

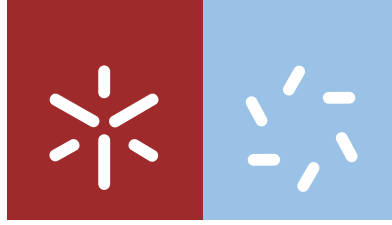


**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

João Pedro Teixeira da Cunha

**Influência dos Meios Oculares na Perceção  
do Teste de Visão das Cores de Ishihara**

outubro de 2019



**Universidade do Minho**  
Escola de Ciências

João Pedro Teixeira da Cunha

## **Influência dos Meios Oculares na Percepção do Teste de Visão das Cores de Ishihara**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado em Optometria Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação do  
**Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares**  
e do  
**Professor Doutor Sérgio Miguel Cardoso Nascimento**

# 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

Aos meus orientadores, Prof. João Linhares e Prof. Sérgio Nascimento, sempre disponíveis em ajudar, pela paciência e dedicação.

Aos meus pais, irmão e restante família, sempre presentes nos momentos mais difíceis, e sempre com uma palavra de apoio e motivação.

Aos meus amigos Andreia, Cristiana, Filipa, Jéssica, João, Raquel, Rodrigo, e todos os outros sempre disponíveis em ajudar, sempre com uma palavra amiga e de força.

Um agradecimento especial à Andreia Gomes que sempre me ajudou quando era preciso, muitas vezes abdicando do seu tempo para me ajudar a realizar tarefas relacionadas a esta dissertação, sem a sua ajuda esta dissertação nunca se realizaria.

Agradecer também à equipa técnica e colegas de equipa do Andebol Clube de Fafe, pela paciência, compreensão e amizade nas ocasiões mais difíceis.

Um Agradecimento também a todos os sujeitos que participaram neste estudo, sem eles este trabalho não seria possível.

A todas as pessoas mencionadas e muitas outras que ficaram por mencionar, muito obrigado!

## 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.

# Resumo

## Influencia dos Meios Oculares na Percepção do Teste de Visão das Cores de Ishihara

O cristalino é uma estrutura ocular com modificações relacionadas com a idade. O cristalino torna-se mais denso, aumenta de diâmetro, volume, curvatura ficando também amarelado e opaco com o passar dos anos. Estas modificações provocam alterações de transmitância da luz no espectro visível com maior impacto nos comprimentos de onda entre os 400nm e 500nm do espectro visível. O objetivo deste trabalho foi testar se existem alterações na percepção cromática de algumas patelas do teste de visão das cores de Ishihara com a simulação de alteração da transmitância do cristalino com a idade com alterações de iluminante e intensidade de iluminação. Participaram neste estudo 20 sujeitos jovens, com idade média de  $21,55 \pm 1,27$  anos. Foram utilizadas imagens de 12 patelas de Ishihara como se percebidas através de cristalinos simulados para idades entre os 20 e os 80 anos em passos de 2 anos. O observador podia circular pela sucessão de imagens que eram apresentadas num ecrã CRT calibrado em cor e luminância. Cada patela foi testada 3 vezes para cada condição iluminante/iluminância. Os iluminantes utilizados foram o CIE D65 e uma fonte de luz LED em intensidades de 5, 10 e 15  $\text{cd/m}^2$ . A tarefa dos observadores era a de indicar, utilizando um controlo remoto, quando notavam alterações na percepção das cores das patelas de Ishihara, circulando por todas as patelas a partir da patela correspondente à idade do observador. A sequência de seleção era progressiva, não permitindo retroceder. As respostas dos observadores foram analisadas estimando a frequência de escolha em função da simulação da idade do cristalino. Encontrou-se que as médias das idades de seleção correspondentes à percepção de alteração cromática são muito idênticas entre cada situação, sendo muito próximas dos 55 anos. Estimando a frequência cumulativa e extraindo os limiares de deteção a 50% e 75% das respostas, também devolve valores muito parecidos de 55 anos e 65 anos respetivamente. Verificou-se que alterar o iluminante e correspondente iluminância não produz influência na percepção das patelas do teste de visão das cores de Ishihara, face ao resultado obtido noutros trabalhos. Em termos de legibilidade das patelas estes parâmetros não tiveram qualquer influência.

Palavras-chave: visão das cores, envelhecimento do cristalino, teste de Ishihara

# Abstract

## The Influence of the Ocular Media on the Perception of the Ishihara's Color Vision Test

The crystalline lens is an ocular structure that undergoes variations with progressing age. The lens becomes denser, with increasing volume, diameter, curvature, yellowish and opacified with increasing age. These variations induce changes to the way the lens transmit the visible spectrum, with a higher impact on the shorter wavelengths around 400 to 500 nm. The purpose of this work was to test the perceived changes in the chromatic perception of plates of Ishihara's color Vision test with changing illuminant and lighting intensity. Twenty subjects participated in the study with an average age of  $21,55 \pm 1.27$  years old. Twelve plates of the Ishihara's test were used as if seen by a lens simulated for ages from 20 to 80 years old in 2 years old steps. The observer could slide through the images presented on a CRT computer screen calibrated in luminance and color. Each plate was tested 3 times for each illuminant and illuminance combination. The used illuminants were the CIE D65 and a LED light source at intensities of 5, 10 and 15  $\text{cd/m}^2$ . The observers' task was to signal in a remote control when the color of the Ishihara's plate changed by going through all the images starting with the one correspondent to the observer's age. The sequence of selection was progressive and rollbacks were disabled. The observers' answers were analyzed by estimating the frequency of selection as a function of the lens simulated age. It was found that for all conditions tested the average age at which the observers perceived a chromatic change was of about 55 years old. The cumulative frequency was also computed and the thresholds of detection corresponding to 50% and 75% estimated to be around 55 and 65 years old, respectively. It was found that changing the illuminant and the correspondent illuminance does not change the chromatic perception of the Ishihara's plates, when these results are compared with previous ones. For all ages simulated there was no reading change of the Ishihara's plates.

Key words: colour vision, aging of the lens, Ishihara test

# Índice

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de integridade.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de tabelas.....	xiv
Índice de equações.....	xv
Abreviaturas e Acrónimos.....	xvi
Revisão Bibliográfica.....	17
1.1 Sistema visual.....	17
1.1.1 Globo ocular.....	17
1.1.2 Córnea, conjuntiva e esclera.....	18
1.1.3 Cristalino, íris e músculos intrínsecos.....	21
1.1.4 Cataratas e Visão das cores.....	23
1.1.5 Coroide e vítreo.....	25
1.1.6 Retina.....	25
1.2 Perceção Visual.....	28
1.3 Visão das Cores.....	28
1.4 Iluminantes CIE.....	30
1.4.1 Lâmpadas fluorescentes.....	30
1.4.2 Lâmpadas incandescentes.....	31
1.4.3 Luz do dia.....	33



1.4.4 Diodos Emissores de luz (LED) .....	34
1.5 Fotorreceptores e visão das cores.....	35
1.5.1 Anomalias na visão das cores.....	36
1.6 Colorimetria CIE.....	39
1.6.1 Observador colorimétrico Standard CIE.....	39
1.6.2 Funções de Correspondência Cromática.....	40
1.6.3 Espaço de cor CIE 1931.....	41
1.6.4 Espaço de cor CIE 1964.....	44
1.6.5 Espaço de cor CIE 1976 (UCS).....	44
1.6.6 Espaço de cor CIELAB, CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ).....	46
1.7 Teste de diagnóstico /rastreo de anomalias da visão das cores.....	47
1.7.1 Teste de Ishihara.....	47
1.7.2 Teste HRR.....	49
1.7.3 Teste de 100 Tonalidades Farnsworth-Munsell.....	50
1.7.4 Anomaloscópio.....	51
Material e Métodos.....	54
2.1 Objetivo.....	54
2.2 Métodos.....	54
2.3 Tipo de estudo .....	54
2.4 Observadores .....	55
2.5 Configuração Experimental .....	55
2.5 Aquisição das patelas de Ishihara.....	58
2.6 Monitor e condições ambientais .....	60
2.7 Procedimento experimental .....	62
2.8 Análise dos resultados.....	64
Resultados .....	67

Discussão dos resultados.....	73
Conclusões e trabalho futuro .....	75
Bibliografia .....	76
Anexos .....	79
Anexo 1 Exemplo do consentimento informado entregue aos sujeitos que participaram no estudo.....	80
Anexo 2 Exemplo de um resultado obtido apos a realização do FM-100.....	81
Anexo 3 Exemplo de uma folha de registo do Anomaloscópio .....	82
Anexo 4 Exemplo de uma folha de registo do teste de Ishihara.....	83
Anexo 5 Imagens utilizadas durante o procedimento experimental.....	84
Anexo 6-Parcer da subcomissão de ética para as ciências da vida e da saúde .....	88

# Índice de Figuras

<b>Figura 1-</b> Anatomia do globo ocular (adaptado de Senell Richard S et al ;1998). .....	18
<b>Figura 2-</b> Representação das várias camadas da retina (adaptado de Willoughby CE et al;2010). .....	19
<b>Figura 3-</b> Alterações que ocorrem na transmitância do cristalino com o envelhecimento. Espectro de transmitância do cristalino nos jovens (linha azul) e idosos (linha vermelha). Para o grupo de maior faixa etária a filtragem é particularmente pronunciada em comprimentos de onda curtos a médios (530 nm), em comparação com o grupo dos jovens. Ocorre uma diferença média da transmissão de 42,3%, para 480 nm, entre os dois grupos etários (adaptado de Najjar et al.; 2014). .....	23
<b>Figura 4-</b> Pinturas representantes da Lagoa do lírio de Monet e a ponte japonesa em Giverny. A - fotografia da ponte tirada em 2006 pela fotógrafa Elizabeth Murray, B - pintura de Monet do lago e da ponte antes de qualquer sintoma visual (1899), C - fotografia da ponte simulando uma catarata nuclear moderada, D -fotografia da ponte simulando uma catarata madura com uma acuidade visual de 20/200 (adaptado de Michael F et al; 2006). .....	24
<b>Figura 5-</b> Representação das várias camadas da retina. RPE-epitélio pigmentar, A e B- fotorreceptores, OLM- membrana limitante externa, ONL-membrana nuclear externa, OPL- membrana plexiforme externa, INL- membrana nuclear interna, IPL- membrana plexiforme interna, GCL-células ganglionares, NFL- camada de fibras nervosas e ILM- membrana limitante interna. (adaptado de Newell F. Oftalmologia - Fundamentos e conceitos). .....	26
<b>Figura 6-</b> Representação dos dois tipos de fotorreceptores, à esquerda um bastonete, à direita um cone (adaptado de Schnapf J;1987). .....	27
<b>Figura 7-</b> Representação da concentração dos vários tipos de fotorreceptores nas várias zonas da retina. (adaptado de Wandell B;1995). .....	28
<b>Figura 8-</b> Representação do espectro eletromagnético na zona visível. (adaptado de Hunt RW; 2011) .....	29
<b>Figura 9</b> Representação dos métodos de mistura de cores, à esquerda o método aditivo e à direita o método subtrativo. ....	30

<b>Figura 10</b> -Distribuição do poder espectral relativo de uma lâmpada fluorescente. O poder espectral relativo está representado num histograma com barras de 5nm de largura. (adaptado de Hunt RW; 2011).....	31
<b>Figura 11</b> -Distribuição do poder espectral de irradiantes de Planck em diferentes temperaturas (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	32
<b>Figura 12</b> -Poder espectral relativo da luz do dia (curva a cheio) e de um irradiante de Planck de temperatura de 5630K (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	33
<b>Figura 13</b> -Poder espectral relativo de três exemplos de luz do dia, com temperaturas correlacionadas de cor de 5610, 7140 e 10350 K (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	34
<b>Figura 14</b> -Distribuição do poder espectral relativo de um LED branco, composto por um LED emissor de luz azul e um fosfato. Temperatura de cor correlacionada de 6500 K (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	35
<b>Figura 15</b> -Curvas de sensibilidade de bastonetes (linha tracejada) e cones (linhas compactas) em condições fotópicas. $\beta$ -curva de sensibilidade dos cones S; $\gamma$ -cuva de sensibilidade dos cones M, $\rho$ -curva de sensibilidade dos cones L, estas curvas estão normalizadas para um máximo de 1 (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	36
<b>Figura 16</b> -Simulação da visão dos indivíduos portadores de deficiências de visão das cores. A-normal, B-protanope, C-Tritanope, D-Deutanope, E-Protanómalo, F-Deutanómalo. (adaptado de <a href="https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/">https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/</a> ; disponível em setembro de 2019).....	39
<b>Figura 17</b> Funções de correspondência cromática para o observador colorimétrico padrão CIE 1931 (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	41
<b>Figura 18</b> -X, Y, e Z funções de correspondência cromática para o observador colorimétrico CIE 1931 a 2° (linhas a cheio) e para o observador colorimétrico padrão CIE 1964 a 10° (linhas a tracejado) (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	42
<b>Figura 19</b> -Representação do diagrama cromático $x, y$ do sistema CIE 1931. O triângulo representado refere-se aos primários R, G, B, usado para definir o sistema tricromático CIE. O “E” é a localização das coordenadas do iluminante de equi-energia (adaptado de Hunt RW; 2011). 43	43
<b>Figura 20</b> -Diagrama cromático CIE 1931 $x, y$ (imagem esquerda) e diagrama cromático CIE 1976 $u', v'$ (imagem direita). Cada segmento de reta representa diferenças perceptuais iguais (adaptado de Hunt RW; 2011). .....	45

