraram resultados estatisticamente significativos entre a amplitude de acomodação e os diferentes níveis de iluminância como ilustrado na Figura 23. Contudo, neste estudo em particular, a luz foi emitida pelo alvo e não refletida no alvo.

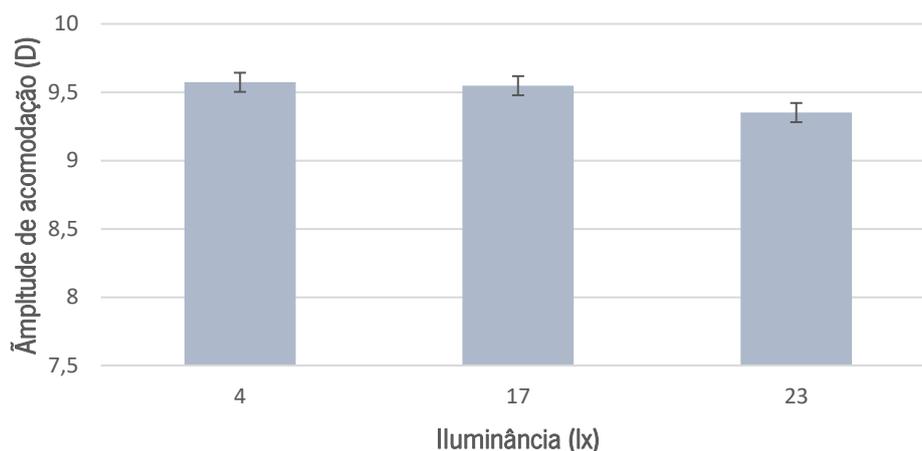


Figura 23. Média e desvio-padrão da amplitude de acomodação para os diferentes níveis de iluminância. Adaptado de Majumder (2017)

Diferentes condições de iluminação causam variações no diâmetro pupilar e, conseqüentemente, alterações na acomodação ocular.<sup>70,71</sup> Watson & Yellott<sup>72</sup> desenvolveram uma fórmula capaz de estimar o diâmetro pupilar em várias condições de iluminação, tendo em conta fatores importantes como a idade, o tamanho do campo de adaptação e se um ou ambos os olhos são adaptados às condições de iluminação. A Figura 24 representa a variação do diâmetro pupilar em função da iluminância para uma população jovem ( $\approx 20$  anos), com um campo de adaptação de  $20^\circ$ . Esta variação no diâmetro pupilar vai influenciar a profundidade de foco do sistema ocular,<sup>72</sup> sendo uma possível causa na variação dos valores acomodativos em situações onde é alterada as condições iluminância com que se realizam os testes acomodativos. Por essa razão, é desejável estimar a variação do diâmetro pupilar com a variação de iluminância de modo a saber qual a sua real influência.

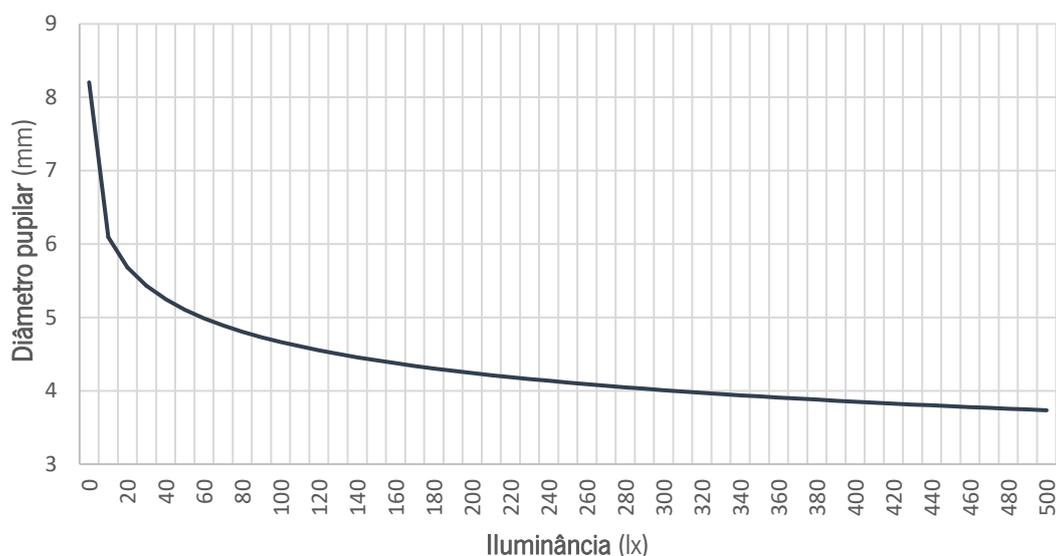


Figura 24. Variação do diâmetro pupilar em função da iluminância, obtida através da fórmula de Watson & Yellott (2012)<sup>72</sup>

Apesar de todas as vantagens que tornam as lâmpadas LED uma das fontes de iluminação da nova geração, algumas das suas propriedades podem causar efeitos adversos no conforto visual ou saúde ocular.<sup>65</sup>

Cai *et al.*<sup>65</sup> estudaram a influência da CCT de um LED na fisiologia, função e percepção subjetiva de desconforto ocular. Foram medidas as aberrações de alta ordem (HOAs), a MTF e a relação AC/A, após uma tarefa de leitura sob LED com CCT de 4000 K, 5000 K e 6000 K. Os autores concluíram que os melhores resultados, ou seja, menor influência na função ocular, foram obtidos com o LED de 5000 K.

Yamagishi *et al.*<sup>73</sup> analisaram a influência da CCT de um LED branco na velocidade e precisão de leitura de anéis de Landolt, numa população jovem e idosa. Assim, descobriram que a condição de iluminação privilegiada para realizar a tarefa era com CCT de 5000 K. Também concluíram que para uma população idosa a iluminação que produzia um melhor desempenho visual era com CCT entre os 5000 K e os 8200 K. Em termos de acuidade visual, Nawab<sup>74</sup> obteve os melhores resultados em ambientes com iluminação de alta CCT (7500 K), quando comparados aos obtidos com uma CCT de 3500 K (CCT baixa). Desta forma, valores elevados de CCT podem originar melhores resultados em termos de desempenho e acuidade visual.

Num estudo, conduzido por Berman *et al.*<sup>75</sup> concluiu-se que, tanto a temperatura de cor como a intensidade de iluminação afetam a acuidade visual, sob condições típicas de leitura. Mas,

com a mesma intensidade luminosa, a acuidade visual apresentou valores estatisticamente significativos mais elevados com temperaturas de cor correlacionada mais elevadas. Lin & Huang<sup>76,77</sup> suportaram esses mesmos resultados, num estudo em que apresentaram a luz branca como a recomendada para tarefas visuais, pois a luz amarela (CCT menor que o CCT da luz branca), aumenta a fadiga visual e conseqüentemente afeta a performance visual.

Resultados apresentados num estudo recente por Yang *et al.*<sup>78</sup> sustentam que a luz emitida por LEDs provoca dificuldades na focagem em visão de perto pela alta intensidade de luz azul, o que interfere no comprimento de onda onde ocorre o processo de focagem normal (verde/vermelho).

Recentemente, Male *et al.*<sup>79</sup> realizaram um estudo da influência das diferentes distribuições de energia espectral sobre acomodação, vergência e performance de leitura. Foram utilizados quatro tipos de iluminação artificial diferente: lâmpada fluorescente compacta, lâmpada de tungstênio, lâmpada fluorescente e LED. Concluíram que a acomodação não sofria alterações com os quatro tipos de iluminação. Contudo, o desempenho de leitura e o ponto próximo de convergência mudava significativamente com a distribuição espectral da luz, sendo os melhores valores em termos de leitura e tarefas visuais obtidos com a lâmpada de tungstênio. Ram *et al.*<sup>80</sup> analisaram as mesmas fontes de iluminação que o estudo anterior, mas em contexto diferente. Foi avaliado o desconforto visual, sendo este maior com a lâmpada de tungstênio e o LED.

Clinicamente, estes resultados sugeriram uma associação entre o tipo de iluminação e o desempenho visual. Distribuições espectrais inadequadas podem levar a problemas precoces de fadiga ocular, com impacto no desempenho geral dos indivíduos. No entanto, estudos anteriores não estimaram o impacto de iluminação de banda estreita no desempenho visual, concentrando-se principalmente no CCT.

# Capítulo 3

---

Material e Métodos

## Capítulo 3 - Material e Métodos

---

### 3.1. Tipo de estudo

Trata-se de um estudo experimental, que permitiu estudar e analisar os parâmetros acomodativos oculares em diferentes condições de iluminação numa população emetrope.

A recolha de dados decorreu no Laboratório de Investigação em Ótica da Visão e Instrumentação Oftálmica do Centro de Física, da Universidade do Minho. O protocolo do estudo foi aprovado pela Subcomissão de Ética para as Ciências da Vida e da Saúde da Universidade do Minho (Braga, Portugal).

A todos os participantes foram apresentados o objetivo e o procedimento do estudo, assim como foram esclarecidas eventuais dúvidas em relação ao mesmo. Seguindo as normas da Declaração de Helsínquia, foi entregue um consentimento informado (Anexo 1) que foi devidamente assinado e datado pelo investigador e participantes.

### 3.2. Caracterização da amostra

Todos os participantes foram recrutados na comunidade académica. Realizaram-se 71 consultas de optometria a alunos da Universidade do Minho, com idades compreendidas entre os 18 e os 35 anos.

Na seleção da amostra do estudo, foram classificados sujeitos emetropes aqueles que apresentavam equivalente esférico entre  $-0,50D$  e  $+0,50D$ .<sup>81-83</sup> No estudo, para além de emetropes, também foram avaliados míopes e hipermetropes com equivalente esférico (EE) inferior a  $1,00D$  e acuidade visual igual ou superior a  $6/6$  com a melhor correção. Todos os participantes com visão das cores anormal ou historial clínico de estrabismo, doença ou cirurgia ocular foram excluídos. No âmbito do estudo, apenas participantes sem problemas acomodativos foram incluídos.

Para o diagnóstico das disfunções acomodativas seguiram-se os critérios de diagnóstico descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Critérios de diagnóstico das disfunções acomodativas. Adaptado de Scheiman (2014)<sup>25</sup>

Disfunções acomodativas	Critérios de classificação
Insuficiência acomodativa	- Am inferior em pelo menos 2,00D à esperada para a idade (fórmula de <i>Hoffstetter</i> ), monocular e binocular; - ARP baixa - FA monocular e binocular baixa (dificuldade com lentes negativas) - MEM elevado
Excesso acomodativo	- FA monocular e binocular baixa (dificuldades com lentes positivas) - ARN baixo - MEM baixo
Inflexibilidade acomodativa	- FA monocular e binocular baixa (dificuldade com lentes positivas e negativas) - ARN e ARP baixa

Após as consultas dos 71 participantes e avaliados os critérios de inclusão, apenas 26 foram selecionados para o estudo e considerados para análise estatística.

Todos os participantes colaboraram de forma voluntária no estudo, aceitando comparecer em consultório para três consultas de optometria.

### 3.3. Material

Para a realização das medidas, sob diferentes condições de iluminação, foi utilizada a lâmpada Ledigma (Ledigma Ltd, Vilnius, Lithuania) representada na Figura 25. Esta consiste numa fonte de luz LED composta por 10 LEDs individuais. A combinação da distribuição de energia espectral de cada LED, que pode ser controlado individualmente e independentemente, fornece uma distribuição de energia espectral total que varia de 380 a 720nm.



Figura 25. Lâmpada Ledigma. Lâmpada utilizada como fonte de iluminação para as diferentes condições de iluminação. (Ledigma Ltd, Vilnius, Lithuania).

Na Figura 26 encontra-se representada, por uma linha preta, a distribuição de energia espectral de todos os LEDs sintonizados para a potência máxima. As linhas a cores representam a distribuição de energia espectral de cada LED individualmente e a intensidade relativa entre eles. Os LEDs encontram-se distribuídos da seguinte forma: três LEDs para a região do azul, três para a região do verde, três para a região do vermelho e um LED branco.

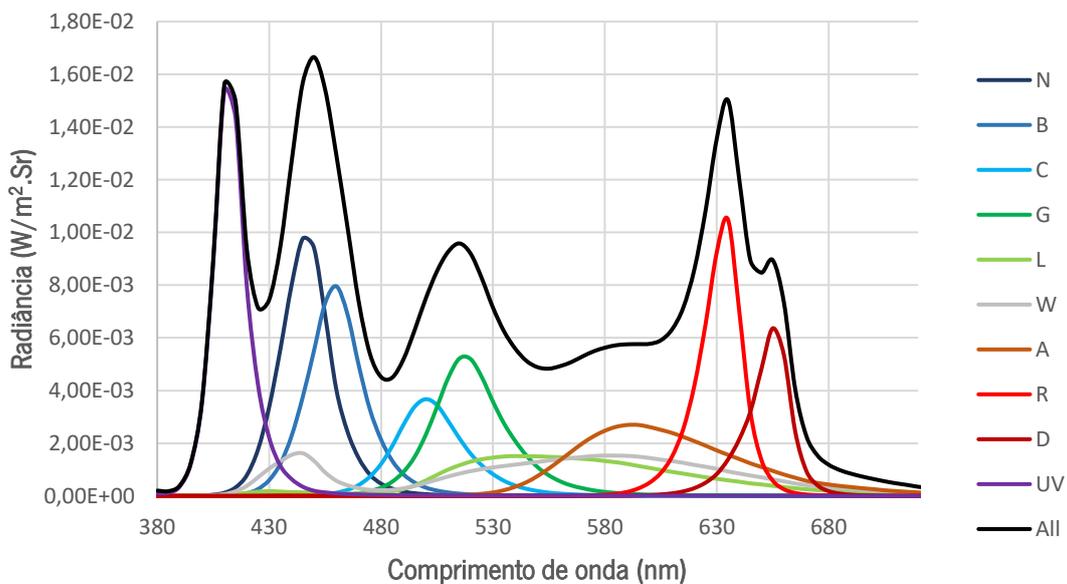


Figura 26. Distribuição de energia espectral da fonte de luz Ledigma. UV (UV), azul real (N), ciano (C), verde (G), lima (L), amber (A), vermelho (R), vermelho escuro (D) e branco (W). A linha preta representa a lâmpada sintonizada para a luz branca com todos os LEDs individuais na potência máxima.