<b>Figura 21</b> -Representação das três dimensões do espaço CIELAB mostrando um cilindro de saturação constante ( $C_{ab}$ ) e tonalidade variável e um plano de ângulo de tonalidade constante ( $h_{ab}$ ) mas saturação variável (adaptado de Schanda J; 2007). .....	47
<b>Figura 22</b> -Imagem do teste de visão das cores de Ishihara (adaptado de <a href="https://www.doctorshop.pt/Prodotti/ishihara-teste-de-cor-livro-de-10-placas-com-numeros-103763">https://www.doctorshop.pt/Prodotti/ishihara-teste-de-cor-livro-de-10-placas-com-numeros-103763</a> ; Junho de 2019). .....	48
<b>Figura 23</b> -Imagem de teste de visão das cores 100 Tonalidades de Farnsworth-Munsell (adaptado de <a href="http://colorconfidence.com/products/farnsworth-munsell-100-hue-test">colorconfidence.com/products/farnsworth-munsell-100-hue-test</a> ; junho de 2019).....	51
<b>Figura 24</b> -Resultado do teste de visão das cores das 100 Tonalidades de Farnsworth-Munsell de um observador com visão cromática normal. Cada registo a vermelho indica uma troca na ordem das tonalidades, o que se considera normal.....	51
<b>Figura 25</b> -Representação das equações de Rayleigh (esquerda) e de Moreland (direita) (adaptado de Instruction Manual HMC-Anomaloskop).....	52
<b>Figura 26</b> -Representação dos resultados obtidos pelo anomaloscópio HMC, diagrama de Pitt Rayleigh .....	53
<b>Figura 27</b> Distribuição espectral relativa dos iluminantes utilizados durante o procedimento experimental. A linha a vermelho representa o iluminante D65 e a linha a preto o LED. ....	56
<b>Figura 28</b> -Representação da aquisição da imagem híperespectral da primeira patela de Ishihara. O retângulo azul representa a posição da referência cinza.....	60
<b>Figura 29</b> -Representação da patela do teste de Ishihara número 5 para 20 (A), 40 (B), 60(C) e 80 (D) anos, com o iluminante CIE D65. ....	61
<b>Figura 30</b> -Representação da interface do software. Nesta interface é possível alterar algumas variáveis como: iluminante, idade do observador (em anos), intensidade de iluminação entre outras.....	63
<b>Figura 31</b> -Representação de uma distribuição gaussiana, em que o pico da curva é representado por $x_c$ , com coordenadas $(x_c, y_c)$ , com $y_c=0$ (adaptado de <a href="https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Gaussian-Function-FitFunc#Function">https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Gaussian-Function-FitFunc#Function</a> , setembro de 2019).....	65
<b>Figura 32</b> -Idade média da simulação da transmitância do cristalino, em que os observadores percebem alteração de cor na patela, para cada intensidade de iluminação testada correspondente a cada iluminante e respetivo desvio padrão. ....	67
<b>Figura 33</b> -Representações gráficas das distribuições das frequências de seleção das idades dos observadores. As linhas a vermelho representam a distribuição com melhor ajuste. A- iluminante	

LED com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; B- iluminante LED com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; C- iluminante LED com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>; D- iluminante D65 com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; E- iluminante D65 com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; F- iluminante D65 com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>..... 69

**Figura 34** Representações gráficas das distribuições das frequências cumulativas, as barras a vermelho representam os limiares de 50% e 75%. A- Iluminante LED com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; B- iluminante LED com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; C- iluminante LED com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>; D- iluminante D65 com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; E- iluminante D65 com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; F- iluminante D65 com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>..... 71

# Índice de tabelas

<b>Tabela 1</b> -Distribuição das várias deficiências de visão das cores em raças ocidentais (adaptado de Hunt RW; 2011 e Birch J; 2012).....	38
<b>Tabela 2</b> -Valores da densidade ótica da função de transmissão total da lente em função do comprimento de onda (nm), $T_L$ , para um observador com uma idade média de 32 anos e a separação de $T_L$ em duas componentes: $T_{L1}$ que representa a porção afetada pelo envelhecimento do cristalino após os 20 anos e: $T_{L2}$ representa a porção estável após os 20 anos (Adaptado de Pokorny J; 1987).....	57
<b>Tabela 3</b> -Descrição dos clusters utilizados durante o procedimento experimental.....	62
<b>Tabela 4</b> -Tabela de aleatorização.....	64
<b>Tabela 5</b> -Valores das médias e desvio padrões correspondentes ao gráfico da figura 32.....	68
<b>Tabela 6</b> -Valores da posição do máximo da(s) curva(s) Gaussiana(s) ajustada aos dados de frequência e correspondente $R^2$ dos gráficos da figura 33.....	70
<b>Tabela 7</b> -Valores dos limiares de 50% e 75% relativos aos gráficos da figura 34.....	72

# Índice de equações

<b>Equação 1-</b> equação desenvolvida por Max Planck para derivar a potência irradiada em cada comprimento de onda a partir da temperatura de um corpo negro. ....	32
<b>Equação 2-</b> equação para determinar a correspondência cromática a partir de três primários. .	40
<b>Equação 3-</b> equação para determinar a correspondência cromática a partir de três primários, para uma distribuição espectral arbitrária. ....	41
<b>Equação 4-</b> equações que definem os triestímulos CIE-XYZ.....	42
<b>Equação 5-</b> equações que definem as coordenadas cromáticas $x$ , $y$ e $z$ . ....	43
<b>Equação 6-</b> equações de como obter as coordenadas cromáticas CIE 1976 UCS a partir dos valores triestímulos ou das coordenadas cromáticas CIE 1931.....	45
<b>Equação 7-</b> equações que definem o espaço de cor CIELAB. ....	46
<b>Equação 8 -</b> Equações que descrevem a variação da densidade ótica dos 20 aos 60 anos e dos 60 aos 80 anos, respetivamente.....	57
<b>Equação 9-</b> Fórmula de Sturges. ....	65



## Abreviaturas e Acrónimos

‰: percentagem

μm: micrómetros

AV: acuidade visual

cd: candelas

CIE: Commission Internationale d'Eclairage (em português: Comissão Internacional de Iluminação)

K: Kelvin

LED: Light Emitting Diodes (em português: Díodos Emissores de Luz)

lm: lumens

mL: mililitros

mm: milímetros

mm<sup>2</sup>: milímetros quadrados

nm: nanómetros

UCS: Uniforme Color Space (em português: Espaço Uniforme de Cor)

UV: ultravioleta

W: Watt

# Revisão Bibliográfica

## 1.1 Sistema visual

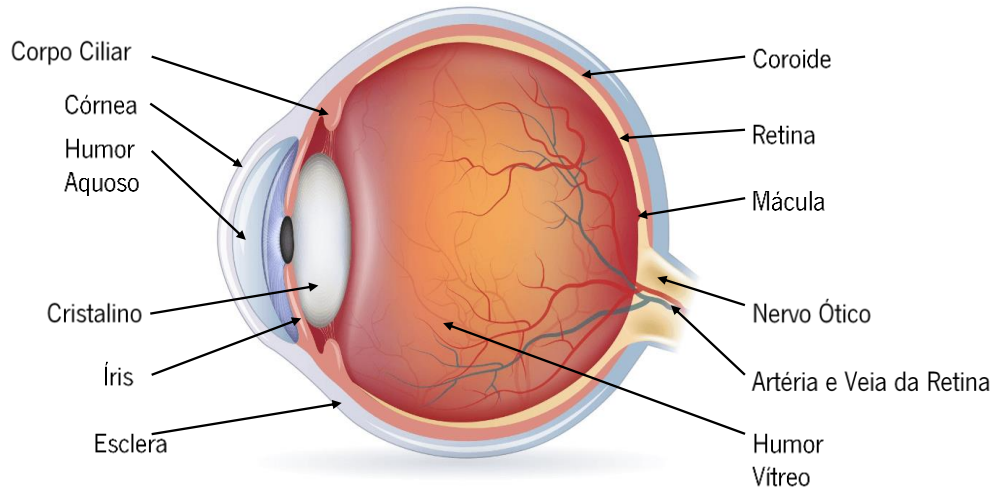
O sistema visual é composto pelo globo ocular, cavidade orbitaria, sistema lacrimal, pálpebras e nervo ótico que leva o impulso nervoso até ao córtex visual.<sup>1</sup>

Em termos físicos a luz que chega ao olho é refratada pelos vários componentes óticos do globo ocular. Ao chegar à retina esta transforma o estímulo luminoso num impulso elétrico que é transmitido ao córtex visual através do nervo ótico.<sup>1</sup>

### 1.1.1 Globo ocular

O globo ocular normal, mede aproximadamente de 22 mm a 27 mm, de diâmetro ântero-posterior. Pode-se dividir o globo ocular em 3 camadas. A camada mais externa, constituída pela córnea, a esclera e a zona de transição entre a esclera e a córnea que se designa por limbo esclero-corneal. A camada média ou úvea, constituída pela coroide, íris e o corpo ciliar. A camada mais interna é a retina (**Figura 1**).<sup>2</sup>

O globo ocular é também dividido em duas câmaras, a câmara anterior e câmara posterior, quando se segue a direção dos raios de luz que chegam à retina. A câmara anterior é limitada anteriormente pela camada posterior da córnea e limitada posteriormente pela íris e pela face anterior do cristalino. Periféricamente, é limitada pelo angulo irido-corneano. Esta câmara é preenchida pelo humor aquoso. A câmara posterior é limitada anteriormente pela face posterior da íris e pela face posterior do cristalino e é limitada posteriormente pela camada mais anterior da retina. Esta câmara é preenchida pelo humor vítreo.<sup>2</sup>



**Figura 1-** Anatomia do globo ocular (adaptado de Senell Richard S et al ;1998).

### 1.1.2 Córnea, conjuntiva e esclera

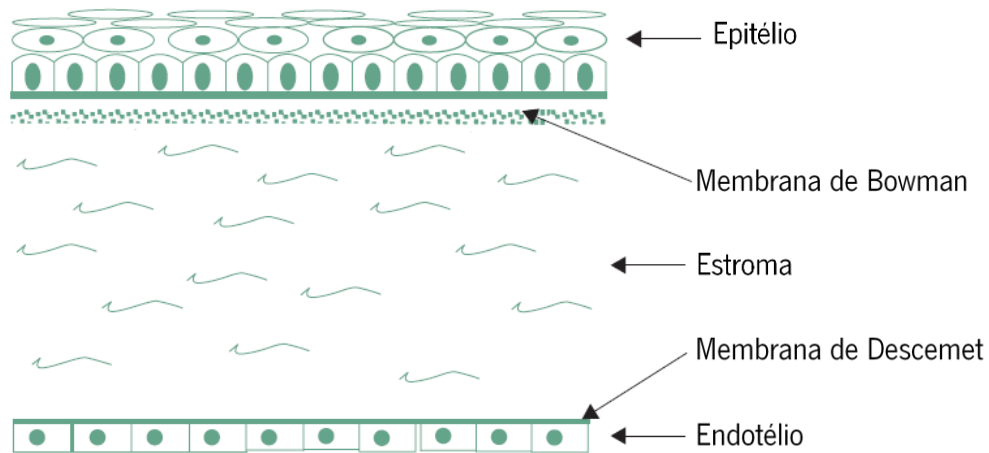
A córnea é a estrutura mais anterior do globo ocular e fica à frente da íris. É o tecido mais densamente enervado do corpo já que a maior parte das fibras nervosas que enervam a córnea são sensoriais.<sup>3</sup>

A córnea de uma pessoa adulta tem, em média, um diâmetro horizontal de 11.5 mm e um diâmetro vertical de 10.5 mm. A curvatura pode variar muito entre indivíduos, mas normalmente, mante-se constante ao longo da vida para um mesmo indivíduo. Tem uma espessura central entre 0.5 mm a 0.6 mm e um índice de refração de 1,376.<sup>3,4</sup>

A córnea é uma estrutura avascular. Os capilares provenientes das artérias ciliares chegam até ao limbo esclero-corneal, onde formam arcadas para suprir a córnea com os nutrientes necessários.<sup>3,5</sup>

A córnea é transparente e é responsável por cerca de 2/3 do poder refrativo total do olho. É a primeira barreira estrutural de proteção infecciosa do globo ocular. Uma parte muito importante para a efetividade do poder refrativo da córnea é o filme lacrimal, que com os seus componentes também atua como primeira barreira de proteção infecciosa.

No que diz respeito à córnea, esta pode ser dividida em 3 camadas e duas membranas, como representado na **Figura 2**: o epitélio, membrana de Bowman, estroma, membrana de Descemet e o endotélio.<sup>5</sup>



**Figura 2-**Representação das várias camadas da retina (adaptado de Willoughby CE et al;2010).

O epitélio é a camada mais anterior da córnea e é parte integral da interface filme lacrimal-córnea que é crítica no poder refrativo do olho e proteção ocular. O epitélio tem em média entre 40  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$  e é composto por cerca de 4 a 6 camadas de células. As células epiteliais tem um tempo de vida medio de 7 a 10 dias, sendo as células mais antigas e superficiais (anteriores) repostas por células de camadas mais internas e periféricas.<sup>5</sup> As lesões mais comuns no epitélio são mecânicas, térmicas e químicas. Quando existem lesões abrasivas no epitélio, células periféricas à lesão começam a cobrir o defeito gerado. Este processo começa a ser gerado minutos apos a lesão. Vinte e quatro a trinta horas após a lesão a população de células do epitélio começa a ser repostas através de mitose.<sup>5</sup>

A membrana de Bowman situa-se entre o endotélio e o estroma. Esta membrana tem cerca de 15  $\mu\text{m}$  de espessura e ajuda a córnea a manter a sua forma, sendo assim uma membrana estrutural. A membrana de Bowman não se regenera e pode formar cicatrizes. As cicatrizes tornam a superfície uniforme da córnea numa superfície irregular, o que impede a formação de uma boa imagem.<sup>5</sup>

O estroma corneal mantem a estrutura da córnea. Esta camada ocupa de 80% a 85% da espessura total da córnea. O principal constituinte do estroma são as fibras de colagénio que se organizam em feixes paralelos, chamadas de fibrilas. Estas fibrilas são também elas dispostas em paralelo, em lamelas, oblíquas entre si. Esta organização das fibras de colagénio reduz a dispersão da luz e contribui para a transparência da córnea. O estroma é constituído por cerca de 200 a 250 lamelas. A espessura periférica do estroma é maior do que a central. Processos como o

edema estromal podem alterar a disposição das fibras de colagénio e consequentemente alterar a transparência da córnea.<sup>5</sup>