A intensidade da luz emitida por cada LED pode ser ajustada individualmente e independentemente, de forma a obter a distribuição de energia espectral global desejada para a iluminação.

As distribuições de energia espectral dos LEDs, utilizados neste trabalho, encontram-se representados na Figura 27. O pico da intensidade para o LED verde (G) e vermelho (R) ocorre a cerca de 515nm e 635nm, respetivamente.

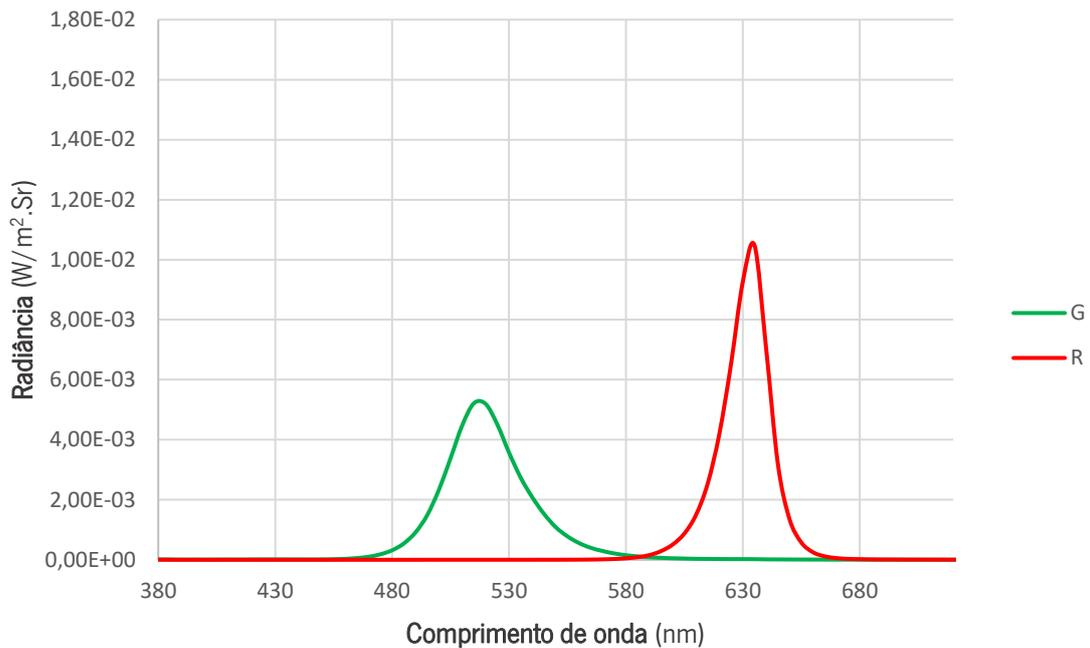


Figura 27. Distribuição de energia espectral para o LED verde (G) e vermelho (R).

A intensidade foi ajustada individualmente para que a mesma iluminância seja fornecida em todas as condições de iluminação, garantindo, assim, um nível de iluminância de cerca de 150lx para todas as condições experimentais. Este valor corresponde ao nível máximo de iluminância que é possível alcançar com o LED verde.

O luxímetro (Illuminance meter T-10; Konica Minolta Sensing Inc., Japan) representado na Figura 28 foi utilizado, para obter os valores de iluminância nas diferentes condições de iluminação e calibrar a intensidade da fonte em cada situação por forma a garantir a igualdade de iluminância em cada condição experimental.



Figura 28. Luxímetro utilizado na medição da iluminância nas diferentes condições de iluminação (Illuminance meter T-10; Konica Minolta Sensing Inc., Japan) Retirado de <sup>84</sup>

### 3.4. Procedimento experimental

A recolha de dados foi dividida em três fases. Na primeira, realizou-se uma avaliação optométrica completa, com o objetivo de validar os indivíduos com os critérios de inclusão necessários. A visão das cores de cada paciente, foi avaliada assim como o erro refrativo, os parâmetros acomodativos e de visão binocular. Numa segunda e terceira visita ao consultório aferiram-se, apenas, os parâmetros acomodativos, mas, desta vez, em diferentes condições de iluminação.

Na realização das medidas em diferentes condições de iluminação, garantiu-se que o otótipo era iluminado de forma uniforme, sem sombras e à mesma distância do foróptero e da lâmpada para todos os participantes.

#### 3.4.1. Exames preliminares

Como ponto de partida estabeleceu-se a acuidade visual, o ponto próximo de convergência e avaliou-se o *cover test* de cada participante.

Avaliou-se a AV de longe monocular e binocular, através do otótipo de *Snellen* a uma distância de 6 metros do observador.

O ponto próximo de convergência consiste no ponto mais próximo a que os olhos conseguem convergir. A uma distância menor do que essa ocorre a quebra de fusão e o paciente, ou refere ver duas imagens (diplopia), ou suprime a imagem de um olho. Ao paciente pediu-se

que fixasse a ponta de uma caneta com os dois olhos abertos e considerou-se o valor em que referia ver duas imagens.

O *cover test* unilateral e alternante em VP (40cm) foi efetuado após o paciente ter fixado a ponta de uma esferográfica e avaliou-se a existência de forias.

### 3.4.2. Avaliação da visão das cores

Por causa da utilização de iluminações com diferentes comprimentos de onda, foi necessário determinar com o teste de Ishihara se todos os participantes tinham uma visão das cores normal. O teste foi realizado com a iluminação de teto (250lx) da sala onde foram realizadas as consultas a uma distância de aproximadamente 75cm do observador e ligeiramente inclinado, de modo a que o papel ficasse no melhor ângulo em relação à linha de visão do observador. O tempo máximo de resposta não podia ultrapassar os 10 segundos e a normalidade da visão das cores de um observador foi demonstrada se nas primeiras 21 patelas acertasse em 17 ou mais respostas.

### 3.4.3. Avaliação do estado refrativo

Para avaliar o estado refrativo de cada paciente, recorreu-se à retinoscopia estática seguida de um exame subjetivo em visão de longe, partindo do valor neto da retinoscopia.

O exame subjetivo foi realizado através do método de miopização, determinando o valor máximo de potência positiva que proporcionasse ao paciente a melhor AV de longe.

### 3.4.4. Avaliação da visão binocular

Após a determinação do valor do subjetivo de longe, avaliou-se o estado fórico de cada participante com recurso ao Método de *Von Graefe*. Apenas foram medidas as forias laterais, tanto e em VL como em VP.

Após a determinação do valor da foria lateral, foram medidas as reservas fusionais negativas e positivas, primeiro para VL e depois para VP, recorrendo aos prismas de *Risley*. Foram anotados os valores de desfocado (caso existisse), rutura e recuperação.

### 3.4.5. Avaliação dos parâmetros acomodativos

Os parâmetros acomodativos avaliados foram a amplitude de acomodação, atraso acomodativo e flexibilidade acomodativa. Durante a medição destes parâmetros, o paciente estava a usar o valor do exame subjetivo de VL (6m).

A amplitude de acomodação determinou-se recorrendo ao Método de *Sheard*. Foram adicionadas lentes esféricas negativas em passos de 0,25D, até que o paciente indicasse ver desfocadas, de forma constante, as letras do otótipo de VP (40cm). Realizou-se de forma monocular. O valor da amplitude de acomodação é dado pela fórmula de *Hoffstetter*:<sup>85</sup>

$$Am = |L(-)| + 2,50$$

Onde *Am* corresponde à amplitude de acomodação,  $|L(-)|$  é o valor das lentes negativas adicionadas em módulo e 2,50 às dioptrias correspondentes à distância de trabalho de 40cm.

O atraso acomodativo (AA) foi medido de forma objetiva através da retinoscopia de MEM. Com a iluminação reduzida, pediu-se ao paciente para fixar um otótipo a 40cm e mediu-se o atraso acomodativo para o OD e o OE.

A flexibilidade acomodativa foi avaliada de forma monocular e binocular, primeiro em VL e depois em VP. Foram utilizados flippers de  $\pm 2,00D$  em VP (40cm) e de  $-2,00D/0,00D$  em VL (6m). Foram anotados para cada medida o número de ciclos que foram realizados num minuto (cpm)

#### *Avaliação dos parâmetros acomodativos com diferentes iluminações*

Após a primeira consulta, efetuou-se uma seleção da amostra e foram agendadas mais duas consultas com os participantes selecionados.

Na segunda consulta, foram medidas a amplitude de acomodação e flexibilidade acomodativa com diferentes iluminâncias. Na terceira consulta, foram realizados os mesmos exames, mas com diferentes iluminações de distintas cores e temperatura de cor correlacionada. Os valores correspondentes a cada iluminação encontram-se descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Ordem das consultas realizadas ao longo do estudo, com respectivos exames e tipo de iluminação utilizada em cada consulta

Consulta	Exames realizados	Tipo de iluminação
1º Consulta	Realização de uma consulta de optometria completa (seleção da amostra)	Iluminação de teto + luz do foróptero, usualmente utilizada em gabinetes de optometria (260lx)
2º Consulta	1º Amplitude de acomodação monocular 2º Flexibilidade acomodativa monocular	Iluminância: - 30lx - 150lx* - 400lx
3º Consulta	1º Amplitude de acomodação monocular 2º Flexibilidade acomodativa monocular	Cor da iluminação: - Verde (515nm) - Vermelho (635nm) CCT: - 2500K - 4500K

\*este valor de iluminância foi apenas utilizado no estudo da amplitude de acomodação

Com o paciente posicionado, colocou-se o luxímetro junto ao otótipo de visão de perto, com a fotocélula do mesmo na direção do olhar do paciente. Através do *software* da lâmpada, ajustaram-se os parâmetros da iluminação, de modo a obter os valores de iluminância pretendidos em cada condição de iluminação. Em todas as condições de iluminação garantiu-se que o otótipo era iluminado de forma uniforme, sem sombras e à mesma distância do foróptero e da lâmpada para todos os participantes.

Os exames acomodativos foram realizados com o paciente a usar o valor do subjetivo de VL obtido na primeira consulta. Assim, as diferentes condições de iluminação foram controladas de modo a o otótipo de VP (40cm) ser iluminado apenas pela luz proveniente da lâmpada Ledigma. As Figuras 29, 30, 31 e 32 correspondem a modelos 3D representativos do posicionamento do paciente, relativamente à lâmpada e das condições de iluminação durante a segunda e terceira consultas.

Em cada consulta, começou-se sempre pela medição da amplitude de acomodação nas diferentes condições de iluminação e só depois foi medida a flexibilidade acomodativa. A ordem das condições de iluminação utilizadas na medição de cada parâmetro foi aleatória, seguindo uma tabela de aleatorização (Anexo 2).

Na segunda consulta mediu-se a amplitude de acomodação para os três níveis de iluminância como ilustrado na Figura 29, e em seguida a flexibilidade acomodativa para os 30lx e os 400lx, representado na Figura 30.

A flexibilidade acomodativa foi medida em apenas dois níveis de iluminância, de modo a evitar a influência de um possível efeito de treino visual. Segundo Sterner *et al.*<sup>86</sup> e Allen *et al.*<sup>27</sup> a utilização da técnica das lentes positivas no treino da flexibilidade acomodativa provoca um efeito positivo ao longo do tempo.

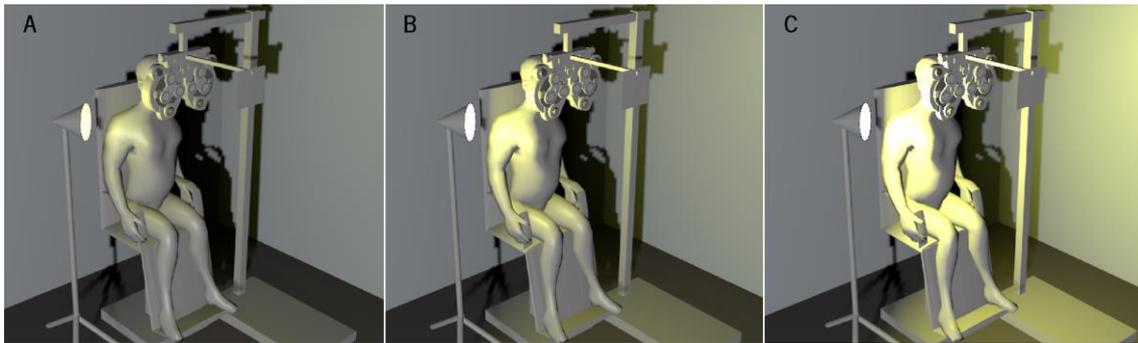


Figura 29. Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da amplitude de acomodação em: A- iluminância de 30lx, B- iluminância de 150lx, C- iluminância de 400lx. De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste.

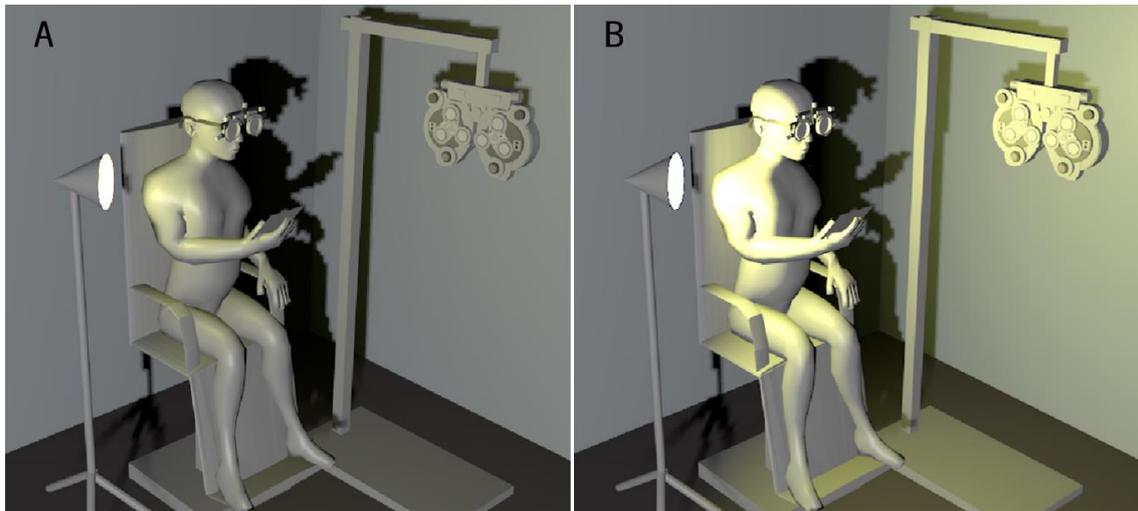


Figura 30. Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da flexibilidade acomodativa em: A- iluminância de 30lx, B- iluminância de 400lx. De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste.

Na Figura 31 encontra-se representado a terceira consulta, onde se mediu a amplitude de acomodação com duas cores de iluminação (verde e vermelho) e ainda com temperatura de cor de 2500K e 4500K. Em seguida, mediu-se a flexibilidade acomodativa apenas com a iluminação verde e vermelha como representado na Figura 32.

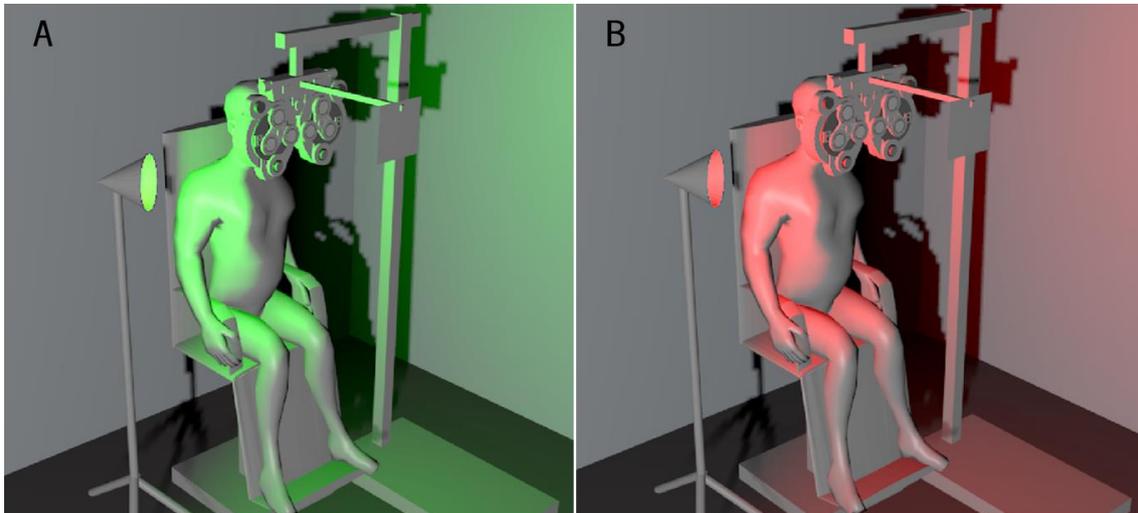


Figura 31. Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da amplitude de acomodação em: A- iluminação de cor verde (515nm), B- iluminação de cor vermelha (635nm). De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste.

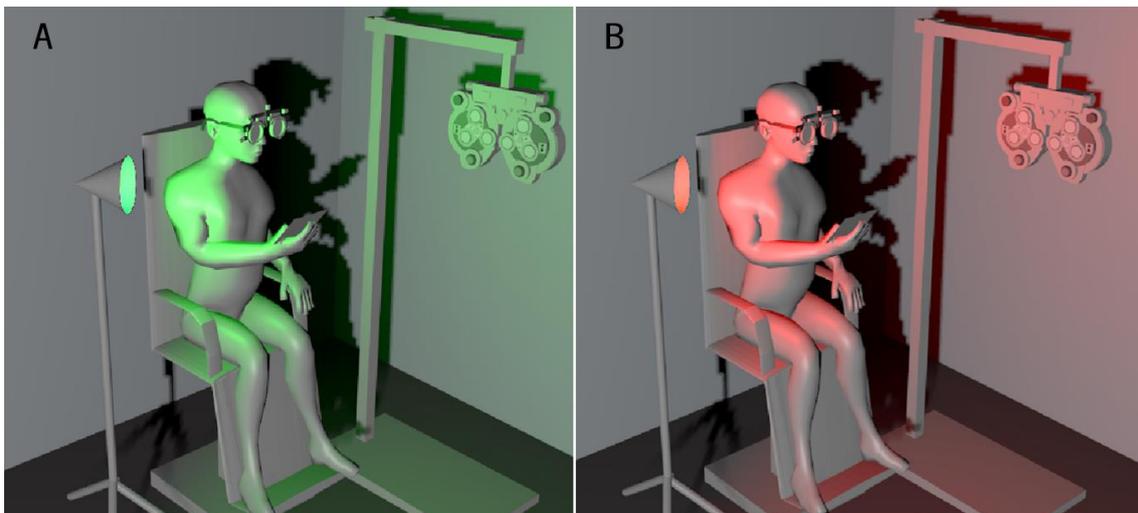


Figura 32. Representação 3D do posicionamento do paciente em relação à lâmpada e simulação das diferentes condições de iluminação durante a medição da flexibilidade acomodativa em: A- iluminação de cor verde (515nm), B- iluminação de cor vermelha (635nm). De notar que o ototipo em VP era apenas iluminado pela lâmpada de teste

### 3.5. Análise estatística

A análise estatística dos resultados obtidos foi realizada com base no software *IBM SPSS Statistics* versão 25.0.

Em primeiro lugar, procedeu-se à avaliação da normalidade das variáveis com o teste *Shapiro-Wilk* ( $n < 30$ ). Para verificação da normalidade das variáveis, o parâmetro de significância estatística,  $p$ , foi definido como inferior a 0,05. Ao ter em conta que todas as variáveis apresentaram distribuição normal, utilizou-se o *paired t-student test*, para comparação das médias das variáveis. Para isso, foram usados os valores médios ( $\mu$ ):

$H_0$  (Hipótese nula): não existe diferenças significativas entre as médias das variáveis

vs

$H_1$  (Hipótese alternativa): existem diferenças significativas entre as médias das variáveis

Sendo:  $H_0: \mu = \mu_0$  vs  $H_1: \mu \neq \mu_0$        $\mu_0$  – valor médio inicial

# Capítulo 4

---

Resultados

## Capítulo 4 - Resultados

### 4.1. Caracterização da amostra

Segundo os critérios de seleção, foram aceites no estudo 26 estudantes. Destes, 21 (80,8%) eram do sexo feminino e 5 (19,2%) do sexo masculino. A caracterização da amostra por sexo encontra-se representada na Figura 33. A idade média dos participantes foi de  $21,38 \pm 2,64$  anos (média  $\pm$  desvio padrão), com valores compreendidos entre os 18 e os 28 anos. A caracterização da amostra por idades encontra-se representada na Figura 34.

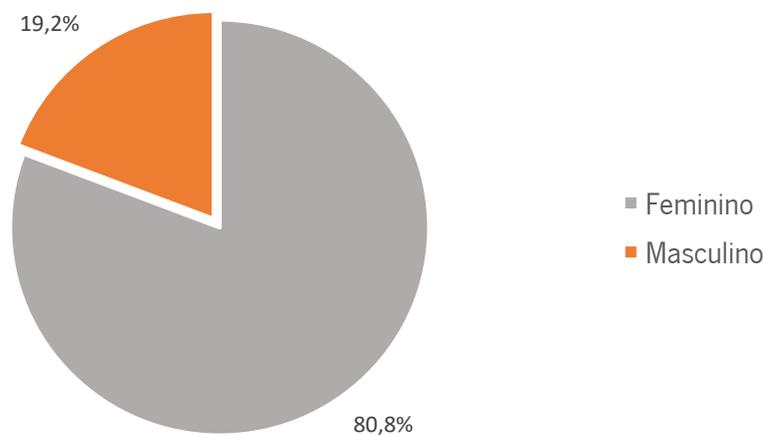


Figura 33. Caracterização geral da amostra por género (n=26). Percentagem do género feminino (cinza escuro) e masculino (laranja).

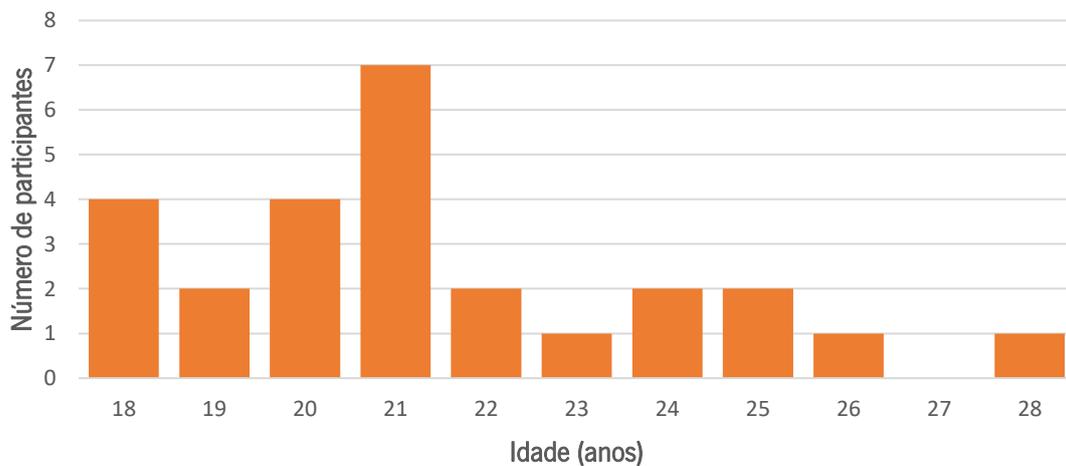


Figura 34. Caracterização da amostra por idade (n=26).

Relativamente às ametropias, os valores de esfera, cilindro e eixo do cilindro obtidos no exame subjetivo foram todos transformados em EE.<sup>87</sup>

$$EE = Esfera + \frac{Cilindro}{2}$$

De acordo com os critérios de diagnóstico anteriormente estabelecidos no capítulo 3.2, a amostra apresentava 81% emetropes e 19% hipermetropes. A amostra não possuía nenhum míope como representado na Figura 35.

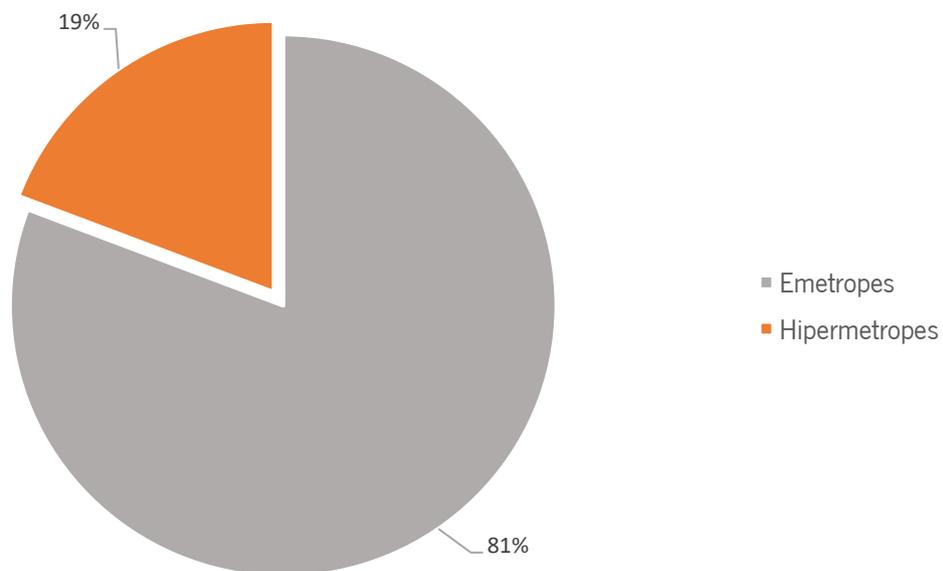


Figura 35. Caracterização geral da amostra por ametropia (n=26). Percentagem de emetropes (n=21) a cinza e hipermetropes (n=5) a laranja.