A membrana de Descemet localiza-se entre o estroma e o endotélio, tem cerca de 10 µm de espessura e é uma membrana de suporte estrutural.<sup>5</sup>

O endotélio é a camada mais interna da córnea, localiza-se após a membrana de Descemet e entra em contacto com o humor aquoso. É composto por uma camada única de células e serve de barreira à passagem do humor aquoso para o interior da córnea. A disposição e forma destas células aparenta a forma de um favo de mel. Na idade adulta o endotélio tem a espessura de cerca de 4 µm. A densidade e topografia das células do endotélio varia durante a vida de cada indivíduo. A forma hexagonal das células vai-se alterando (em forma e tamanho) e a densidade celular vai diminuindo. A densidade celular endotelial normal média de um indivíduo de 20 anos é de 3000 a 4000 células/mm<sup>2</sup>. A densidade celular decresce, em média, cerca de 0,6% por ano. As células endoteliais têm a função de manter o nível de hidratação do estroma em valores normais (cerca de 78% de água). A diminuição da densidade celular pode dever-se a inflamações, traumatismos e, como referido anteriormente, à idade do indivíduo.<sup>3,5</sup>

Caso a densidade endotelial caia para menos de 500 células/mm<sup>2</sup> existe um risco elevado de se desenvolver edema, pela entrada de humor aquoso para o estroma corneano, uma vez que a função de barreira aquosa do endotélio fica comprometida. Para além da densidade celular, o polimegatismo (aumento do tamanho da célula) e pleomorfismo (variação da forma das células) são processo a ter em conta na análise de um mosaico endotelial. As células do endotélio não são repostas, mas as células restantes tem a capacidade de aumentar o seu tamanho (polimegatismo) e modificar a sua forma (pleomorfismo) para ocupar os espaços deixados pelas células mortas.<sup>3,5</sup>

A esclera é uma camada muito dura e responsável pelo suporte dos coconstituintes do globo ocular, estendendo-se do limbo esclero-corneal até ao nervo ótico. Nos adultos a espessura normal da esclera é de cerca de 1 mm posteriormente. Na zona equatorial do globo ocular a sua espessura diminui cerca de 0.3 mm. Esta diminuição deve-se ao facto de nessa zona do globo ocular se situarem as inserções dos músculos retos. Na zona posterior a esclera é perfurada pelas fibras do nervo ótico e vasos sanguíneos que alimentam a parte interna do globo ocular, denominada de lamina crivosa.<sup>6</sup>

A esclera é formada essencialmente por colagénio sendo a sua composição muito parecida com a da córnea. No entanto, ao contrário da córnea que é transparente a esclera é opaca. Esta alteração de transparência entre as duas estruturas deve-se essencialmente à forma de organização das fibras de colagénio.<sup>2,6</sup> Extremamente organizadas na córnea e desorganizadas na esclera.

A conjuntiva é um tecido que se localiza na superfície interna das pálpebras (conjuntiva tarsal), na zona do fornix onde se junta a conjuntiva tarsal e bulbar (fornix conjuntival) e na zona anterior da esclera (conjuntiva bulbar). A conjuntiva é dividida em 2 camadas, o epitélio e o estroma.<sup>7</sup>

O epitélio da conjuntiva tem a espessura de entre 2 a 5 camadas de células. O estroma da conjuntiva é uma camada altamente vascularizada, separa-se do epitélio por uma membrana basal. É nesta camada onde se localizam as várias células secretoras de mucina (células de goblet, criptas de Henle e glândulas de Manz).<sup>7</sup>

### **1.1.3 Cristalino, íris e músculos intrínsecos**

A úvea é o nome dado ao conjunto formado pela íris, a coroide, o cristalino e os músculos que o rodeiam.

O cristalino localiza-se entre a íris e o humor vítreo. É responsável pelo restante poder refrativo do olho. É uma estrutura muito complexa, composta por camadas de fibras dispostas num padrão radial. O conteúdo do cristalino está dentro de uma cápsula altamente elástica. As zónulas de Zinn são os ligamentos que sustentam o cristalino. Estas ligam-se ao corpo ciliar, mantendo o cristalino no lugar.<sup>4</sup>

Na acomodação, o cristalino é o principal interveniente. Este altera a sua forma para permitir focar a luz na retina. Tem a forma de uma lente biconvexa e é avascular para permitir uma boa transparência.<sup>8</sup> Este tem um diâmetro médio de aproximadamente 9 mm. Quando o cristalino está na sua posição de menor potencia refrativa, a sua espessura central é aproximadamente e em média de 3,6 mm e tem um índice de refração de cerca de 1,42.<sup>4</sup>

A acomodação é o processo que se refere à mudança dióptrica do cristalino para manter os raios de luz focados na retina quando a sua fonte está a várias distâncias.<sup>9</sup> O musculo ciliar, é um músculo circular que quando contrai diminui o seu diâmetro e empurra as zónulas que fazem com que cristalino altera a sua forma, aumentando o seu raio de curvatura e a sua potencia

dióptrica, mantendo os raios de luz provenientes de várias distâncias na fóvea. A amplitude de acomodação é o intervalo onde funciona a acomodação, ou seja, é a variação desde o ponto remoto (onde o cristalino se encontra completamente relaxado e a projetar os raios na retina) e o ponto mais próximo dos olhos (onde o cristalino se encontra na sua curvatura maior) onde ainda se consegue projetar os raios de luz focados na retina, a partir do qual se mantêm o nível máximo de acomodação, mas não se consegue sustentar a imagem nítida na retina. Com a idade a amplitude de acomodação vai diminuindo, por volta dos 45 anos a amplitude de acomodação atinge valores tão baixos que se torna impossível realizar as tarefas do dia-a-dia. A este processo chama-se presbiopia.

Cerca de 60% da constituição total do cristalino são proteínas. O cristalino é completamente transparente no nascimento a sua densidade ótica vai aumentando, este vai ficando amarelado com a idade. A incapacidade das células do cristalino serem substituídas torna o cristalino bastante suscetível a danos relacionados com a idade e danos ambientais (radiação, traumatismos). Estas lesões resultam normalmente em diminuição da transmissão da luz através do cristalino.<sup>8</sup> A alteração da transmissão da luz do cristalino com a idade altera a percepção das cores, este tema será mais aprofundado no subtema abaixo "Catartas e visão das cores".

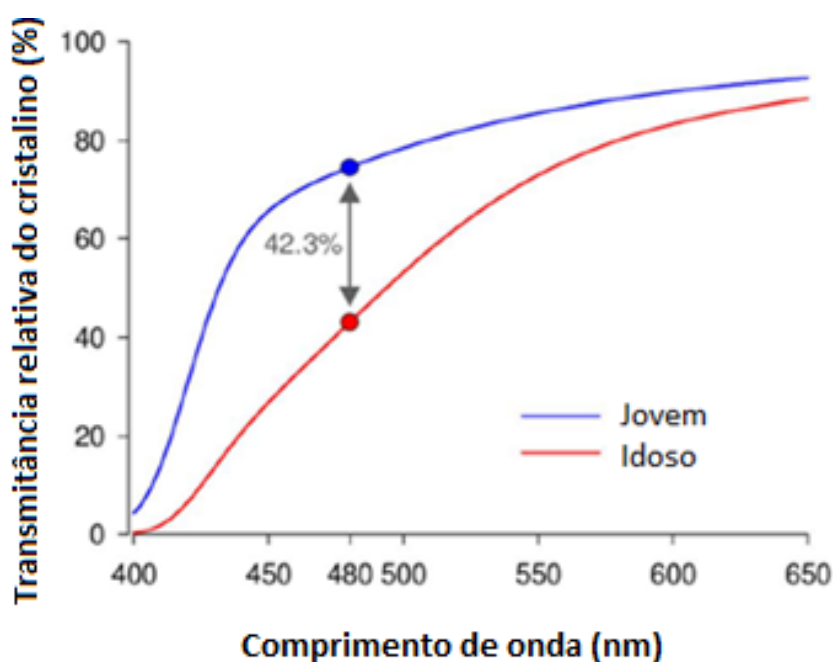
A íris forma a porção anterior da úvea. É um diafragma pigmentado, contrátil, com uma abertura central, a pupila. A íris localiza-se entre o humor aquoso e o cristalino. A sua principal função é limitar a quantidade de luz que chega a retina. A íris consiste num estroma e duas camadas epiteliais. O estroma é o tecido onde se localizam as conexões vasculares da íris, melanócitos, fibras nervosas, o músculo esfíncter da pupila e as células mioepiteliais do dilatador da pupila (ou contractor da íris). O humor aquoso, produzido nos processos ciliares, circula através da pupila, até ao canal de Schlemm, no ângulo irido-coreano, onde é expelido para as fossas nasais.<sup>6</sup>

Os músculos intrínsecos ao globo ocular são: o músculo dilatador da pupila, o músculo esfíncter da pupila e o músculo ciliar. O músculo dilatador da pupila é innervado pelo sistema nervoso simpático e é responsável pela dilatação da pupila (midríase); o esfíncter da pupila é innervado pelo sistema nervoso parassimpático e pelo terceiro par de nervos cranianos sendo a sua função a contração da pupila (miose). O músculo ciliar está localizado no corpo ciliar, periférico ao cristalino e zónula de Zinn. Quando este músculo contrai o cristalino altera a sua forma aumentando a sua curvatura e permitindo a acomodação, como referido anteriormente.<sup>2</sup>

### 1.1.4 Cataratas e Visão das cores

O cristalino é uma estrutura ocular muito suscetível a alterações relacionadas com a idade. O cristalino torna-se mais denso, aumenta de diâmetro, volume e curvatura com o passar dos anos, este vai ficando também amarelado, o que normalmente resulta em catarata. O aumento da densidade do cristalino e o facto de este ficar cada vez mais amarelado provoca alterações de transmitância da luz no espectro visível.<sup>8</sup>

Um estudo publicado em 2014 por Raymond P. Najjar e colaboradores, investigou os efeitos do envelhecimento na sensibilidade espectral à luz e concluiu que com o passar dos anos a transmitância do cristalino vai diminuindo, em todo o espectro visível, mas a diminuição é mais acentuada nos comprimentos de onda entre os 400nm e 500nm do espectro visível. A transmitância do cristalino de um grupo de jovens e de um grupo de idosos foi comparada e foi concluído que o grupo de idosos tem uma diminuição de transmitância máxima de 42,3% aos 480 nm (enquanto os jovens apresentam uma transmitância de cerca de 79,4%) como é representado na Figura 3.<sup>10</sup>



**Figura 3**-Alterações que ocorrem na transmitância do cristalino com o envelhecimento. Espectro de transmitância do cristalino nos jovens (linha azul) e idosos (linha vermelha). Para o grupo de maior faixa etária a filtragem é particularmente pronunciada em comprimentos de onda curtos a médios (530 nm), em comparação com o grupo dos jovens. Ocorre uma diferença média da transmissão de 42,3%, para 480 nm, entre os dois grupos etários (adaptado de Najjar et al.; 2014).



Um dos casos documentado que relacionava cataratas e visão das cores foi o caso do pintor Claude Monet. No ano de 1908 foi diagnosticada ao pintor uma catarata nuclear que provocou alterações na acuidade visual e também na percepção das cores. Estima-se que em 1910 Monet apresentava uma acuidade visual (AV) de cerca de 20/100 e em 1922 uma AV seria de 20/200. Na **Figura 4 A** observa-se uma fotografia da Lagoa do lírio e da Ponte Japonesa em Giverny, na **Figura 4 B** observa-se uma pintura feita por Monet do mesmo local em 1899, na **Figura 4 C e D** observamos imagens que simulam a percepção do cenário representado em A e B para uma catarata moderada e uma catarata madura respectivamente.<sup>11</sup>



**Figura 4**-Pinturas representantes da Lagoa do lírio de Monet e a ponte japonesa em Giverny. A - fotografia da ponte tirada em 2006 pela fotógrafa Elizabeth Murray, B - pintura de Monet do lago e da ponte antes de qualquer sintoma visual (1899), C - fotografia da ponte simulando uma catarata nuclear moderada, D - fotografia da ponte simulando uma catarata madura com uma acuidade visual de 20/200 (adaptado de Michael F et al; 2006).