A amostra apresentou um valor de EE de  $+0,27D \pm 0,35D$ . Os emetropes apresentaram um valor médio de EE de  $+0,15D \pm 0,28D$ , a variar entre  $-0,50D$  e  $+0,50D$ . No caso dos hipermetropes, o valor médio de EE foi de  $+0,75D \pm 0,08D$ , e oscilava entre  $+0,63D$  e  $+0,88D$ . Na amostra, não existiam indivíduos míopes. Todos os valores correspondentes às ametropias verificadas na amostra estão representados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores médios e desvio padrão (DP) de M de cada ametropia encontrada na amostra, e respectivos valores mínimo e máximo obtidos

	Intervalo (D)	Média (D) ± DP
Emetropes (n=21)	[-0,50; +0,50]	+0,15 ± 0,28
Hipermetropes (n=5)	[+0,63; +0,88]	+0,75 ± 0,08
Total (n=26)	[-0,50; +0,88]	+0,27 ± 0,35

No que concerne aos valores dos parâmetros acomodativos obtidos na primeira consulta, a amplitude de acomodação apresentou valores entre 7,50D e 14,50D, e em que o valor médio foi 10,33D ± 1,83D. Os valores obtidos para a amplitude de acomodação e respectiva distribuição da amostra encontram-se representados na Figura 36.

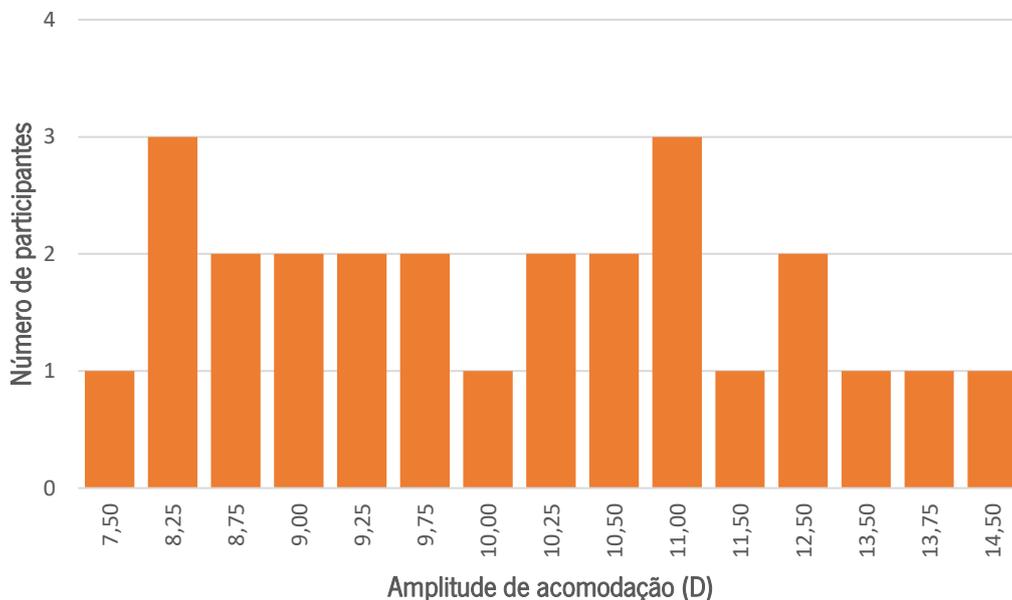


Figura 36. Distribuição da amostra por valor da amplitude de acomodação monocular medida na primeira consulta.

Em termos de flexibilidade acomodativa, esta apresentou valores entre 10cpm e 19cpm e o valor médio foi 14,12cpm ± 2,16cpm. Os valores obtidos para a flexibilidade acomodativa e respectiva distribuição da amostra encontram-se representados na Figura 37.

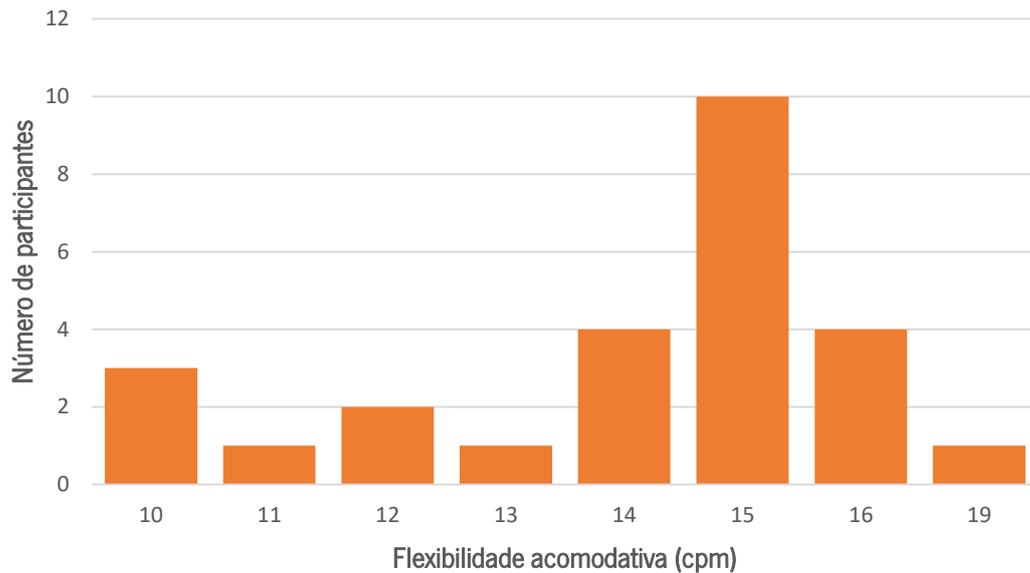


Figura 37. Distribuição da amostra por valor de flexibilidade acomodativa monocular medida na primeira consulta.

Os valores de amplitude de acomodação e flexibilidade acomodativa obtidos na primeira consulta, foram obtidos no decorrer de uma avaliação optométrica completa e realizada nas condições habituais de uma consulta de optometria. Todos estes valores foram obtidos apenas com o objetivo de validar os indivíduos com os critérios de inclusão necessários. Todos estes valores foram apenas utilizados como seleção da amostra, podendo diferir dos encontrados nas seguintes condições de iluminação.

#### 4.2. Análise dos parâmetros acomodativos em diferentes iluminâncias

Os valores de amplitude de acomodação obtidos com a iluminância de 30lx apresentaram um valor médio de  $8,27D \pm 1,49D$ . Relativamente à iluminância de 150lx um valor médio de  $9,29D \pm 1,78D$  e a iluminância de 400lx o valor médio de  $9,46D \pm 1,61D$ . Os valores de flexibilidade acomodativa obtidos com a iluminância de 30lx apresentaram o valor médio de  $13,12cpm \pm 2,55cpm$  e com a iluminância de 400lx o valor médio foi de  $15,58cpm \pm 4,15cpm$ .

Todos os valores se encontram representados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores médios, desvio-padrão (DP) e intervalo dos parâmetros acomodativos nos diferentes níveis de iluminância

	Amplitude de acomodação		Flexibilidade acomodativa	
	Intervalo (D)	Média (D) $\pm$ DP	Intervalo (cpm)	Média (cpm) $\pm$ DP
30lx	[6,00; 11,50]	8,27 $\pm$ 1,49	[8; 18]	13,12 $\pm$ 2,55
150lx	[6,50; 13,00]	9,29 $\pm$ 1,78	—	—
400lx	[7,00;12,50]	9,46 $\pm$ 1,61	[6;28]	15,58 $\pm$ 4,15

Na Tabela 6, é apresentada a análise estatística entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos nas diferentes condições de iluminância.

Tabela 6. Comparação entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes iluminâncias e a respetiva significância estatística (*p-value*)

	Amplitude de acomodação		Flexibilidade acomodativa	
	Média (D) $\pm$ DP	Significância	Intervalo (cpm)	Significância
30lx – 150lx	-1,02 $\pm$ 1,24	<b>&lt;0,001</b>	—	—
30lx – 400lx	-1,19 $\pm$ 1,45	<b>&lt;0,001</b>	-2,46 $\pm$ 3,08	<b>&lt;0,001</b>
150lx – 400lx	-0,17 $\pm$ 1,28	0,498	—	—

Resultados estatisticamente significativos apresentados a negrito  
Análise estatística realizada com o *paired t-student test*.

Ao comparar os valores de amplitude de acomodação obtidos nos diferentes níveis de iluminância, a amplitude de acomodação apresentou valores significativamente superiores com as iluminâncias de 150 e 400lx quando comparados com os obtidos com a iluminância de 30lx. Na Figura 38 encontram-se representados os valores alcançados com iluminância de 150lx, onde se percebe um aumento estatisticamente significativo, de cerca de 1,00D na amplitude de acomodação ( $p < 0,001$ ), quando comparados aos obtidos com a iluminância de 30lx. A amplitude de acomodação medida com a iluminância de 400lx também apresentou uma diferença estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ), quando comparada com a medida com a iluminância de 30lx. Contudo, a amplitude de acomodação medida com a iluminância de 150lx não apresentou diferenças estatisticamente significativas quando comparada com a obtida com a iluminância de 400lx ( $p > 0,05$ ).

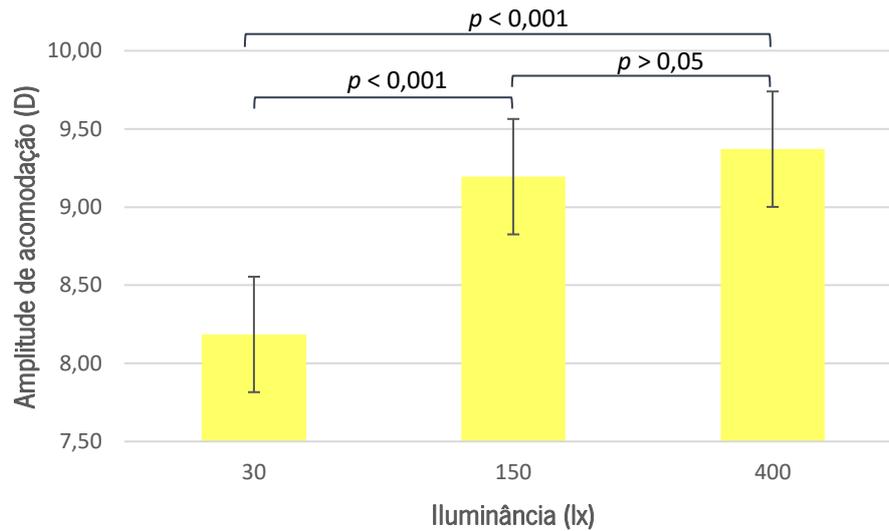


Figura 38. Comparação dos valores de amplitude de acomodação obtidos nos três níveis de iluminância (30lx, 150lx e 400lx).

Em termos de flexibilidade acomodativa medida com a iluminância de 30lx é possível observar um aumento médio, de cerca de 2,5cpm, quando comparada à medida com a iluminância de 400lx. Esta diferença é estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ). O aumento encontra-se representado na Figura 39.

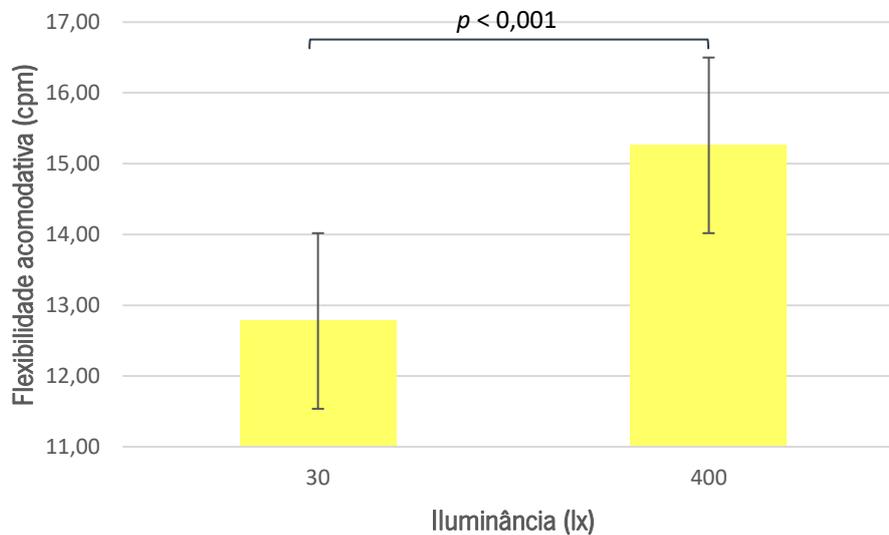


Figura 39. Comparação dos valores de flexibilidade acomodativa obtidos nos dois níveis de iluminância (30lx e 400lx).

### 4.3. Análise dos parâmetros acomodativos com diferentes cores de iluminação

Os valores de amplitude de acomodação obtidos com a iluminação de cor verde variaram entre 4,75D e 12,75D. O valor médio obtido foi  $9,08D \pm 1,93D$ . Relativamente à iluminação de cor vermelha, a amplitude de acomodação variou entre 5,00D e as 14,00D, com um valor médio de  $8,38D \pm 2,00D$ . Na análise estatística foi também considerada a iluminação de cor branca a 150lx (mesma iluminância da iluminação de cor verde e vermelha) obtida na segunda consulta.

Os valores de flexibilidade acomodativa obtidos com a iluminação de cor verde variaram entre 6cpm e 20cpm, e o valor médio obtido foi  $13,00cpm \pm 3,92cpm$ . No que diz respeito à iluminação de cor vermelha, a flexibilidade acomodativa variou entre 6cpm e 21cpm e o valor médio foi de  $13,04cpm \pm 3,62cpm$ .

Todos os valores se encontram descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Valores médios, desvio-padrão (DP) e intervalo dos parâmetros acomodativos nas diferentes cores de iluminação

	Amplitude de acomodação		Flexibilidade acomodativa	
	Intervalo (D)	Média (D) $\pm$ DP	Intervalo (cpm)	Média (cpm) $\pm$ DP
Verde	[4,75; 12,75]	9,08 $\pm$ 1,93	[6; 20]	13,00 $\pm$ 3,92
Vermelho	[5,00; 14,00]	8,38 $\pm$ 2,00	[6; 21]	13,04 $\pm$ 3,62

A análise estatística entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes cores de iluminação encontram-se descritos na Tabela 8.

Tabela 8. Comparação entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes cores de iluminação e a respetiva significância estatística (p-value)

	Amplitude de acomodação		Flexibilidade acomodativa	
	Média (D) $\pm$ DP	Significância	Intervalo (cpm)	Significância
Branca - Verde	0,22 $\pm$ 1,57	>0,05	—	—
Branca - Vermelha	0,90 $\pm$ 1,78	<b>0,016</b>	—	—
Verde - Vermelho	0,69 $\pm$ 0,90	<b>&lt;0,001</b>	-0,038 $\pm$ 2,46	>0,05

Resultados estatisticamente significativos apresentados a negrito  
Análise estatística realizada com o *paired t-student test*.

A amplitude de acomodação apresentou valores significativamente inferiores com a iluminação de cor verde e vermelha, quando comparados com os obtidos com a luz branca como se pode observar na Figura 40. Esta diminuição foi mais relevante para a iluminação de cor vermelha, em que os pacientes apresentaram uma redução de cerca de 2,00D na amplitude de acomodação ( $p = 0,016$ ). A amplitude de acomodação medida com luz de cor vermelha apresentou uma diferença média, para a medida com luz verde, de cerca de 0,70D, pelo que esta diferença é estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ). Ainda assim, a amplitude de acomodação medida com a luz de cor verde não apresentou diferenças estatisticamente significativas quando comparada à obtida com a luz branca ( $p > 0,05$ ).

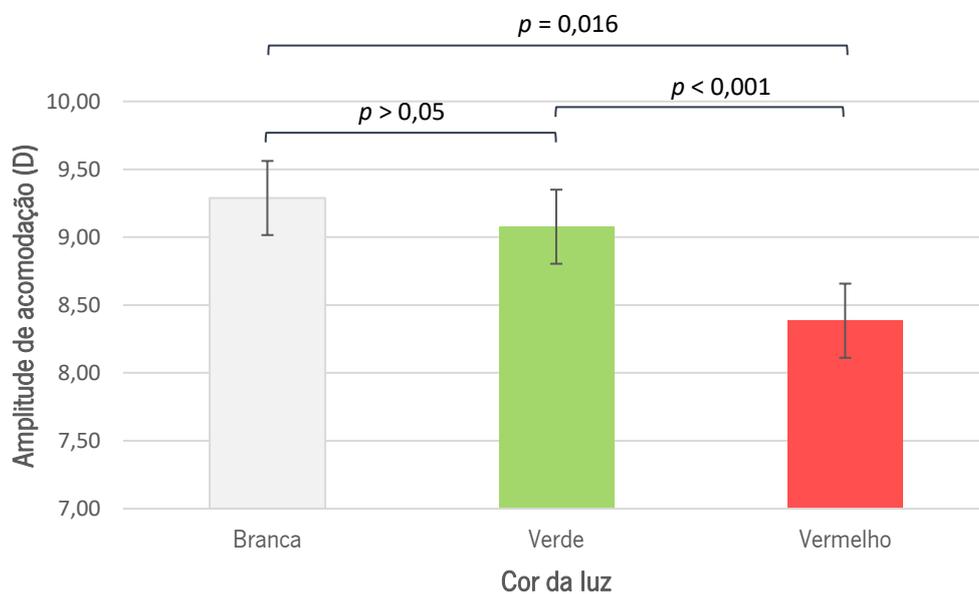


Figura 40. Comparação dos valores de amplitude de acomodação obtidos nas três diferentes cores de iluminação (branca, verde e vermelho).

Em relação à flexibilidade acomodativa esta não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os valores obtidos com a iluminação de cor verde e os obtidos com iluminação de cor vermelha ( $p > 0,05$ ). Valores representados na Figura 41.

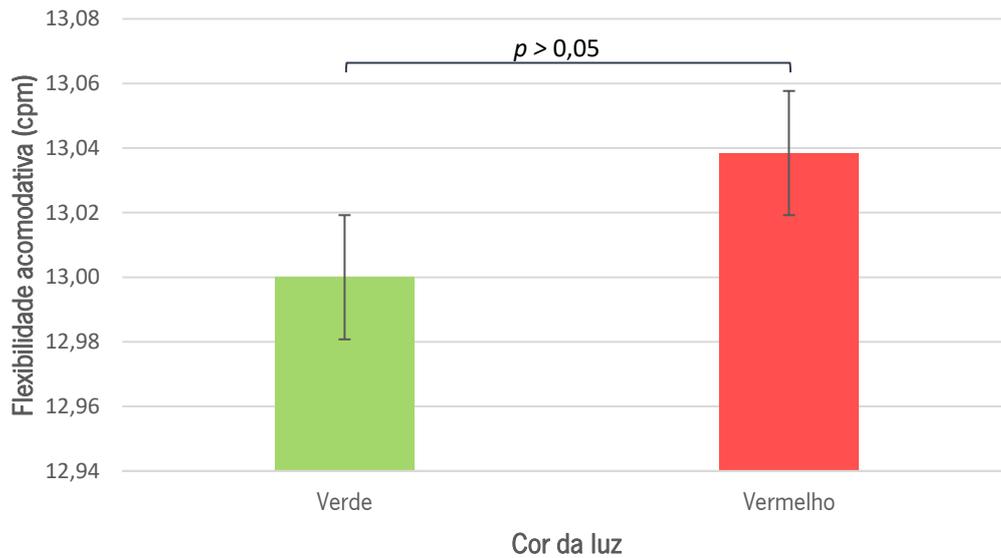


Figura 41. Comparação dos valores de flexibilidade acomodativa obtidos nas duas diferentes cores de iluminação (verde e vermelho).

#### 4.4. Análise dos parâmetros acomodativos em diferentes temperaturas de cor

Os valores de amplitude de acomodação obtidos com a iluminação com temperatura de cor correlacionada de 2500 K variaram entre 6,75D e 14,25D, e o seu valor médio obtido foi  $9,49D \pm 1,80D$ . Relativamente à temperatura de cor correlacionada de 4500 K, a amplitude de acomodação variou entre 6,50D e as 13,00D, apresentando um valor médio de  $9,34D \pm 1,74D$ . (Tabela 9).

Tabela 9. Valores médios, desvio-padrão (DP) e intervalo da amplitude de acomodação em iluminações com diferentes temperaturas de cor correlacionada

Amplitude de acomodação		
	Intervalo (D)	Média (D) $\pm$ DP
2500K	[6,75; 14,25]	$9,49 \pm 1,80$
4500K	[6,50; 13,00]	$9,34 \pm 1,74$

A análise estatística entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as iluminações de diferentes temperaturas de cor correlacionada encontram-se descritos na Tabela 10.

Tabela 10. Comparação entre os valores dos parâmetros acomodativos obtidos com as diferentes temperaturas de cor correlacionada da iluminação e a respectiva significância estatística (p-value)

Amplitude de acomodação		
	Média (D) ± DP	Significância
2500K – 4500K	0,15 ± 1,68	0,644

Resultados estatisticamente significativos apresentados a negrito  
 Análise estatística realizada com o *paired t-student test*.

A amplitude de acomodação, medida com a iluminação com 2500 K de temperatura de cor correlacionada, não apresentou diferenças estatisticamente significativas, quando compara à obtida com a iluminação de temperatura de cor correlacionada de 4500 K ( $p > 0,05$ ) como é possível observar na Figura 42.

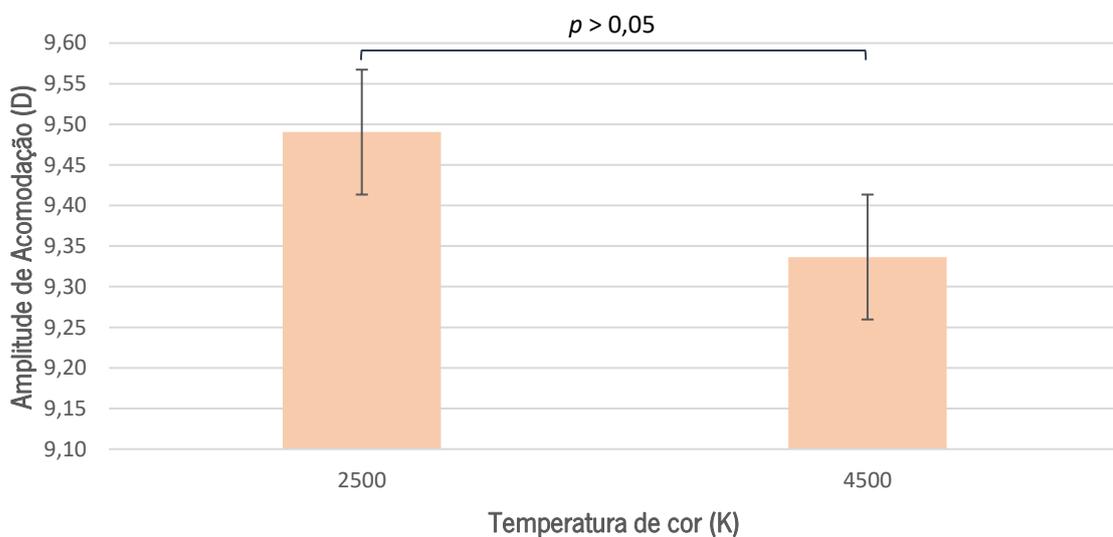


Figura 42. Comparação dos valores de amplitude de acomodação obtidos nas duas diferentes temperaturas de cor correlacionada (2500K e 4500K).

# Capítulo 5

---

Discussão de resultados

## Capítulo 5 – Discussão de resultados

---

Neste capítulo, é realizada a análise de variações nos valores dos parâmetros acomodativos ocorridas em diferentes condições de iluminação e a análise das correlações significativas encontradas entre elas e os restantes parâmetros. Sempre que possível, os resultados são confrontados com os publicados noutros estudos.

O trabalho teve como objetivo testar a influência da iluminação nos parâmetros acomodativos. Para tal, realizaram-se medidas de amplitude de acomodação e flexibilidade acomodativa em diferentes condições de iluminação. Assim, numa primeira fase, foram executadas medidas em condições normais de consultório. Numa fase posterior, verificou-se a influência de diferentes níveis de iluminância, cor da iluminação e, por fim, temperatura de cor correlacionada. Foram efetuados cálculos teóricos para a aberração cromática longitudinal nas diferentes cores de iluminação utilizadas, assim como a variação do diâmetro pupilar nas diferentes iluminâncias.

### 5.1. Iluminância

A primeira hipótese testada consistiu na influência da iluminância nos valores de amplitude de acomodação e de flexibilidade acomodativa. Estes parâmetros foram medidos sob a iluminância de 30lx, 150lx e 400lx.

Segundo os resultados obtidos, a amplitude de acomodação apresentou valores menores sob a iluminância de 30lx, quando comparados aos obtidos sob a iluminância de 150lx e 400lx. O maior valor de amplitude de acomodação foi obtido para a iluminância de 400lx ( $9,46D \pm 1,61D$ ), a que se seguiu o medido sob a iluminância de 150lx ( $9,29D \pm 1,78D$ ). No entanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa; o que indica que a amplitude de acomodação foi a mesma, quando medida sob a iluminância de 150lx ou 400lx. A menor amplitude de acomodação foi obtida sob a iluminância de 30lx ( $8,27D \pm 1,49D$ ) e a diferença foi estatisticamente significativa, quando comparada às iluminâncias de 150lx e 400lx.

Os resultados obtidos foram ao encontro dos de Lara *et al.*<sup>88</sup>, que reportavam valores de amplitude de acomodação superiores em condições de alta iluminação, quando comparados aos obtidos com baixa iluminação.

Reeves<sup>89</sup> constatou alterações no diâmetro pupilar com diferentes condições de iluminação, ou se a distância entre o olho e o estímulo fosse alterada (acomodação), de modo a manter constante a iluminação retiniana. Num estudo de Groot & Gebhard<sup>90</sup> sobre o efeito da luz no diâmetro pupilar, verificou-se que a iluminação da imagem na retina depende da luminância da fonte de luz, e o tamanho da pupila da densidade do fluxo luminoso que chega ao olho.

Apesar do diâmetro pupilar não ter sido medido durante a experiência, calculou-se de forma teórica a alteração nas várias condições de iluminação, através da fórmula previamente descrita no capítulo 2.3, desenvolvida por Watson & Yellott<sup>72</sup>, originando o gráfico representado na Figura 24. Através do gráfico foi possível obter os valores de diâmetro pupilar em cada condição de iluminância. Recorrendo aos valores de diâmetro pupilar obtidos no gráfico, foi calculada a variação de diâmetro pupilar entre as iluminâncias de 30lx e os 150lx, 30lx e 400lx e 150lx e 400lx. De seguida, foi calculada a variação de profundidade de foco. De acordo com Ogle *et al.*<sup>91</sup> a profundidade de foco diminui cerca de 0,12D por cada milímetro de aumento do diâmetro pupilar. Dividindo os valores de variação de profundidade de foco pela variação de amplitude de acomodação obtida nas iluminâncias utilizadas no estudo, obteve-se a percentagem correspondente à influência do diâmetro pupilar.