Monet referia que as cores não tinham a mesma intensidade e as suas pinturas começaram a ficar cada vez mais escuras e por conta da perda de acuidade visual, passaram a parecer-se com pinturas abstratas.<sup>11</sup>

### **1.1.5 Coroide e vítreo**

A coróide é a secção do trato uveal que se estende do nevo ótico até à ora serrata (ligação entre a retina e o músculo ciliar). A espessura da coróide varia de 0.22 mm no polo posterior, até 0.10 mm próximo da ora serrata. A superfície interior da coróide está firmemente ligada ao epitélio pigmentar da retina, a superfície exterior da coróide está aderida à esclera, na região do nervo ótico e onde as artérias ciliares e os nervos ciliares penetram no globo ocular.<sup>6,12</sup> A coróide é altamente pigmentada, o que faz com que a luz não seja refletida nem dispersada (o epitélio pigmentar da retina também é responsável por este fenómeno), é também um tecido altamente vascularizado, é responsável por nutrir as camadas do globo ocular que contacta (a esclera e a retina).<sup>12</sup>

O humor vítreo ocupa o espaço entre o cristalino e a retina. Representa aproximadamente 2/3 do volume do globo ocular (4 mL). A constituição do humor vítreo é de 98% a 99% de água, e de 1% a 2% colagénio, proteínas solúveis, sais e ácido hialurónico. O humor vítreo está ligado à retina, especialmente na zona da ora serrata e na margem do nervo ótico.<sup>6,12</sup>

As principais funções do vítreo são transmitir luz, suportar a superfície posterior do cristalino e ajudar a manter a retina sensorial ligada ao epitélio pigmentar da retina.<sup>6,12</sup>

Qualquer alteração no humor vítreo resulta numa reação fibroproliferativa, o que pode levar a um descolamento de retina por via tracional.<sup>6,12</sup>

### **1.1.6 Retina**

A retina é a camada sensorial do globo ocular. A camada interna da retina está em contacto com o vítreo e a camada externa está em contacto com a coróide.<sup>12</sup>

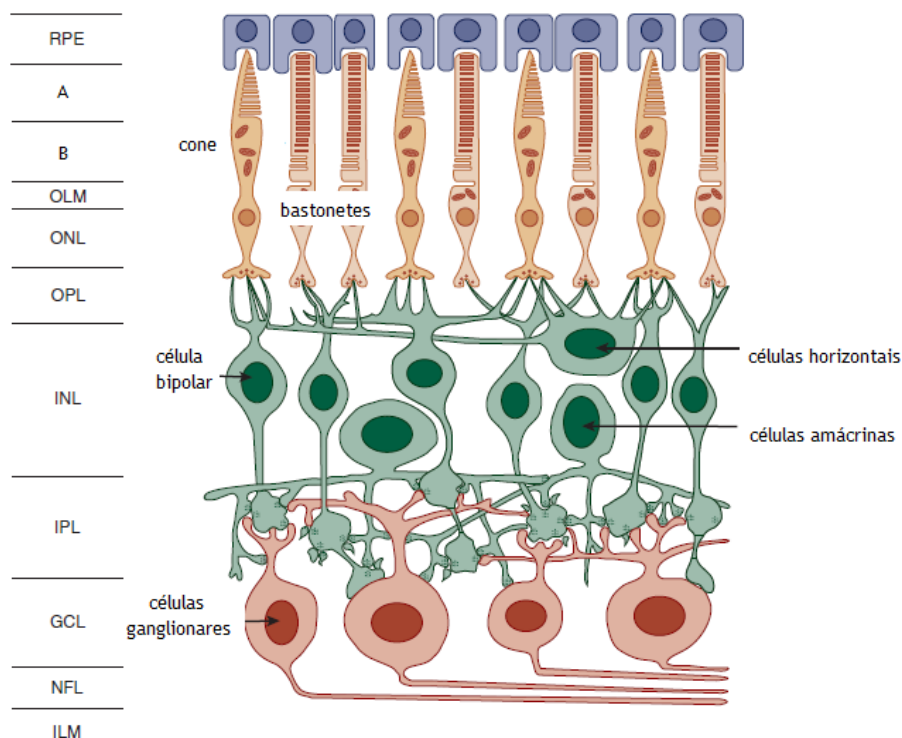
De grosso modo a retina pode ser dividida em duas camadas. A camada mais interior, ou camada sensorial, onde se encontram os elementos neurais e sensoriais da retina (fotorreceptores e células ganglionares). A camada mais externa, o epitélio pigmentar da retina, que consiste numa única camada de células. Estas duas camadas estão apenas firmemente unidas anteriormente na zona da ora serrata e posteriormente na zona do disco ótico.<sup>12</sup>

A macula, o centro da retina, dista cerca de 3,5 mm temporalmente do disco ótico e tem cerca de 5 mm de diâmetro. Nesta zona a retina é também mais fina, a zona central da macula chama-se fovea.<sup>7,12</sup>

Na zona de inserção do nervo ótico, ou disco ótico, não existem fotorreceptores, logo esta zona não é sensível a luz, esta região da retina denomina-se por “mancha cega”. Através da inserção do nervo ótico inserem-se também no globo ocular a artéria e veia centrais da retina.<sup>12</sup>

A retina é nutrida através de duas fontes. Os capilares coroidais nutrem os fotorreceptores (os capilares não entram nos tecidos, são os fluidos que se infiltram nos espaços entre as células) A artéria central da retina fornece os nutrientes às estruturas mais internas da retina.<sup>12</sup>

Microscopicamente, é possível dividir a retina em 10 camadas diferentes, como representado na **Figura 5**, epitélio pigmentar, fotorreceptores, membrana limitante externa, membrana nuclear externa, membrana plexiforme externa, membrana nuclear interna, membrana plexiforme interna, células ganglionares, camada de fibras nervosas e membrana limitante interna.<sup>13</sup>



**Figura 5**-Representação das várias camadas da retina. RPE-epitélio pigmentar, A e B- fotorreceptores, OLM- membrana limitante externa, ONL- membrana nuclear externa, OPL- membrana plexiforme externa, INL- membrana nuclear interna, IPL- membrana plexiforme interna, GCL- células ganglionares, NFL- camada de fibras nervosas e ILM- membrana limitante interna. (adaptado de Newell F. Oftalmologia - Fundamentos e conceitos).

Os fotorreceptores são muito pequenos, tendo cerca de 0,002 mm de diâmetro, e com um comprimento de cerca de 0,04 mm. Estes organizam-se paralelamente uns aos outros e na direção da pupila, para que a luz percorra o comprimento dos fotorreceptores. Estes estão ligados a uma malha muito complexa de fibras nervosas. Tem como função transformar o estímulo luminoso num sinal elétrico, através da fototransdução.<sup>14</sup>

Existem dois tipos de fotorreceptores: os cones e os bastonetes. Tem estes nomes devido a sua forma.<sup>14</sup> A representação dos dois tipos de fotorreceptores (cones e bastonetes) encontra-se na **Figura 6**



**Figura 6**-Representação dos dois tipos de fotorreceptores, à esquerda um bastonete, à direita um cone (adaptado de Schnapf J;1987).

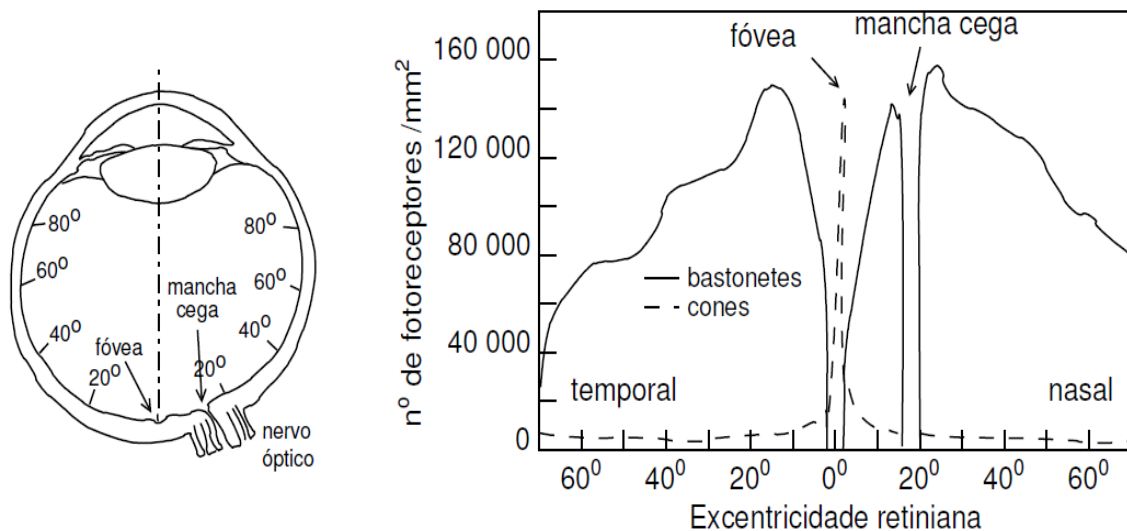
Os bastonetes têm uma forma cilíndrica e são usados em condições de baixa iluminação. Em condições de iluminação normal os bastonetes saturam. Estes apenas fornecem uma visão monocromática pois apenas existe um tipo de bastonetes.<sup>14</sup>

Os cones, tem o formato de um cone. É através destes fotorreceptores que nos é possível ter perceção de cor. Os cones são estimulados em situações de iluminação normais (por exemplo, luz do dia). São os cones que nos permitem ter uma boa acuidade visual. A macula é a zona da retina com maior densidade de cones.<sup>14</sup>

A distribuição dos fotorreceptores vai variando ao longo da camada retiniana, como representado na **Figura 7**: na fóvea existem apenas cones. À medida que nos afastamos da fóvea

a concentração de cones vai diminuindo, conseqüentemente aumentando a quantidade de bastonetes.<sup>14</sup>

A maneira como os fotorreceptores se ligam com as fibras nervosas varia: na foveola (centro da fóvea) cada cone está ligado a uma fibra ganglionar, na periferia cada fibra nervosa pode fazer ligação com varias dezenas de fotorreceptores.<sup>14</sup>



**Figura 7**-Representação da concentração dos vários tipos de fotorreceptores nas várias zonas da retina. (adaptado de Wandell B;1995).

## 1.2 Percepção Visual

É através da percepção visual que temos a sensação visual do meio que nos envolve diretamente.<sup>4</sup>

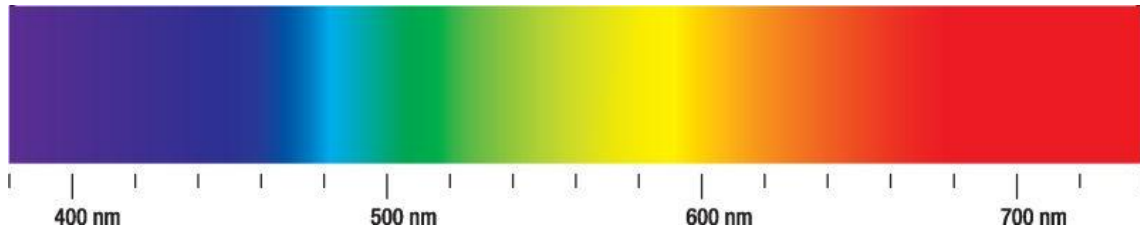
## 1.3 Visão das Cores

Foi estimado que o número total de cores que podem ser discriminadas é cerca de 2,3 milhões ,esse número corresponde a um volume de cerca de 30% do máximo teórico, conseguido utilizando apenas fontes de luz monocromáticas.<sup>15,16</sup>

A visão das cores tem três componentes básicos: fonte de luz, objeto iluminado observado e o observador.<sup>14</sup>

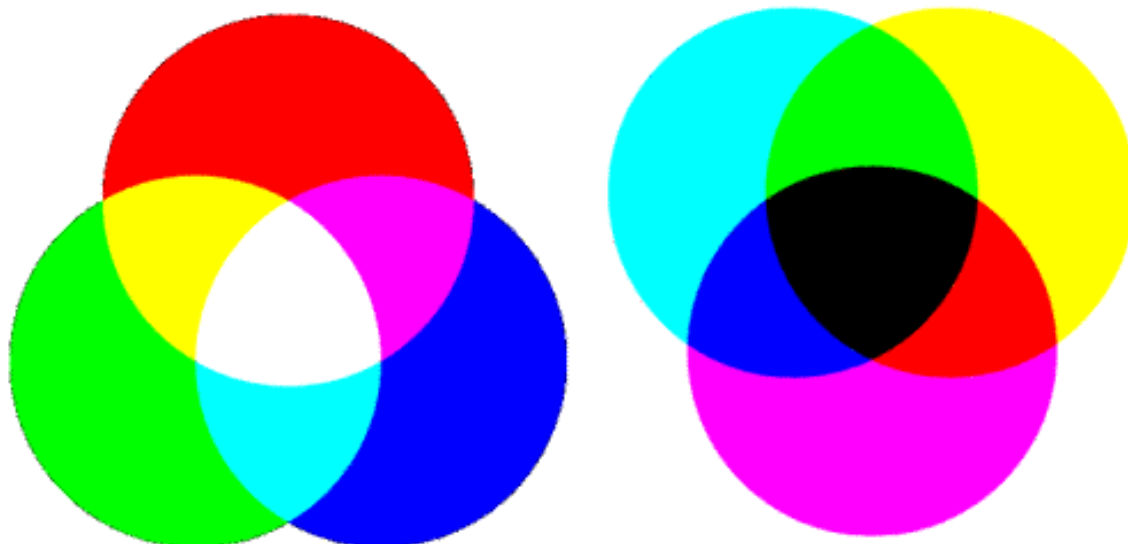
A luz é uma forma de radiação eletromagnética (como por exemplo a radiação de raios X, infravermelho, ultravioleta e ondas radio). Dependendo do comprimento de onda desta radiação é percebida como cor. A radiação electro magnética visível pelo ser humano encontra-se aproximadamente entre os 380 e os 780 nm. Os intervalos de comprimento de onda que originam a percepção das várias cores são (aproximadamente): 380-450 nm corresponde ao violeta; 450-

490 nm corresponde ao azul; 500-575 nm corresponde ao verde; 575-590 nm corresponde ao amarelo; 590-620 nm corresponde ao laranja; 620-780 nm corresponde ao vermelho.<sup>14</sup> A **Figura 8** mostra a representação do espectro eletromagnético da radiação visível, associando os intervalos de comprimentos de onda com as várias cores.



**Figura 8**-Representação do espectro eletromagnético na zona visível. (adaptado de Hunt RW; 2011)

Existem dois métodos de produzir estímulos de cor: aditivo ou subtrativo, com representado na **Figura 9**. Quando se mistura luz utiliza-se o método aditivo, enquanto que quando se misturam tintas utilizamos o método subtrativo (mas também é utilizado na refletância e transmitância da luz, por exemplo, um objeto vermelho absorve toda a luz exceto a vermelha). O método aditivo mistura o espectro de várias fontes de luz formando assim novas cores (por exemplo nos ecrãs de TV em que existem várias, pequenas, fontes de cor vermelho, azul e verde e que dependendo da intensidade de cada fonte de luz a percepção de cor do observador muda). O método subtrativo acontece quando a tinta acrescentada remove uma parte do espectro visível, alterando assim a percepção de cor do observador. No método aditivo ao adicionar todas as cores obtemos branco enquanto que no método subtrativo obtemos preto. As cores primarias aditivas são o vermelho, o verde e o azul e as secundárias o amarelo, magenta e azul ciano. As cores primarias subtrativas são o amarelo, o magenta e o azul ciano e as secundarias são azul, o verde o vermelho.<sup>17</sup>



**Figura 9** Representação dos métodos de mistura de cores, à esquerda o método aditivo e à direita o método subtrativo.  
(adaptada de <http://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1096&sid=9>, Junho de 2019).

## 1.4 Iluminantes CIE

Para descrever as características colorimétricas de um material é necessário ilumina-lo, por este facto a CIE padronizou alguns iluminantes.<sup>17</sup>

Existem vários tipos de iluminantes padronizados: o iluminante padrão CIE A e CIE D65, e alguns iluminantes secundários. A materialização prática de iluminantes CIE é chamada de fonte de luz. Por vezes não é possível reproduzir com precisão um iluminante, neste caso é chamado de simulador.<sup>17</sup>

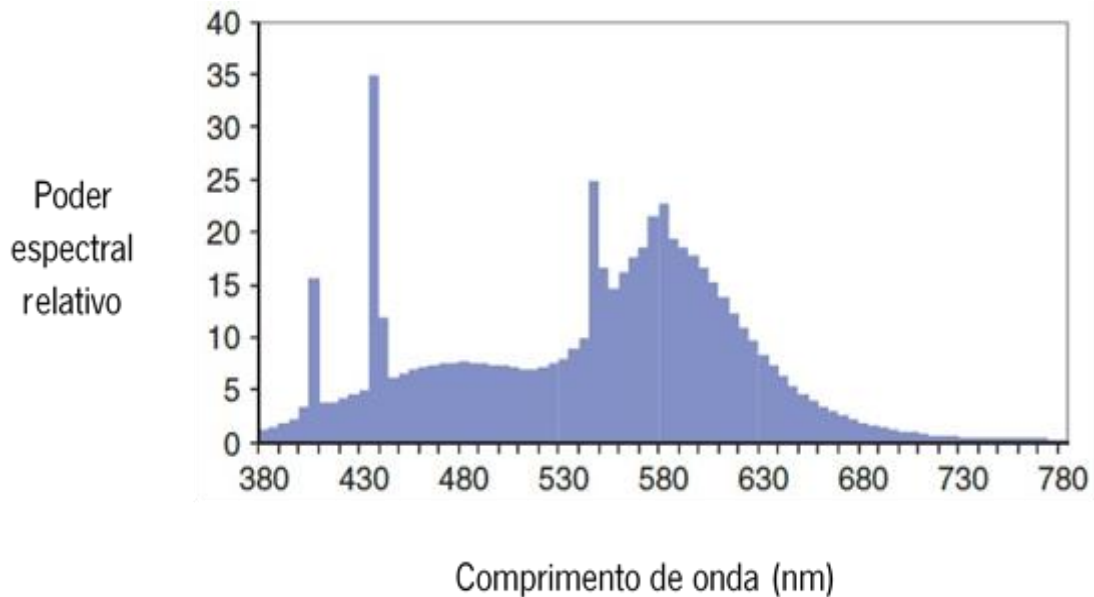
Em 1931, a CIE decidiu introduzir três iluminante padrão, denominados iluminantes A, B e C. Eles foram escolhidos de tal forma que o iluminante A deve se assemelhar a uma luz incandescente média, o iluminante B à luz solar direta e o iluminante C à luz solar média. Em 1964 a CIE recomendou novos iluminantes relacionados à luz solar em que a distribuição espectral é definida na zona ultravioleta do espectro. O iluminante D65 representa uma fase do dia que é considerada a mais representativa da luz do dia. É também útil denominar um iluminante teórico para efeitos de facilidade de comunicação, o iluminante E. O iluminante E tem a mesma distribuição espectral independente do comprimento de onda.<sup>17</sup>

### 1.4.1 Lâmpadas fluorescentes

As lâmpadas florescentes são muito utilizadas globalmente. Estas lâmpadas consistem num tubo de gás que contem mercúrio a baixa pressão. O interior do tubo é revestido com fosfatos.

Ao fazer a descarga elétrica o mercúrio emite luz UV que excita o fosfato que ao retornar ao estado de não excitado emite energia na região do visível, produzindo assim luz visível. Existe uma ampla gama de lâmpadas fluorescentes, estas lâmpadas variam devido ao fosfato utilizado. Tipicamente as lâmpadas fluorescentes variam num intervalo de eficiência entre 45 l m/W a 95 lm/W.<sup>14</sup>

A **Figura 10** apresenta a distribuição espectral de uma lâmpada fluorescente típica para os vários comprimentos de onda.



**Figura 10**-Distribuição do poder espectral relativo de uma lâmpada fluorescente. O poder espectral relativo está representado num histograma com barras de 5nm de largura. (adaptado de Hunt RW; 2011)

#### 1.4.2 Lâmpadas incandescentes

As lâmpadas incandescentes são lâmpadas que possuem um filamento, normalmente de tungstênio, que é aquecido através da corrente elétrica até ao ponto de ficar incandescente e dessa forma emitir luz na região do visível.<sup>14</sup> Este tipo de lâmpadas já não se fabricam e tem uma comercialização limitada.

Tipicamente as lâmpadas com filamento de tungstênio tem uma eficiência de 25 lm/W, para lâmpadas com temperatura de 3200 K e 10 lm/W a temperaturas de 2650 K.<sup>14</sup>

Nas fontes de luz incandescente, a temperatura é o principal fator para determinar a magnitude e a composição espectral da luz que estas irradiam .<sup>14</sup>



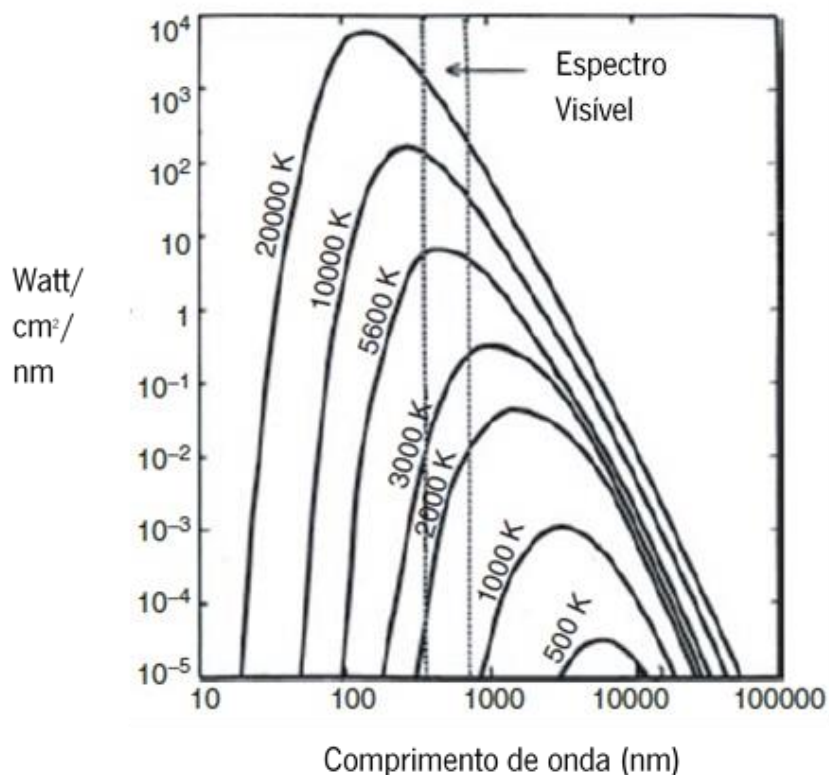
Max Planck, desenvolveu uma equação matemática para derivar a potência irradiada em cada comprimento de onda a partir de um conhecimento da temperatura de um corpo negro.<sup>14</sup>

$$M_e = \frac{c_1}{\lambda} \left( \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \right)$$

**Equação 1-** equação desenvolvida por Max Planck para derivar a potência irradiada em cada comprimento de onda a partir da temperatura de um corpo negro.

Onde  $M_e$  é a concentração espectral do radiante (W/m),  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros, T a temperatura em Kelvin,  $c_1 = 3.74183 \times 10^{-16}$  W/m<sup>2</sup>,  $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2}$  mK e  $e = 2.718282$ .

A unidade utilizada para temperatura em irradiantes de Planck é o Kelvin.<sup>14</sup> Na **Figura 11** encontra-se a distribuição espectral de vários irradiantes de Planck com temperaturas de cor diferentes.



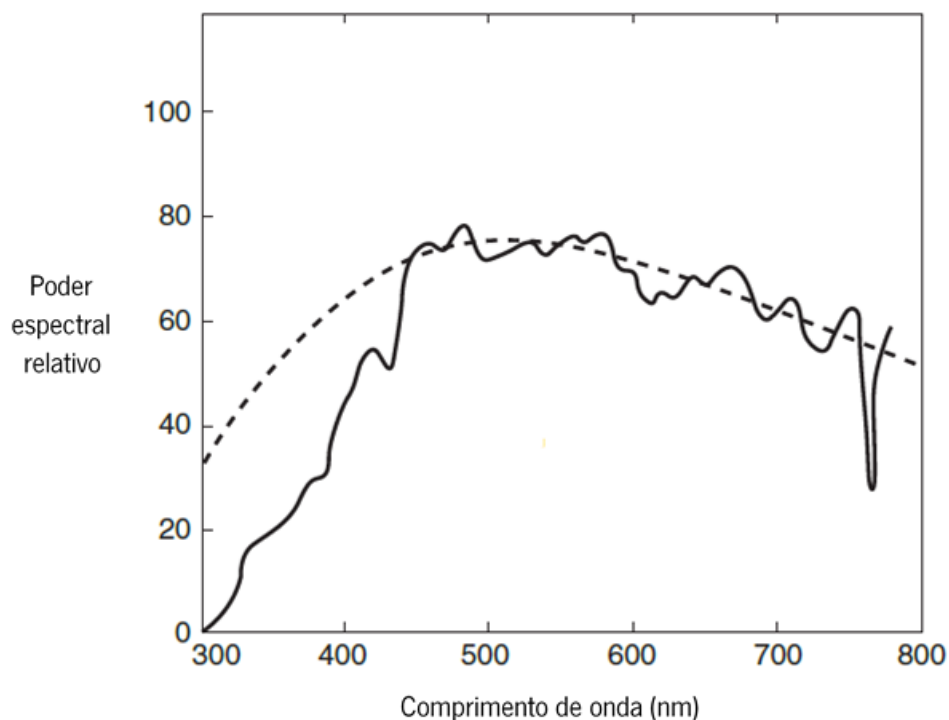
**Figura 11-**Distribuição do poder espectral de irradiantes de Planck em diferentes temperaturas (adaptado de Hunt RW; 2011).

Assim, consegue-se caracterizar uma fonte de luz que tenha a distribuição espectral definida pelo irradiante de Planck pela temperatura desse irradiante. Descreve-se a distribuição

espectral pela temperatura de cor. Quando apenas se consegue uma distribuição espectral que sendo diferente da irradiada pelo irradiador de Planck mas que produz uma cor muito parecida, descrevemos essa distribuição espectral pela temperatura correlacionada de cor.

### 1.4.3 Luz do dia

O sol tem uma temperatura de cor correlacionada de 6500K na superfície, ao atravessar a atmosfera esta passa para os 5500K, e baixa ainda mais quando o sol está perto do horizonte. A distribuição espectral da luz do dia, que chega à superfície terrestre, esta descrita na **Figura 12**.<sup>14</sup>



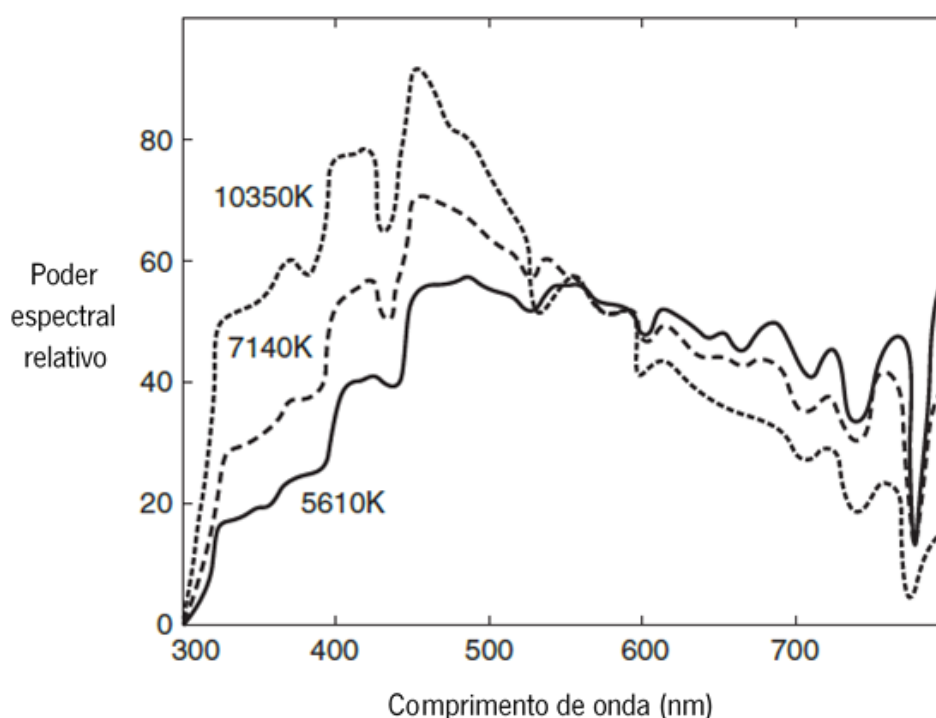
**Figura 12**-Poder espectral relativo da luz do dia (curva a cheio) e de um irradiante de Planck de temperatura de 5630K (adaptado de Hunt RW; 2011).

Quando o céu esta limpo, 90% da iluminação vem diretamente do sol, 10 % vem do céu. Como o céu é normalmente azul, isto faz com que a luz do dia fique uma pouco mais azul. Este fenómeno faz com a temperatura de cor correlacionada da luz do sol aumente um pouco.<sup>14</sup>

Quando o céu esta totalmente nublado a luz do sol é difundida nas nuvens, isto faz com que a luz seja mais uniforme.<sup>14</sup>

Em situações em que o clima está entre limpo e nublado a luz do dia varia a sua distribuição espectral consideravelmente. Este fenómeno depende da altitude do sol e das condições atmosféricas.<sup>14</sup>

A **Figura 13** mostra o poder espectral relativo de três exemplos da luz do dia onde se pode ver que a forma das curvas se mantem parecida, mas a inclinação das curvas varia.<sup>14</sup>



**Figura 13**-Poder espectral relativo de três exemplos de luz do dia, com temperaturas correlacionadas de cor de 5610, 7140 e 10350 K (adaptado de Hunt RW; 2011).