Cerca de 12% da variação na amplitude de acomodação obtida entre as iluminâncias de 30lx e 150lx é justificada pela diferença do diâmetro pupilar, seguida de 16% entre a iluminância de 30lx e os 400lx. A maior influência do diâmetro pupilar é obtida entre a iluminância de 150lx e 400lx, sendo cerca de 38,5%. Estes valores estão de acordo com os obtidos no estudo de Lara *et al.*<sup>88</sup> que reportaram não existir influência significativa do diâmetro pupilar nas variações de amplitude de acomodação entre alta e baixa iluminação.

## 5.2. Cor

Foi testada a hipótese de que a cor da iluminação influencia os valores de amplitude de acomodação e de flexibilidade acomodativa. Estes parâmetros foram medidos sob iluminação branca, vermelha e verde.

De acordo com os resultados, sob luz vermelha (intensidade com pico a 635nm), a amplitude de acomodação apresentou valores menores, quando comparados à iluminação branca e verde (intensidade com pico a 515nm). O maior valor de amplitude de acomodação foi obtido

para a iluminação branca ( $9,29D \pm 1,78D$ ), seguido do medido com iluminação de cor verde ( $9,08D \pm 1,93D$ ). No entanto, essa diferença não foi estatisticamente significativa, o que indica que a amplitude de acomodação foi a mesma, quando medida sob iluminação branca ou sob luz verde. A menor amplitude de acomodação foi obtida sob iluminação vermelha ( $8,38D \pm 2,00D$ ) e a diferença foi estatisticamente significativa ao ser confrontada com as cores branca e verde.

Fincham<sup>92</sup> foi o primeiro a sugerir, com base em evidências, que a aberração cromática longitudinal (LCA) atuava como um estímulo à acomodação. O autor afirmou que, como resultado da LCA ocular, a imagem de um ponto luminoso num olho não acomodado será rodeada por uma franja azulada. Num olho acomodado, uma franja avermelhada estará presente. Fincham<sup>92</sup> referiu que o cérebro pode ser capaz de usar tais indicações cromáticas, para determinar a existência e o tipo de qualquer erro refrativo ocular e, assim, levar a uma resposta de acomodação apropriada. Depois dele, vários autores<sup>49,93,94</sup> sugeriram que a LCA do olho fornece um importante estímulo dióptrico para o controle da acomodação ocular.

Através da equação mencionada em 2.1.4 obtiveram-se os valores de aberração cromática longitudinal referentes aos comprimentos de onda dos LEDs verde e vermelho utilizados na experiência. Sob iluminação verde (515nm) o ponto focal estará 0,40D à frente da retina. Na iluminação vermelha (635nm), 0,25D atrás da retina.

Quando colocada uma lente negativa, para a medição da amplitude de acomodação, no caso da iluminação vermelha, o ponto focal para o comprimento de onda de 635nm ficará atrás da retina, à distância provocada pela lente negativa, mais a distância causada pela LCA. Por exemplo, quando colocada uma lente de -7D em frente a um olho não acomodado, sob iluminação vermelha, o ponto focal vai estar a 7,25D (7D da lente negativa mais 0,25D provocadas pela LCA) da retina, como ilustrado na Figura 43a. Desta forma, sob iluminação vermelha, como ilustrado na Figura 43b, acomoda 7D (ponto focal na retina), quando colocada uma lente de -6,75D.

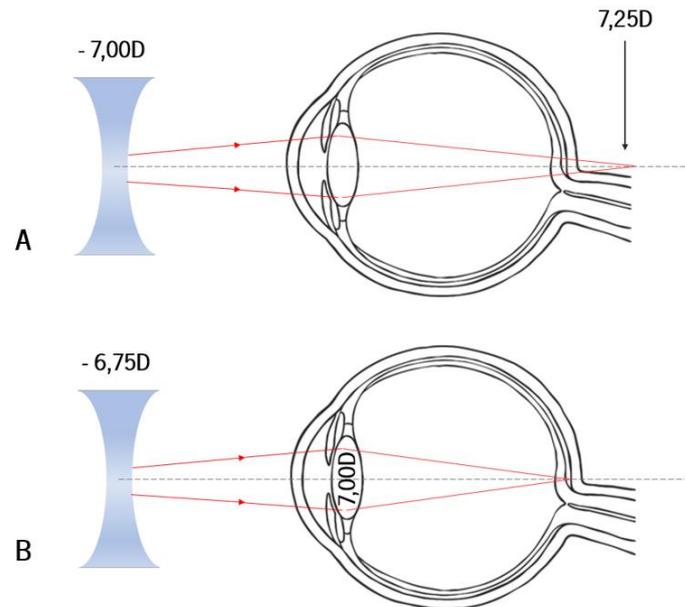


Figura 43. Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação vermelha na medição da amplitude de acomodação. A – Olho não acomodado, ponto focal atrás da retina, quando colocada uma lente negativa de 7D. B – Ponto focal na retina, quando o olho acomoda 7D, na presença de uma lente de -6,75D.

No caso da iluminação verde, como o ponto focal para o comprimento de onda de 535nm se encontra a 0,40D da retina, ao ser colocada uma lente de -7D, o ponto focal estará a 6,60D (7D da lente menos 0,40D provocadas pela LCA) atrás da retina. Este fenómeno está representado na Figura 44a. Assim, o olho acomoda 7D (ponto focal na retina) na presença de uma lente de 7,40D, como ilustrado na Figura 44b. Então, sob iluminação vermelha, o olho necessita de acomodar mais 0,25D do que o valor da lente colocada na medição da amplitude de acomodação. Sob iluminação verde menos 0,40D do que o valor da lente colocada na medição. Deste modo, os valores de amplitude de acomodação vão apresentar valores inferiores na iluminação de cor vermelha, em comparação com os obtidos sob iluminação verde. Este estudo permitiu observar, através dos resultados obtidos, esta situação.

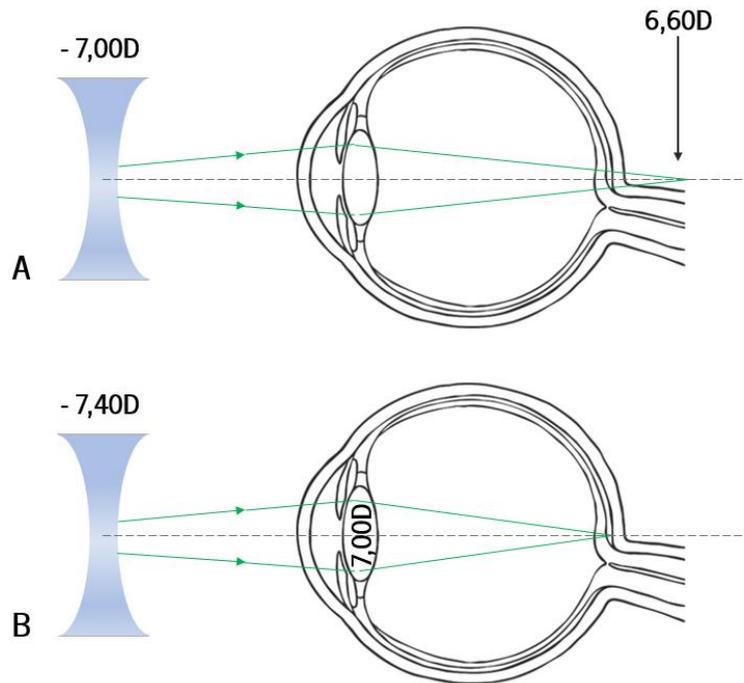


Figura 44. Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação verde na medição da amplitude de acomodação. A – Olho não acomodado, ponto focal atrás da retina quando colocada uma lente negativa de 7D. B – Ponto focal na retina quando o olho acomoda 7D, na presença de uma lente de  $-7,40D$ .

Através destes valores esperava-se que, sob iluminação vermelha, a amplitude de acomodação mostrasse uma redução de cerca de  $0,65D$ , quando comparada com a obtida sob iluminação verde. Esta situação está totalmente de acordo com os resultados obtidos neste estudo, onde o valor foi de  $0,70D$ . A comparação entre os valores obtidos no estudo e os valores teóricos encontra-se representada na Figura 45.

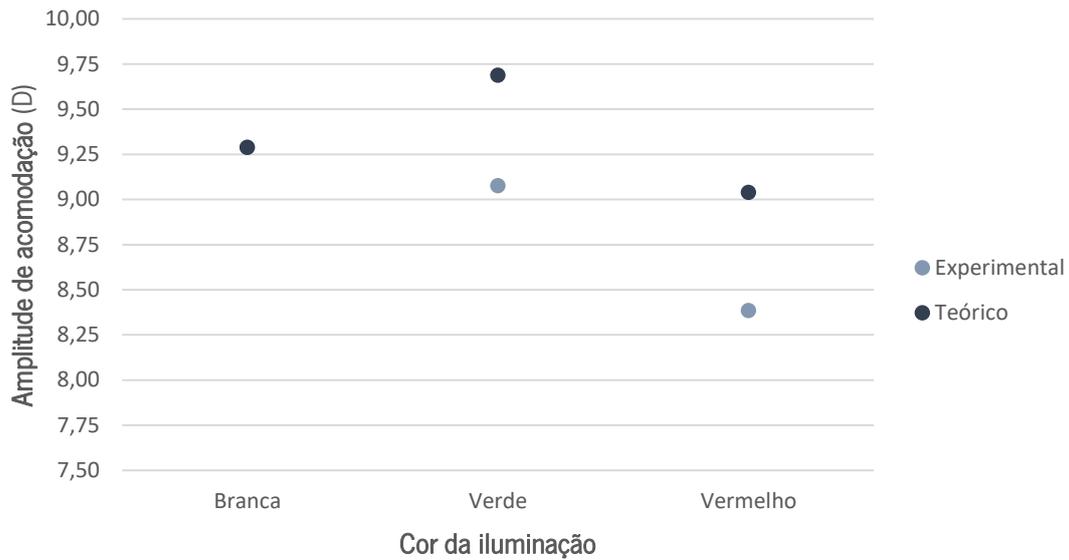


Figura 45. Variação da amplitude de acomodação teórica e experimental para a iluminação branca, verde e vermelha.

Em termos de flexibilidade acomodativa, o olho, na medição da flexibilidade acomodativa, está a acomodar 2,50D correspondentes à distância de trabalho de 40cm utilizada neste tipo de exame acomodativo. Ao considerarmos um paciente sem problemas acomodativos, quando colocada a lente de +2,00D o olho relaxa 2,00D da distância de trabalho, ficando a acomodar apenas as 0,50D restantes. Com iluminação vermelha o olho vai relaxar menos 0,25D do que com a luz branca. Portanto, com iluminação vermelha, o olho necessita acomodar as 0,50D restantes da distância de trabalho, mais as 0,25D originadas pelas LCA. Fenómeno descrito na Figura 46a. Com a lente de -2,00D o olho terá de acomodar as 2,50D correspondentes à distância de trabalho, assim como as 2,00D da lente colocada e as 0,25D da LCA que se encontra representado na Figura 46b.

Na Figura 47a está representado o que acontece com iluminação verde onde o olho vai relaxar mais 0,40D do que com a luz branca. Então, sob iluminação verde e com a lente de +2,00D, o olho acomoda somente 0,10D. E na Figura 47b com a lente de -2,00D o olho acomoda apenas 4,10D.

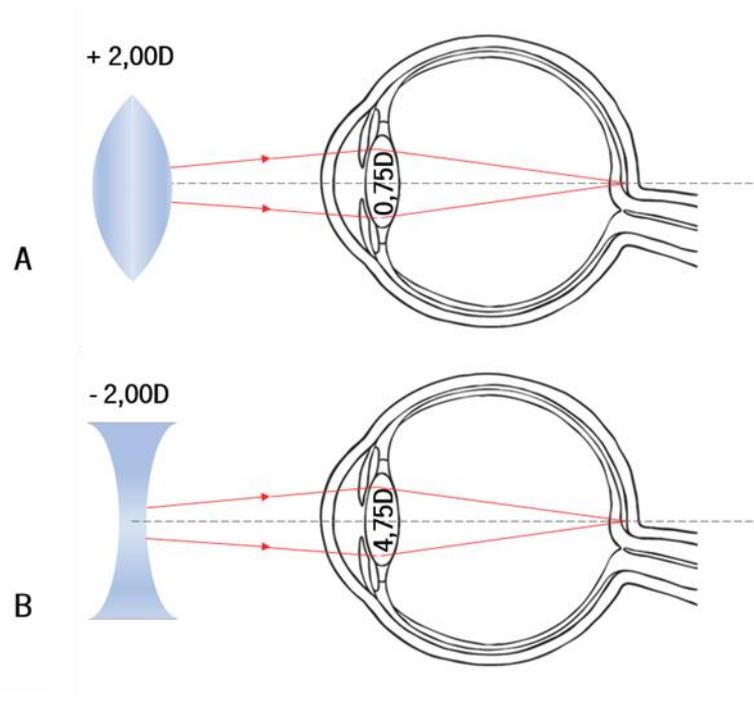


Figura 46. Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação vermelha na medição da flexibilidade acomodativa. A – Olho acomoda 0,75D na presença de uma lente de +2,00. B – Olho acomoda 4,75D correspondentes à distância de trabalho e LCA, quando colocada uma lente de -2,00D.

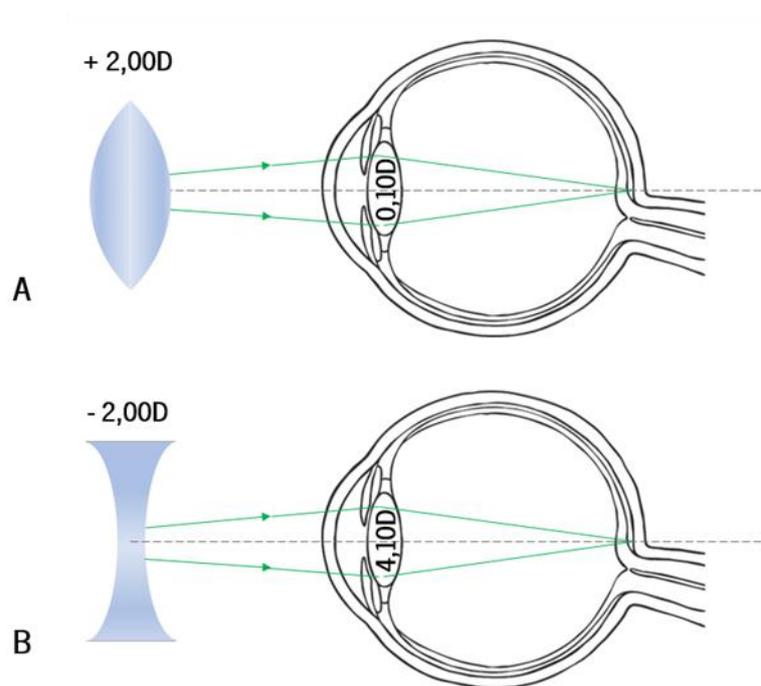


Figura 47. Representação do efeito da aberração cromática originada pela iluminação verde na medição da flexibilidade acomodativa. A – Olho acomoda apenas 0,10D na presença de uma lente de +2,00D. B – Olho acomoda 4,10D correspondentes à distância de trabalho menos a LCA, quando colocada a lente de -2,00D.

De acordo com os trabalhos acima mencionados<sup>49,92-94</sup>, alvos monocromáticos não estimulam o olho para acomodar com a mesma precisão que os alvos normais de luz branca. De acordo com isso, esperava-se encontrar valores menores de amplitude de acomodação obtida sob iluminação verde do que os obtidos para a iluminação branca. Esta situação não ocorreu no presente estudo. No entanto, em nenhum dos estudos referidos a amplitude de acomodação foi medida, mas apenas o atraso e o tempo de resposta da acomodação. Talvez o efeito não seja exatamente o mesmo, já que as medidas não são equivalentes. No presente estudo, a acomodação foi testada de modo a obter a potência máxima da lente a ser estimulada. Nos estudos anteriores, foram testadas as diferenças entre o estímulo e a resposta da acomodação (atraso acomodativo) e o tempo de atraso (tempo que o processo leva para ser concluído).

### 5.3. Temperatura de cor

A última hipótese testada foi a influência da temperatura de cor correlacionada nos valores de amplitude de acomodação. As medidas foram realizadas sob iluminação de 2500 K e 4500 K.

Conforme os resultados obtidos, a variação de temperatura de cor correlacionada dos 2500 K para os 4500 K não apresentou valores estatisticamente significativos, indicando que a amplitude de acomodação foi a mesma quando medida com a iluminação de 2500 K e 4500 K.

Estudos anteriormente realizados<sup>66,73,75,76,95</sup> aludem à influência da temperatura de cor correlacionada da iluminação em diversos parâmetros oculares. Esta situação não se verificou neste estudo, em que não foram encontradas variações estatisticamente significativas nos valores de amplitude de acomodação na variação da temperatura de cor correlacionada. Ainda assim, em nenhum dos estudos referidos foi avaliada a acomodação ocular, apenas parâmetros como acuidade visual, desconforto ocular e performance visual.

# Capítulo 6

---

Conclusões e trabalho futuro

## Capítulo 6 – Conclusões e trabalho futuro

---

Neste estudo foi analisada a influência da iluminância, cor e temperatura de cor da iluminação na capacidade acomodativa do olho. As medidas foram realizadas para três iluminâncias, dois comprimentos de onda e duas temperaturas de cor.

Os níveis de iluminância parecem ter uma relação com os parâmetros acomodativos oculares, mostrando um aumento dos valores de acomodação à medida que a iluminância aumenta, acabando por estabilizar num determinado valor de iluminância.

Em termos de comprimento de onda, foi possível concluir que, para a iluminação vermelha, o olho não é capaz de acomodar tanto quanto na iluminação verde e branca. Estes resultados poderão ser importantes para a compreensão do processo de acomodação.

Outro objetivo deste estudo era determinar a influência da temperatura de cor da iluminação utilizada na medição da amplitude de acomodação. Não se verificaram alterações na amplitude de acomodação com as diferentes temperaturas de cor. Pelo que se pode concluir que a medição da amplitude de acomodação se poderá realizar tanto em 2500 K como em 4500 K.

Iluminação imprópria ou com parâmetros desajustados podem causar uma variação nos parâmetros acomodativos e gerar sintomatologia. Em termos clínicos, seria importante saber as condições de iluminação utilizadas pelos pacientes com sintomatologia associada a problemas acomodativos, mas com valores normais em clínica. Desta forma, os protocolos clínicos, relacionados com a acomodação, podem ser largamente beneficiados, se ajustados aos valores de iluminação.

Numa tentativa de compreender se o objetivo fundamental deste estudo se mantém noutras condições experimentais, deverão ser realizados mais estudos. Para tal, dever-se-á aumentar a amostra e testar os parâmetros clínicos de acomodação para outros valores, nos parâmetros de iluminação, em indivíduos com diferentes erros refrativos e em outras condições oculares.

# **Bibliografia**

---

## Bibliografia

---

1. Cai, J. *et al.* The effect of light distribution of LED luminaire on human ocular physiological characteristics. *IEEE Access* **20**, 2169–3536 (2017).
2. Park, Y. Color temperature's impact on task performance and brainwaves of school-age children. *J. Phys. Ther. Sci.* **27**, 3147–3149 (2015).
3. Rabbetts, R. B. *Clinical Visual Optics. Clinical Visual Optics* (2007).
4. Benjamin, W. J. *Borish's Clinical Refraction. Borish's Clinical Refraction* (2006).
5. Goss, D. & West, R. *Introduction to the Optics of the Eye.* (2002).
6. Atchison, D. A. & Smith, G. *Optics of the Human Eye.* (2000).
7. Marieb, E. & Hoehn, K. *Human Anatomy & Physiology. Principles of neural science* (2014). doi:10.1007/BF00845519
8. Goldstein, E. B. *Sensation and Perception.* (2010).
9. Snell, R. S. & Lemp, M. A. *Clinical Anatomy of the Eye.* (Blackwell Science, 1998). doi:10.1002/9781118690987
10. Malhotra, A., Minja, F. J., Crum, A. & Burrowes, D. Ocular Anatomy and Cross-Sectional Imaging of the Eye. *Semin. Ultrasound, CT MRI* (2011). doi:10.1053/j.sult.2010.10.009
11. Willoughby, C. E. *et al.* Anatomy and physiology of the human eye: Effects of mucopolysaccharidoses disease on structure and function - a review. *Clin. Exp. Ophthalmol.* **38**, 2–11 (2010).
12. Shiland, B. J. *Medical Terminology & Anatomy for ICD-10 Coding.* (2015).
13. VanPutte, C. *et al.* *Seeley's anatomy and physiology. Professional Educator* (McGraw Hill Higher Education, 2013). doi:10.1080/23298758.1993.10685513
14. Lee, E. C., Lee, J. W. & Park, K. R. Experimental Investigations of Pupil Accommodation Factors. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* **52**, 6478–6485 (2011).
15. Winn, B., Whitaker, D., Elliott, D. B. & Phillips, N. J. Factors Affecting Light-Adapted Pupil Size in Normal Human Subjects. *Invest Ophthalmic Vis Sci* **35**, 1132–1137 (1994).

16. Artal, P. Optics of the eye and its impact in vision: a tutorial. *Adv. Opt. Photonics* (2014). doi:10.1364/AOP.6.000340
17. Koch, D. D., Samuelson, S. W., Haft, E. A. & Merin, L. A. W. M. Pupillary Size and Responsiveness Implications for Selection of a Bifocal Intraocular Lens. *Ophthalmology* **98**, 1030–1035 (1991).
18. Lehmann, G. L., Benedicto, I., Philp, N. J. & Rodriguez-Boulan, E. Plasma membrane protein polarity and trafficking in RPE cells: Past, present and future. *Exp. Eye Res.* **126**, 5–15 (2014).
19. Sung, C. H. & Chuang, J. Z. The cell biology of vision. *J. Cell Biol.* **190**, 953–963 (2010).
20. Kennedy, B. & Malicki, J. What drives cell morphogenesis: A look inside the vertebrate photoreceptor. *Dev. Dyn.* **238**, 2115–2138 (2009).
21. Schwartz, S. H. *Visual Perception A Clinical Orientation. Journal of Chemical Information and Modeling* (2010). doi:10.1017/CB09781107415324.004
22. Goldberg, D. B. Computer-animated model of accommodation and theory of reciprocal zonular action. *Clin. Ophthalmol.* **5**, 1559–1566 (2011).
23. Adler-Grinberg, D. Questioning our classical understanding of accommodation and presbyopia. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* **63**, 571–580 (1986).
24. Wick, B. & Hall, P. Relation among Accommodative Facility, Lag, and Amplitude in Elementary School Children. *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* **64**, 593–598 (1987).
25. Scheiman, M. & Wick, B. *Clinical Management of Binocular Vision Heterophoric, Accommodative, and Eye Movement Disorders (4rd ed.)*. (2014).
26. Koomson, N. Y. *et al.* Relationship between Reduced Accommodative Lag and Myopia Progression. *Optom. Vis. Sci.* **93**, (2016).
27. Allen, P. M., Charman, W. N. & Radhakrishnan, H. Changes in dynamics of accommodation after accommodative facility training in myopes and emmetropes. *Vision Res.* **50**, 947–955 (2010).
28. Mcalinden, C., McCartney, M. & Moore, J. Mathematics of Zernike polynomials: A review. *Clin. Exp. Ophthalmol.* **39**, 820–827 (2011).

29. Schwiegerling, J. Theoretical Limits to Visual Performance. *Surv. Ophthalmol.* **45**, 139–146 (2000).
30. Marcos, S. Aberrometry: basic science and clinical applications. *Bull. la Soc. Belge d'Ophthalmologie* **302**, 197–213 (2006).
31. Geary, J. M. *Introduction to Wavefront Sensors. Introduction to Wavefront Sensors* (2010). doi:10.1117/3.179559
32. He, J. C., Burns, S. A. & Marcos, S. Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res.* **40**, 41–8 (2000).
33. Lombardo, M. & Lombardo, G. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance. *J. Cataract Refract. Surg.* **36**, 313–331 (2010).
34. Artal, P. & Guirao, A. Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye. *Opt. Lett.* **23**, 1713 (1998).
35. Albarrán, C., Pons, A. M., Lorente, A., Montés, R. & Artigas, J. M. Influence of the tear film on optical quality of the eye. *Contact Lens Anterior Eye* **20**, 129–135 (1997).
36. Montés-Micó, R. Role of the tear film in the optical quality of the human eye. *J. Cataract Refract. Surg.* **33**, 1631–1635 (2007).
37. Collins, M. J., Buehren, T., Bece, A. & Voetz, S. C. Corneal optics after reading, microscopy and computer work. *Acta Ophthalmol. Scand.* **84**, 216–224 (2006).
38. Oshika, T., Klyce, S. D., Applegate, R. A. & Howland, H. C. Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* **40**, 1351–1355 (1999).
39. Arines, J., Pailos, E., Prado, P. & Bará, S. The contribution of the fixational eye movements to the variability of the measured ocular aberration. *Ophthalmic Physiol. Opt.* **29**, 281–287 (2009).
40. Resan, M., Vukosavljević, M. & Milivojević, M. Wavefront Aberrations. *Adv. Ophthalmol.* **13** (2012). doi:http://dx.doi.org/10.5772/57353
41. Unterhorst, H. A. & Rubin, A. Ocular aberrations and wavefront aberrometry: A review. *African Vis. Eye Heal.* **74**, 1–6 (2015).