De um ponto de vista colorimétrico, a luz do dia apresenta três problemas: distribuição espectral complicada, varia muito dependendo do estado do clima e chega a uma temperatura correlacionada de cor mais alta do que a luz artificial.<sup>14</sup>

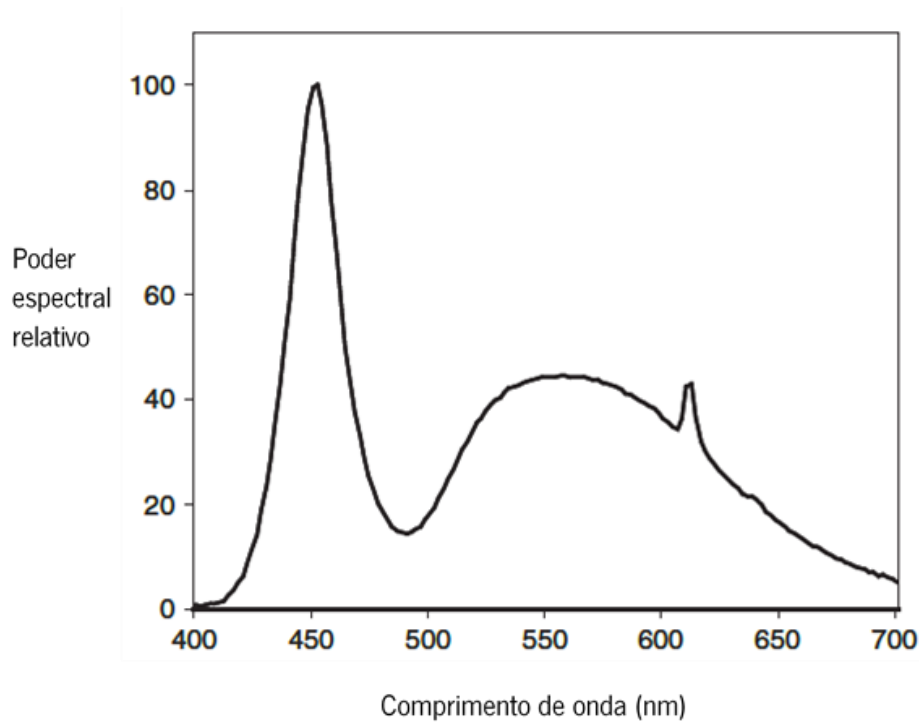
#### 1.4.4 Diodos Emissores de luz (LED)

Os díodos emissores de luz (do inglês Light Emitting Diodes- LED) são semicondutores que conseguem emitir uma radiação incoerente de banda estreita.<sup>14</sup>

A maior parte dos LEDs emitem em bandas de cerca 40 nm de largura. Os LEDs que imitem luz branca são feitos a partir de uma combinação de LEDs azuis, verdes e azuis.<sup>14</sup>

A principal vantagem dos LEDs em relação a outras fontes de luz é a sua alta eficiência, em termos de luz emitida por energia consumida.<sup>14</sup>

Na **Figura 14** está representada a distribuição espectral de um LED branco composto por um LED azul e um fosfato.



**Figura 14**-Distribuição do poder espectral relativo de um LED branco, composto por um LED emissor de luz azul e um fosfato. Temperatura de cor correlacionada de 6500 K (adaptado de Hunt RW; 2011).

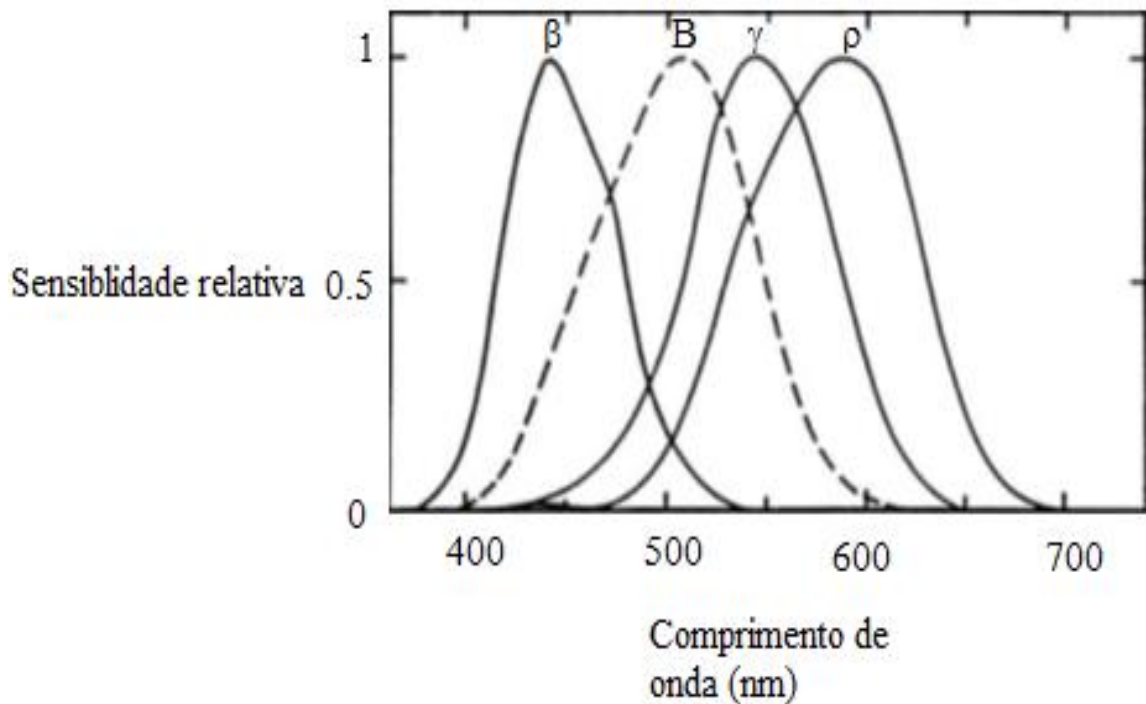
### 1.5 Fotorreceptores e visão das cores

Os cones e os bastonetes não são igualmente sensíveis aos vários comprimentos de onda da luz.<sup>14</sup>

A rodopsina (pigmento fotossensível presente nos bastonetes) absorve a parte azul-verde do espectro visível, em condições de iluminação escotópica (condições de baixa iluminação, inferiores a 0,25 cd/m<sup>2</sup>).<sup>14</sup>

Relativamente aos cones existem três tipos de cones que são sensíveis em diferentes zonas do espectro visível. Para distinguir os três tipos de cones foram lhes atribuídas uma nomenclatura (S,M e L). Os cones do tipo L (de Long) tem uma sensibilidade máxima na zona laranja-amarelo do espectro, os cones do tipo M (de Medium) na zona verde do espectro e os cones do tipo S (de Short) na zona azul-violeta do espectro. Os cones atuam principalmente em condições fotópicas (condições fotópicas são condições de iluminação moderada e alta).<sup>14</sup>

A sensibilidade relativa tanto dos cones com dos bastonetes pode ser representada por curvas de sensibilidade, **Figura 15**.<sup>14</sup>



**Figura 15**-Curvas de sensibilidade de bastonetes (linha tracejada) e cones (linhas compactas) em condições fotópicas.  $\beta$ -curva de sensibilidade dos cones S;  $\gamma$ -curva de sensibilidade dos cones M,  $\rho$ -curva de sensibilidade dos cones L, estas curvas estão normalizadas para um máximo de 1 (adaptado de Hunt RW; 2011).

### 1.5.1 Anomalias na visão das cores

Existem observadores que tem a percepção da visão das cores alterada. Estes observadores são denominados de dicromatas, monocromatas e tricromatas anómalos, dependendo do tipo de anomalia da visão das cores que possuem.<sup>14</sup>

Protanopia, os observadores com esta condição não discriminam cores avermelhadas e esverdeadas, com os tons avermelhados a parecerem mais escuros que o normal. Estes observadores são dicromatas pois não possuem os cones L.<sup>14</sup>

Deuteranopia, os observadores com esta condição não discriminam cores avermelhadas e esverdeadas, sem que nenhuma das cores pareçam mais escuras do que o normal. Estes observadores são dicromatas pois não possuem os cones M.<sup>14</sup>

Tritanopia, os observadores com esta condição não discriminam cores azuladas e amareladas, sem que nenhuma das cores pareçam mais escuras do que o normal. Estes observadores são dicromatas pois não possuem os cones S).<sup>14</sup>

Observadores monocromatas de cones não discriminam cores, mas o brilho das cores aparentemente é normal (falta de cones M e S), ou não discriminam cores e o brilho é confinado apenas para a zona azul do espectro (falta de cones L e M).<sup>14</sup>

Monocromatas de bastonetes não discriminam cores e apenas o brilho típico de visão escotópica. Estes observadores apenas conseguem ver em condições de muito baixa iluminação (condições de iluminação escotópica, falta dos três tipos de cones).<sup>14</sup>

Protanomalia, alguma redução na discriminação de cores avermelhadas e esverdeadas (cones L tem uma curva de sensibilidade espectral deslocada na direção da curva de sensibilidade dos cones M).<sup>14</sup>

Deuteranomalia, alguma redução na discriminação de cores avermelhadas e esverdeadas (cones M tem uma curva de sensibilidade espectral deslocada na direção da curva de sensibilidade dos cones L).<sup>14</sup>

Tritanomalia, alguma redução na discriminação de cores azuladas e amareladas (cones S tem uma curva de sensibilidade espectral deslocada da posição normal). A classificação de tritanomia é difícil de se fazer pois a diversidade dos observadores normais é muito grande e torna esta distinção difícil de ser efectuada.<sup>14</sup>

A **Figura 16** representa uma simulação da percepção das cores dos indivíduos com anomalias da visão das cores.

A incidência destas anomalias da visão das cores varia muito e é diferente entre homens e mulheres. A

**Tabela 1** abaixo mostra a prevalência estimada das anomalias da visão das cores no mundo ocidental.<sup>14,18</sup>

**Tabela 1**-Distribuição das várias deficiências de visão das cores em raças ocidentais (adaptado de Hunt RW; 2011 e Birch J; 2012).

Tipos	Homens (%)	Mulheres (%)
Protanopia	1.0	0.02
Deuteranopia	1.1	0.01
Tritanopia	0.002	0.001
Monocromatas de cones	Muito raro	Muito raro
Monocromatas de bastonetes	0.003	0.002
Protanomalia	1.0	0.02
Deteranomalia	4.9	0.38
Tritanomalia	Raro	Raro
Total	8	0.4



**Figura 16**-Simulação da visão dos indivíduos portadores de deficiências de visão das cores. A-normal, B-protanope, C-Tritanope, D-Deuteranope, E-Protanómalo, F-Deuteranómalo. (adaptado de <https://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>; disponível em setembro de 2019).

## 1.6 Colorimetria CIE

A colorimetria CIE teve uma evolução de cerca de 75 anos.<sup>17</sup>

Os padrões da Comissão Internacional de Iluminação (Commission Internationale d'Eclairage - CIE) fornecem as recomendações para a realização adequada de medições experimentais e industriais relacionadas com a cor.

### 1.6.1 Observador colorimétrico Standard CIE

Para que se conseguisse repetir com precisão uma correspondência aditiva de cor foi necessário padronizar condições de observação.<sup>17</sup>

Foi necessário determinar a zona correspondente na retina do objeto correspondente que irá ser medida, visto que a concentração dos vários tipos de cones não é igual em todas as zonas



retinianas. O valor padronizado foi de 2° e 10° em que o meio envolvente ao estímulo deve ser escuro.<sup>17</sup>

A visão das cores mediada pelos 3 tipos de cones pode ser representada recorrendo a 3 variáveis. Por isso foi necessário especificar as cores dos estímulos correspondentes ao vermelho, verde e azul (700,0 nm , 546.1 nm e 435,8 nm, respetivamente), para que haja uma correspondência entre o estímulo monocromático e a mistura dos três estímulos .<sup>17</sup>

### 1.6.2 Funções de Correspondência Cromática

Visto que a mistura de cores aditivas é mais simples, comparado a método subtrativo, as descrições dos resultados das experiências colorimétricas baseiam-se neste método.<sup>17</sup>

Para obter um sistema colorimétrico é necessário especificar tanto a sua composição espectral como as unidades em que são medidos. Então, pode-se descrever uma correspondência com o seguinte formato:

$$[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B]$$

**Equação 2-** equação para determinar a correspondência cromática a partir de três primários.

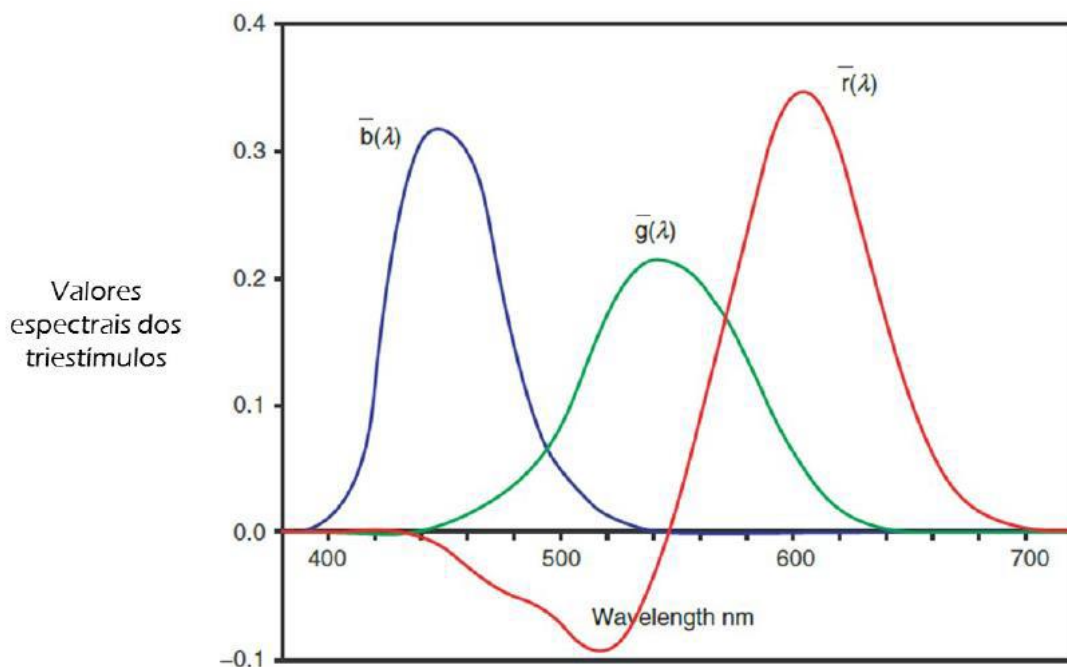
Em que [C] é o estímulo desconhecido, “ $\equiv$ ” lê-se “corresponde” ,[R], [G], [B] são as unidades dos estímulos correspondentes cuja descrição espectral é conhecida e que se chamam de primários e *R*, *G* e *B* representam a quantidade a utilizar expressas nas unidades adotadas dos estímulos correspondentes para chegar a uma correspondência.<sup>17</sup>

A quantidade dos três primários necessários para alcançar a correspondência de cores desejada são denominadas de Funções de Correspondência Cromática e são representadas da seguinte forma  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  e  $\bar{b}(\lambda)$ . Devido à aditividade e multiplicidade do estímulo de cor, para um estímulo de cor não monocromático,  $P(\lambda)$ , as quantidades dos estímulos de correspondência necessários para uma correspondência podem ser determinadas adicionando as quantidades necessárias para combinar com os componentes de cada comprimento de onda do estímulo de teste.

$$[C] = \int_{380nm}^{780nm} \bar{r}(\lambda)P(\lambda)d\lambda [R] + \int_{380nm}^{780nm} \bar{g}(\lambda)P(\lambda)d\lambda [G] + \int_{380nm}^{780nm} \bar{b}(\lambda)P(\lambda)d\lambda [B]$$

**Equação 3**—equação para determinar a correspondência cromática a partir de três primários, para uma distribuição espectral arbitrária.

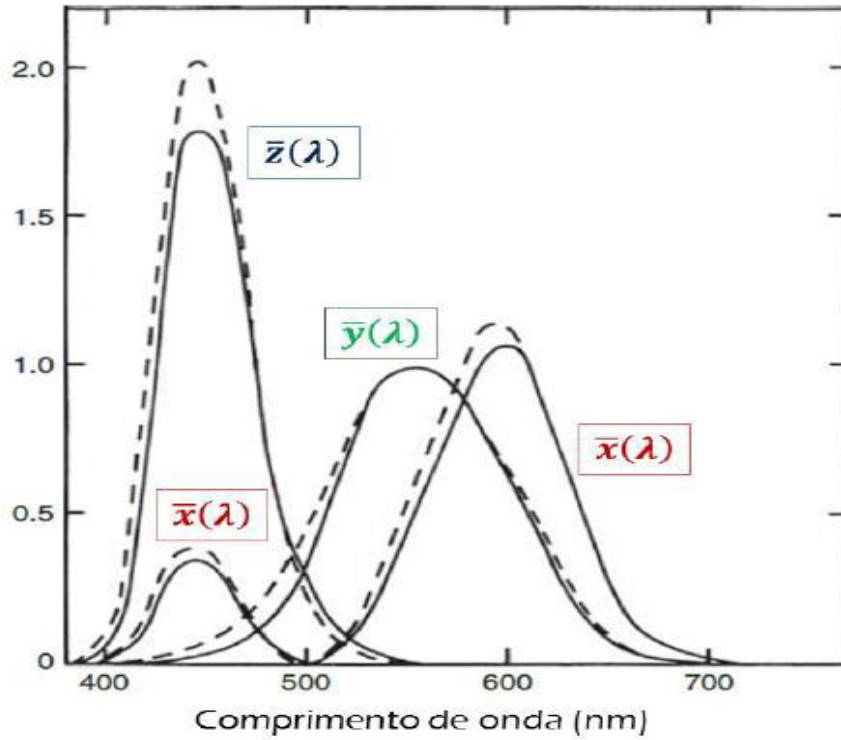
Realizando correspondências de cores usando diferentes combinações de estímulos obtém-se as funções de correspondência cromática, que estão representadas na **Figura 17**. As zonas negativas do gráfico da **Figura 17** referem-se ao fato de que em algumas zonas do espectro uma correspondência só pode ser obtida se um dos estímulos primários for adicionada ao estímulo de teste. <sup>17,14</sup>



**Figura 17** Funções de correspondência cromática para o observador colorimétrico padrão CIE 1931 (adaptado de Hunt RW; 2011).

### 1.6.3 Espaço de cor CIE 1931

Em 1931 a CIE para ultrapassar o obstáculo dos valores negativos das funções de correspondência cromática, decidiu-se tornar os primários reais [R], [G], [B] em primários imaginários [X], [Y], [Z]. Com estes primários imaginários as funções de correspondência cromática não possuem valores negativos e tornam os cálculos bastante mais fáceis, **Figura 18**.<sup>17</sup>



**Figura 18-**X, Y, e Z funções de correspondência cromática para o observador colorimétrico CIE 1931 a 2° (linhas a cheio) e para o observador colorimétrico padrão CIE 1964 a 10° (linhas a tracejado) (adaptado de Hunt RW; 2011).

Os triestímulos CIE-XYZ são definidos pelas seguintes equações:

$$X = k \int_{380nm}^{780nm} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380nm}^{780nm} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{380nm}^{780nm} \phi_{\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

**Equação 4-**equações que definem os triestímulos CIE-XYZ.

$\phi_{\lambda}$  é a radiância. k é 683 lm/W e  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  e  $\bar{z}(\lambda)$  são as funções de correspondência cromática do observador padrão CIE.<sup>17</sup>

Os triestímulos podem ser representadas por coordenadas cromáticas num diagrama cromático. As equações abaixo indicam como obter estas coordenadas cromáticas.

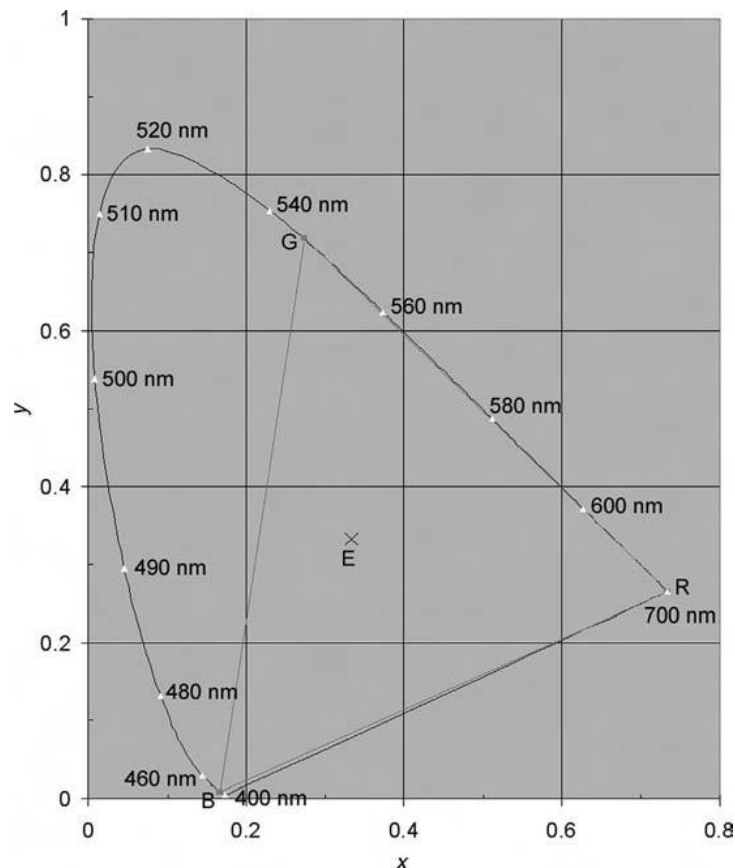
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

**Equação 5**-equações que definem as coordenadas cromáticas  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

É possível contruir um diagrama cromático em duas dimensões uma vez que  $x + y + z = 1$ . A **Figura 19** representa este diagrama.<sup>17</sup>



**Figura 19**-Representação do diagrama cromático  $x, y$  do sistema CIE 1931. O triângulo representado refere-se aos primários R, G, B, usado para definir o sistema tricromático CIE. O "E" é a localização das coordenadas do iluminante de equi-energia (adaptado de Hunt RW; 2011).

A curva representa os estímulos monocromáticos. As cores que se encontram dentro da curva são policromáticas, obtidas pela mistura aditiva de duas ou mais cores monocromáticas. O

ponto E tem coordenadas cromáticas  $x=y=0.33$  e representa o branco. Todas as cores detetáveis pelo olho humano estão representadas no interior e no contorno da curva. Se traçarmos uma linha entre dois pontos que representem estímulos monocromáticos (todos os pontos que fazem parte da linha da curva são estímulos monocromáticos), todas as cores resultantes da adição destas estarão nessa linha, dependendo das quantidades relativas de cada ponto.<sup>14,17,19</sup>

#### 1.6.4 Espaço de cor CIE 1964

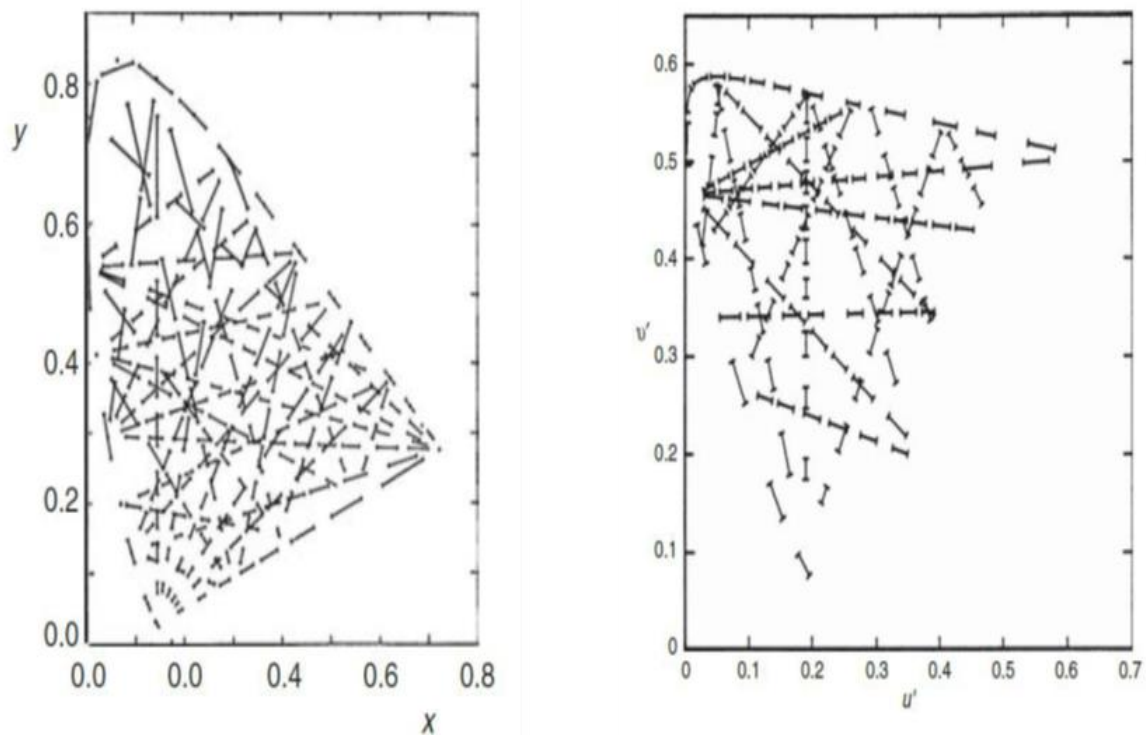
No comité de 1959 CIE W-1.3.1 foi recomendado a adoção de um observador colorimétrico de 10° de angulo visual, em detrimento dos 2° de angulo visual. Esta alteração foi baseada em alguns trabalhos realizados por Stiles, Burch e Speranskaya.<sup>20,21</sup> Estas novas funções (funções de correspondência cromática) definem o observador padronizado do sistema colorimétrico de 1964. Este sistema distingue-se do anterior por apresentar nas funções de correspondência cromática um 10 subscrito.<sup>17</sup>

Verificou-se que este sistema é mais preciso que o CIE 1931, pois foi determinado com um maior número de sujeitos. Mas visto que a área do estímulo é maior (10°) os valores de luminância e as distribuições espectrais relativas ao estímulo tem de ser bem definidos e suficientemente intensos, de forma a que não haja interferência dos bastonetes.<sup>17</sup>

#### 1.6.5 Espaço de cor CIE 1976 (UCS)

A distribuição de cores no espaço CIE 1931 não é uniforme. Para tentar compensar esta falta de uniformidade foi proposto um espaço mais uniforme. Como podemos ver na **Figura 20**, cada par de pontos corresponde a duas cores distintas, com diferenças percetuais iguais e com a mesma magnitude em termos percetuais. Idealmente estas diferenças de cor deveriam estar representadas em espaços físicos iguais.<sup>14</sup>

O diagrama de escala uniforme (USC- Uniform Color Space) é recomendável quando queremos um espaço de cor percetivamente mais uniforme que o diagrama  $(x,y)$ . Este espaço é mais uniforme pois a variação do tamanho dos segmentos de reta, foi reduzida.<sup>14</sup>



**Figura 20**-Diagrama cromático CIE 1931  $x, y$  (imagem esquerda) e diagrama cromático CIE 1976  $u', v'$  (imagem direita). Cada segmento de reta representa diferenças perceptuais iguais (adaptado de Hunt RW; 2011).

As equações de como obter as coordenadas cromáticas CIE 1976 UCS a partir dos valores triestímulos ou das coordenadas cromáticas CIE 1931, são:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

**Equação 6**-equações de como obter as coordenadas cromáticas CIE 1976 UCS a partir dos valores triestímulos ou das coordenadas cromáticas CIE 1931.