42. Tuan, K.-M. A., Chernyak, D. & Feldman, S. T. Predicting Patients' Night Vision Complaints With Wavefront Technology. *Am. J. Ophthalmol.* **141**, (2006).
43. Wang, Y., Shao, Y. & Yuan, Y. Simultaneously measuring ocular aberration and anterior segment biometry during accommodation. *J. Innov. Opt. Health Sci.* **08**, 1550005 (2015).
44. Li, Y.-J., Choi, J. A., Kim, H. & Yu, S. Changes in ocular wavefront aberrations and retinal image quality with objective accommodation. *J. Cart. Refract. Surg.* **37**, 835–841 (2011).
45. Porter, J., Guirao, A., Cox, I. G. & Williams, D. R. Monochromatic aberrations of the human eye. *Opt. Soc. Am.* **18**, 1793–1803 (2001).
46. Castejón-Mochón, J. F., López-Gil, N., Benito, A. & Artal, P. Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population. *Vision Res.* **42**, 1611–1617 (2002).
47. Cholewiak, S. A., Love, G. D., Srinivasan, P. P., Ng, R. & Banks, M. S. Chromablur: Rendering Chromatic Eye Aberration Improves Accommodation and Realism. *ACM Trans. Graph.* **36**, 1–12 (2017).
48. Thibos, L. N., Bradley, A., Still, D. L., Zhang, X. & Howarth, P. A. Theory and Measurement of Ocular Chromatic Aberration. *Vision Res.* **30**, 33–49 (1990).
49. Flitcroft, D. I. A neural and computational model for the chromatic control of accommodation. *Vis. Neurosci.* **5**, 547–555 (1990).
50. Hunt, R. W. G. & Pointer, M. R. *Measuring Colour: Fourth Edition. Measuring Colour: Fourth Edition* (2011). doi:10.1002/9781119975595
51. Shevell, S. K. *The Science of Color.* (2003).
52. DeCusatis, C. *Handbook of Applied Photometry.* (1997).
53. Sangwine, S. J. & Horne, R. E. N. *The Colour Image Processing Handbook.* (1998). doi:10.1007/978-1-4615-5779-1
54. Wässle, H. Parallel processing in the mammalian retina. *Nat. Rev. Neurosci.* **5**, 747–757 (2004).
55. Barbur, J. L. & Stockman, A. Photopic, Mesopic and Scotopic Vision and Changes in Visual Performance. in *Encyclopedia of the Eye* (2010). doi:10.1016/b978-0-12-374203-

2.00233-5

56. Bass, M. *Handbook of Optics: Volume II - Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry, Third Edition. Book* (2010).
57. McCluney, W. R. *Introduction to Radiometry and Photometry.* (1994).
58. Kitsinelis, S. *Light Sources, Second Edition: Basics of Lighting Technologies and Applications.* (2015).
59. Hunt, R. W. G. *The Reproduction of Colour. The Reproduction of Colour* (2004). doi:10.1002/0470024275
60. Wyszecki, G. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. Wiley Series in Pure and Applied Optics* (1982). doi:10.1002/col.5080080421
61. Wunsch, A. Artificial lighting and health. *Prof. Light. Des.* 1–5 (2006).
62. Cho, Y. M. *et al.* Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiol. Int.* **32**, 1294–1310 (2015).
63. Narisada, K. & Schreuder, D. *Light Pollution Handbook. Astrophysics and Space Science Library* (2004). doi:10.1007/978-1-4020-2666-9
64. Schreuder, D. *Outdoor lighting: Physics, vision and perception. Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception* (2008). doi:10.1007/978-1-4020-8602-1
65. Cai, J. *et al.* Influence of LED Correlated Color Temperature on Ocular Physiological Function and Subjective Perception of Discomfort. *IEEE Access* **6**, 25209–25213 (2017).
66. Baron, R. A., Rea, M. S. & Daniels, S. G. Effects of Indoor Lighting (Illuminance and Spectral Distribution) on the Performance of Cognitive Tasks and Interpersonal Behaviors: The Potential Mediating Role of Positive Affect. *Motiv. Emot.* **16**, (1992).
67. Zellner, D. A. & Kautz, M. A. Color Affects Perceived Odor Intensity. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **16**, 391–397 (1990).
68. Boyce, P., Akashi, Y., Hunter, C. & Bullough, J. The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task. *Light. Res. Technol.* **35**, 141–161 (2003).

69. Majumder, C. & Zafirah Zaimi, N. Comparison of Amplitude of Accommodation in Different Room Illumination while Using VDU as a Target. *Int. J. Ophthalmic Res.* **3**, 243–248 (2017).
70. Winn, B., Whitaker, D., Elliott, D. B. & Phillips, N. J. Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* **35**, 1132–1137 (1994).
71. Ward, P. A. & Charman, W. N. Effect of pupil size on steady state accommodation. *Vision Res.* **25**, 1317–1326 (1985).
72. Watson, A. B. & Yellott, J. I. A unified formula for light-adapted pupil size. *J. Vis.* **12**, 12–12 (2012).
73. Yamagishi, M., Yamaba, K., Kubo, C., Nokura, K. & Nagata, M. Effects of LED lighting characteristics on visual performance of elderly people. *Gerontechnology* **7**, 5–8 (2009).
74. Nawab, M. Visual acuity depends on the color temperature of the surround lighting. *J. Illum. Eng. Soc.* **31**, 70–84 (2002).
75. Berman, S. M., Nawab, M., Martin, M., Sheedy, J. & Tithof, W. A Comparison of traditional and high colour temperature lighting on the near acuity of elementary school children. *Light. Res. Technol.* **38**, 49–50 (2006).
76. Lin, C.-C. & Huang, K.-C. Effects of lighting color, illumination intensity, and text color on visual performance. *Int. J. Appl. Sci. Eng.* **12**, 193–202 (2014).
77. Lin, C.-C. Effects of Illumination Conditions and Chromaticity Contrast on Reading Performance. **3**, 3–8 (2014).
78. Yang, S., Jang, M., Sheedy, J. & Seo, Y. Effects of Light Illumination on Ocular Responses and Visual Comfort Effects of Light Illumination on Ocular Responses and Visual Comfort. *Vis. Perform. Inst.* (2019).
79. Male, S. R., Bhardwaj, R. & Majumder, C. Influence of spectral distribution on accommodation - vergence and reading performance. *Ann. Eye Sci.* **2**, 29 (2017).
80. Ram, M. S. & Bhardwaj, R. Effect of Different Illumination Sources on Reading and Visual Performance. *J. Ophthalmic Vis. Res.* **13**, 44–49 (2018).
81. Ferrer-Blasco, T., González-Méijome, J. M. & Montés-Micó, R. Age-related changes in the human visual system and prevalence of refractive conditions in patients attending an eye

- clinic. *J. Cataract Refract. Surg.* **34**, 424–432 (2008).
82. Wong, T. *et al.* The prevalence and risk factors for refractive errors in an adult Chinese population in Singapore. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* **41**, 2486–2494 (2000).
83. Jobke, S., Kasten, E. & Vorwerk, C. The prevalence rates of refractive errors among children, adolescents, and adults in Germany. *Clin. Ophthalmol.* **2**, 601–607 (2008).
84. Figura 29. Available at: <https://sensing.konicaminolta.us/products/t-10a-t-10ma-illuminance-meters/>. (Accessed: 28th May 2019)
85. Hofstetter, H. W. A useful age-amplitude formula. *Optom. Vis. Sci.* (2006). doi:10.1097/00006324-194704000-00030
86. Sterner, B., Abrahamsson, M. & Sjostrom, A. Accomodative facility training with a long term follow up in a sample of school aged children showing accomodative dysfunction. *Doc. Ophthalmol.* **99**, 93–101 (1999).
87. Miller, J. M. Clinical Applications of Power Vectors. *Optom. Vis. Sci.* **86**, 599–602 (2009).
88. Lara, F., Bernal-Molina, P., Fernández-Sánchez, V. & López-Gil, N. Changes in the objective amplitude of accommodation with pupil size. *Optom. Vis. Sci.* **91**, 1215–1220 (2014).
89. Reeves, P. The Response of the Average Pupil to Various Intensities of Light. *J. Opt. Soc. Am.* **4**, 35–43 (1920).
90. De Groot, S. G. & Gebhard, J. W. Pupil Size as Determined by Adapting Luminance. *J. Opt. Soc. Am.* **42**, 492 (1952).
91. Ogle, K. N. & Schwartz, J. T. Depth of Focus of the Human Eye \*. *J. Opt. Soc. Am.* **49**, 39–44 (1959).
92. Fincham, E. F. The accommodation reflex and its stimulus. *Br. J. Ophthalmol.* **35**, 381–393 (1951).
93. Kruger, P. B., Mathews, S., Aggarwala, K. R. & Sanchez, N. Chromatic Aberration and Ocular Focus: Fincham Revisited. *Vision Res.* **33**, 1397–1411 (1993).
94. Kruger, P. B. & Pola, J. Stimuli for accommodation: Blur, chromatic aberration and size. *Vision Res.* **26**, 957–971 (1986).

95. Nawab, M. A comparison of visual performance under high and low color temperature fluorescent lamps. *J. Illum. Eng. Soc.* **30**, 170–175 (2001).

# Anexos

---

# Anexo 1: Consentimento Informado

---

## CONSENTIMENTO INFORMADO, LIVRE E ESCLARECIDO PARA PARTICIPAÇÃO EM INVESTIGAÇÃO

*Por favor, leia com atenção a seguinte informação. Se achar que algo está incorrecto ou que não está claro, não hesite em solicitar mais informações. Se concorda com a proposta que lhe foi feita, queira assinar este documento.*

**Título do estudo:** A Influência de Iluminação Colorida nos Parâmetros Acomodativos Oculares

**Enquadramento:** O estudo será realizado no âmbito de um projeto de investigação em desenvolvimento no Centro de Física da Universidade do Minho sob a orientação da Doutora Sandra Franco

**Explicação do estudo:** Os sistemas de iluminação que utilizamos nas nossas tarefas do dia-a-dia são um fator importante na nossa visão. Esses sistemas devem ser adequados às necessidades visuais exigidas pelo tipo de tarefa.

O estudo terá como objetivo estudar e analisar a influência de iluminação colorida nos parâmetros acomodativos oculares. Pretende-se avaliar se a resposta acomodativa altera com o tipo de iluminação utilizado.

### **Descrição dos exames a realizar:**

Preenchimento de um questionário sobre a existência de sintomatologia

**Acutidade visual.** Será avaliada a visão em termos quantitativos através da identificação de letras de diferentes tamanhos projetadas num ecrã.

**Avaliação do erro refrativo através da retinoscopia e exame subjetivo em visão de longe.** Esta avaliação será realizada com um retinoscópio que projeta luz no olho e que, através do comportamento desta ao ser refletida pela retina, permite determinar as lentes que compensam a existência de um erro refrativo. Após este exame serão avaliadas as respostas dadas pelo participante a um conjunto de lentes oftálmicas colocadas à frente dos olhos recorrendo a um foróptero (instrumento com várias lentes) ou armação de prova.

**Avaliação da resposta acomodativa através de retinoscopia de MEM.** Este procedimento é semelhante ao realizado anteriormente, mas agora o participante está a fixar um conjunto de letras colocadas a 40/50 cm.

**Avaliação dos parâmetros acomodativos.** Durante a realização desta fase do exame visual, serão avaliadas e registadas as respostas à colocação de lentes esféricas negativas e positivas à visualização de letras colocadas a 40/ 50 cm. Será normal durante a realização destes testes a visão desfocada das mesmas. Esta avaliação será feita algumas vezes para avaliar diferentes parâmetros acomodativo.

**Avaliação dos parâmetros acomodativos com iluminações coloridas.** Para entender a influência da iluminação colorida será necessária uma segunda consulta onde é realizada a avaliação

dos parâmetros acomodativos com iluminações de cor diferente. Os níveis de iluminação utilizados serão monitorizados e encontrar-se-ão sempre dentro dos parâmetros normais.

**Condições e financiamento:**

A participação será de carácter voluntário podendo desistir a qualquer momento, sem que essa decisão tenha qualquer tipo de consequência.

Não haverá qualquer pagamento de deslocações ou outras contrapartidas financeiras.

**Confidencialidade e anonimato:**

Será garantida a confidencialidade e uso exclusivo dos dados recolhidos para o presente estudo. A identificação dos participantes nunca será tornada pública;

**Assinatura/s:** .....

*Declaro ter lido e compreendido este documento, bem como as informações verbais que me foram fornecidas pela/s pessoa/s que acima assina/m./ Foi-me garantida a possibilidade de, em qualquer altura, recusar participar neste estudo sem qualquer tipo de consequências. Desta forma, aceito participar neste estudo e permito a utilização dos dados que de forma voluntária forneço, confiando em que apenas serão utilizados para esta investigação e nas garantias de confidencialidade e anonimato que me são dadas pelo/a investigador/a.*

Nome: ..... Nº: .....

Contacto: .....

Assinatura: ..... Data: ..... /..... /.....

**ESTE DOCUMENTO É COMPOSTO POR 2 PÁGINA E FEITO EM DUPLICADO: UMA VIA PARA O/A INVESTIGADOR/A, OUTRA PARA A PESSOA QUE CONSENTE**

## Anexo 2: Tabela de aleatorização

	Cor				Intensidade		
	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º
1	Branco	Vermelho	Verde	2500K	Alta	Baixa	Média
2	2500K	Verde	Vermelho	Branco	Alta	Baixa	Média
3	Verde	Branco	Vermelho	2500K	Baixa	Média	Alta
4	Branco	Verde	2500K	Vermelho	Média	Baixa	Alta
5	Verde	Branco	2500K	Vermelho	Média	Baixa	Alta
6	Verde	2500K	Branco	Vermelho	Baixa	Média	Alta
7	Verde	Vermelho	2500K	Branco	Média	Baixa	Alta
8	Branco	Vermelho	Verde	2500K	Média	Baixa	Alta
9	Branco	Vermelho	2500K	Verde	Baixa	Média	Alta
10	Branco	Verde	Vermelho	2500K	Alta	Média	Baixa
11	2500K	Branco	Vermelho	Verde	Baixa	Alta	Média
12	Branco	Verde	Vermelho	2500K	Baixa	Média	Alta
13	Verde	Vermelho	Branco	2500K	Baixa	Alta	Média
14	Branco	Vermelho	2500K	Verde	Média	Alta	Baixa
15	Branco	Vermelho	Verde	2500K	Baixa	Média	Alta
16	Vermelho	Branco	Verde	2500K	Alta	Baixa	Média
17	Branco	Verde	2500K	Vermelho	Baixa	Alta	Média
18	Verde	Vermelho	2500K	Branco	Baixa	Média	Alta
19	Verde	Vermelho	Branco	2500K	Alta	Baixa	Média
20	2500K	Verde	Branco	Vermelho	Média	Baixa	Alta
21	Branco	Vermelho	Verde	2500K	Alta	Baixa	Média
22	2500K	Verde	Vermelho	Branco	Alta	Baixa	Média
23	Verde	Branco	Vermelho	2500K	Baixa	Média	Alta
24	Branco	Verde	2500K	Vermelho	Média	Baixa	Alta
25	Verde	Branco	2500K	Vermelho	Média	Baixa	Alta
26	Verde	2500K	Branco	Vermelho	Baixa	Média	Alta
27	Verde	Vermelho	2500K	Branco	Média	Baixa	Alta