O diagrama UCS é mais usado para descrever a cromaticidade de uma fonte de luz (embora as recomendações da CIE seja explicitamente cores de objetos) e definir a diferença de cromaticidade admissível entre uma fonte de referência e uma fonte de teste.

Havendo necessidade de representar as coordenadas cromáticas num espaço tridimensional para incluir simultaneamente a representação cromática e a sua intensidade

luminosa, a CIE fez esta extensão desenhando um espaço de cor denominado por CIE 1964 Uniform Color Space, com as coordenadas  $U$ ,  $V$  e  $W$ . Embora aceite, este espaço de cores foi logo superado por duas novas recomendações: CIELAB e CIELUV. Ambos os espaços podem ser usados com o observador colorimétrico padrão CIE 1931 caso as amostras sejam aplicadas para um ângulo visual entre  $1^\circ$  e  $4^\circ$ .

### 1.6.6 Espaço de cor CIELAB, CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ )

O espaço de cor CIELAB é definido pelas seguintes equações em que  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  são as coordenadas cromáticas deste espaço, onde  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são os valores dos triestímulos de cor e  $X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  são os valores triestímulos de branco de referencia utilizado com  $Y_n$  igual a 100.<sup>17</sup>

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

Onde:

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ se } \left(\frac{X}{X_n}\right) > \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{16}{116} \text{ se } \left(\frac{X}{X_n}\right) \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ se } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{16}{116} \text{ se } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

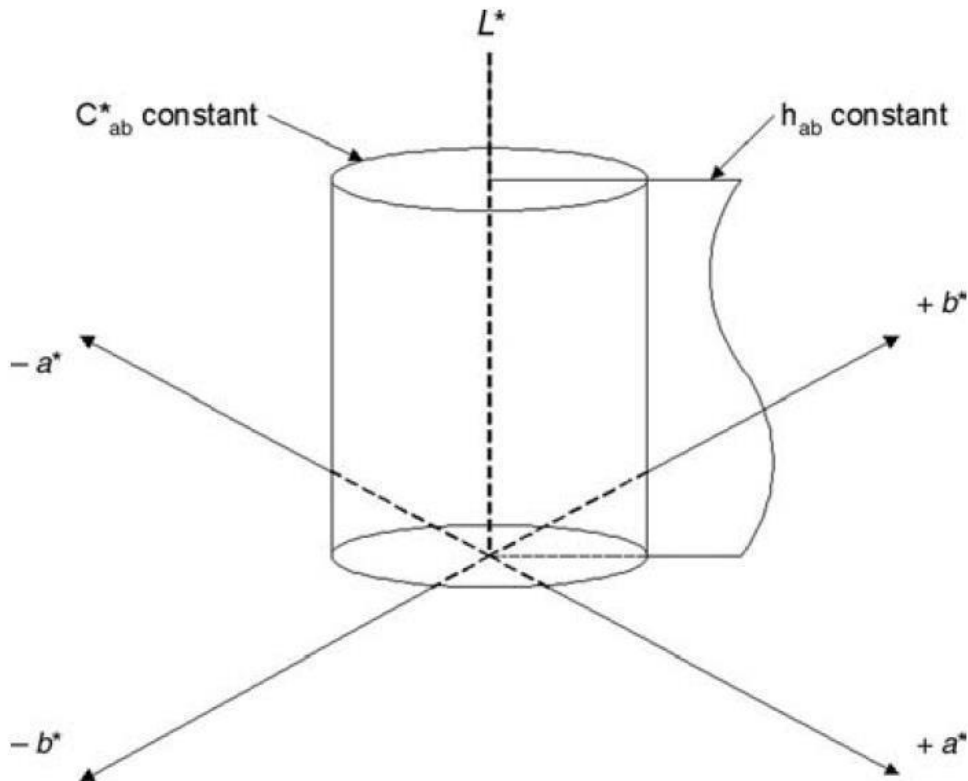
$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ se } \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{16}{116} \text{ se } \left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$$

**Equação 7**-equações que definem o espaço de cor CIELAB.

A **Figura 21** representa o espaço CEILAB em que o eixo  $a^*$  positivo aponta na direção dos estímulos de cor vermelha, o eixo  $a^*$  negativo aponta na direção dos estímulos verdes; o eixo  $b^*$  positivo aproxima-se da direção dos estímulos amarelos e  $b^*$  negativo aproxima-se na direção do

estímulo azul.  $L^*$  é acoplado à intensidade de luminância do estímulo. A saturação,  $C_{ab}^*$ , e a tonalidade,  $h_{ab}$ , são representações das coordenadas cromáticas em coordenadas polares.



**Figura 21**-Representação das três dimensões do espaço CIELAB mostrando um cilindro de saturação constante ( $C_{ab}^*$ ) e tonalidade variável e um plano de ângulo de tonalidade constante ( $h_{ab}$ ) mas saturação variável (adaptado de Schanda J; 2007).

## 1.7 Teste de diagnóstico /rastreo de anomalias da visão das cores

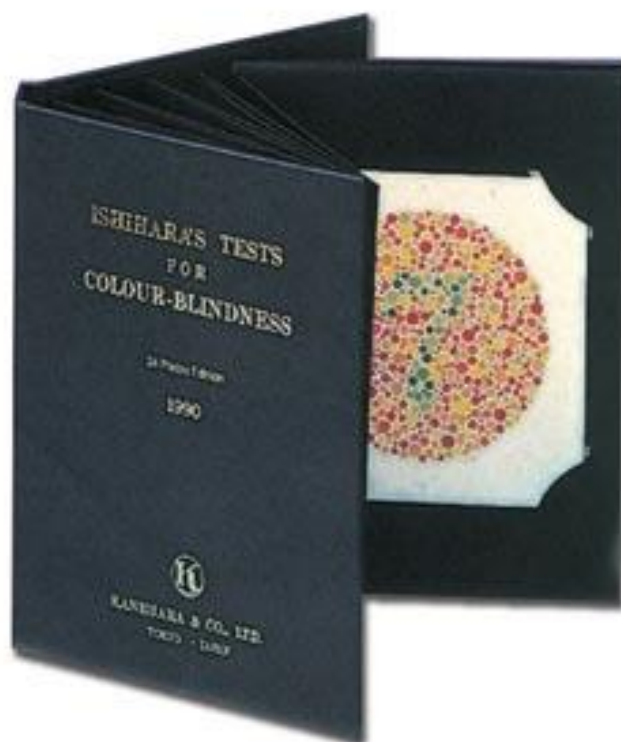
### 1.7.1 Teste de Ishihara

O teste de Ishihara foi pela primeira vez publicado em 1906. É o teste de visão das cores mais usado no mundo. É muito usado pois tem uma sensibilidade e especificidade relativamente altas, 93% e 98% respectivamente. Cada patela do teste de Ishihara é composta por padrões de pontos de vários tamanhos, cores e intensidades luminosas que no seu conjunto formam números ou caminhos. Existem versões de 14, 24 e 38 patelas.

É constituído por uma patela de demonstração (nº 1), patelas de transformação (nº 2 a 9), esbatimento (nº 10 a 17), ocultação (nº 18 a 21) e de diagnóstico (nº 22 a 25). A patela número 1 é de controlo, em que todos os sujeitos conseguem identificar o número independentemente da deficiência de visão das cores. As patelas 2 a 15 são de rastreo e servem para determinar se existe alguma deficiência na visão das cores, não identificando o tipo de deficiência. As patelas 16



a 19 servem para identificar o tipo de deficiência existente, pois são patelas constituídas por dois números em que, dependendo da anomalia e da sua severidade, o sujeito identifica com mais clareza um dos números. Este teste pode ser usado em crianças ou adultos analfabetos pois, o sujeito mesmo não conhecendo números pode seguir com um pincel por cima dos caminhos, ou mesmo dos números.<sup>22,23,24</sup> A **Figura 22** ilustra o teste de Ishihara.



**Figura 22**-Imagem do teste de visão das cores de Ishihara (adaptado de <https://www.doctorshop.pt/Prodotti/ishihara-teste-de-cor-livro-de-10-placas-com-numeros-103763>; Junho de 2019).

O teste de Ishihara é utilizada para detetar deficiências congénitas na zona do vermelho/verde. Uma das limitações deste teste é que não deteta deficiências na zona azul-amarelo do espectro.<sup>23,25</sup>

As patelas do teste de Ishihara devem ser mostradas a 75 cm do observador e na melhor inclinação para que fique no melhor angulo em relação à linha de visão. As patelas 1 a 19 são patelas numerárias e o tempo máximo de resposta por patela não deve ultrapassar os 3 segundos. Se o observador for incapaz de ler números, aplicam-se as patelas 20 a 31 onde o observador deve percorrer o caminho colorido com um pequeno pincel. Para este tipo de patelas o tempo de resposta não deve ultrapassar os 10 segundos. O teste de Ishihara requer uma fonte de luz

especifica durante a sua execução (deverá ser o mais próximo possível da luz do dia, usualmente o iluminante CIE D65).<sup>23,24</sup>

### 1.7.2 Teste HRR

O teste Richmond Hardy–Rand–Rittler foi produzido pela primeira vez em 1954. Este teste avalia os três tipos de deficiências na visão das cores (deutan, protan e tritan). A sensibilidade e a especificidade deste teste são de 100% e 96% respectivamente.<sup>23,26</sup>

Cada patela ou folha é formada por vários pontos de diferentes tamanhos, cores e intensidade luminosas. Os vários conjuntos de pontos formam figuras. A versão mais recente (4ª edição) deste teste é composta por 24 patelas, compostas por 1 ou 2 símbolos (cruz, círculo ou triângulo). O paciente deve reportar qual o símbolo e qual a sua posição na patela, com um intervalo de 3 segundos entre cada pergunta. Este teste classifica o tipo de deficiência da visão das cores e a sua intensidade em severa, média e suave.<sup>23</sup>

O teste HRR é formado por quatro patelas de demonstração (patela nº 1 a 4), sete patelas de triagem (patela nº 5 a 10), e catorze patelas de diagnóstico (patela nº 11 a 24). As patelas 5 e 6 testam se o sujeito tem alterações na zona azul-amarelo (caso o paciente erre nas patelas 5 ou 6 deve-se mostrar em seguida as patelas 21 a 24 para testar a severidade do problema); as patelas 7 a 10 testam se o sujeito tem alterações na zona vermelho/verde (caso o paciente erre nas patelas 7 a 10 deve-se mostrar em seguida as patelas 11 a 20 para testar a severidade do problema). Caso o sujeito erre nas patelas 7 a 10 e depois erre nas patelas 11 a 15 a deficiência será na zona do vermelho-verde suave; caso erre nas patelas 7 a 10 e em seguida nas 16 a 18 a deficiência será na zona do vermelho-verde média; caso o sujeito erre nas patelas 7 a 10 e posteriormente nas patelas 19 a 20 a deficiência será na zona do vermelho-verde severa. Caso o sujeito erre nas patelas 5 ou 6 e em seguida não haja erros nas patelas 21 a 24 a deficiência será na zona do azul-amarelo suave; caso o sujeito erre nas patelas 5 ou 6 e em seguida nas patelas 21 ou 22 a deficiência será na zona do azul-amarelo média, caso o sujeito erre nas patelas 5 ou 6 e posteriormente nas patelas 23 ou 24 a deficiência será na zona do azul/amarelo severa (descrição retirada das próprias instruções do teste Richmond Hardy–Rand–Rittler, 4ª edição).

Durante a execução deste teste é recomendado o uso do iluminante CIE C a 6.800 K e as patelas devem estar a uma distância de cerca de 75 cm do observador.<sup>26</sup>

### 1.7.3 Teste de 100 Tonalidades Farnsworth-Munsell

O teste das 100 Tonalidades de Farnsworth-Munsell, representado na **Figura 23**, foi desenvolvido por Farnsworth no início da década de 1940. Este teste tem uma sensibilidade de 100% e uma especificidade de 83%. Neste teste são utilizados 10 tons (vermelho, amarelo, verde, azul e púrpura, vermelho/amarelo, amarelo/verde, verde/azul, púrpura/azul e vermelho/púrpura). Cada tonalidade é dividida em 10 passos, formando assim 100 tonalidades. No entanto o teste é apenas formado por 85 tonalidades, foram retiradas as restantes 15 tonalidades na tentativa de tornar o espaço de cor mais uniforme.<sup>22 23</sup>

Farnsworth dividiu as 85 tonalidades numeradas consecutivamente em 4 caixas (85 a 21, 22 a 42, 43 a 63 e 64 a 84). Cada caixa tem a primeira e a última tonalidade fixa e as outras são moveis. A tarefa do sujeito que está a ser testado é a de organizar as tonalidades moveis em cada caixa de forma gradual e progressiva entre as tonalidades fixas, orientando-se pelas tonalidades fixas em cada ponta. É atribuída a cada tonalidade um número e a pontuação de erro calculada através das trocas de posição das tonalidades. Normalmente esta pontuação é fornecida através de um programa informático, e os resultados são fornecidos através de um gráfico, como o que está representado na **Figura 24**.<sup>22</sup>

A performance neste teste depende da idade, melhorando com a idade até aos 20 anos e deteriorando-se gradualmente a partir dessa idade. Nos grupos mais velhos estas diferenças são atribuídas ao amarelecimento do cristalino, enquanto que nos grupos mais novos são atribuídas ao desenvolvimento tardio do sistema azul-amarelo. Devido a estas diferenças este teste requer normas relacionadas com a idade do observador. Este teste tem também uma curva de aprendizagem, o que leva a ter cuidado ao analisar os resultados de cada olho. Este teste é muito dependente do tipo e intensidade de iluminação utilizado.<sup>22</sup>

O teste das 100 tonalidades de Farnsworth-Munsell é especialmente usado para avaliar e monitorar deficiências da visão das cores adquiridas e identificar e classificar indivíduos com discriminação da visão das cores anormal.<sup>22</sup>



Figura 23-Imagem de teste de visão das cores 100 Tonalidades de Farnsworth-Munsell (adaptado de colorconfidence.com/products/farnsworth-munsell-100-hue-test; junho de 2019)

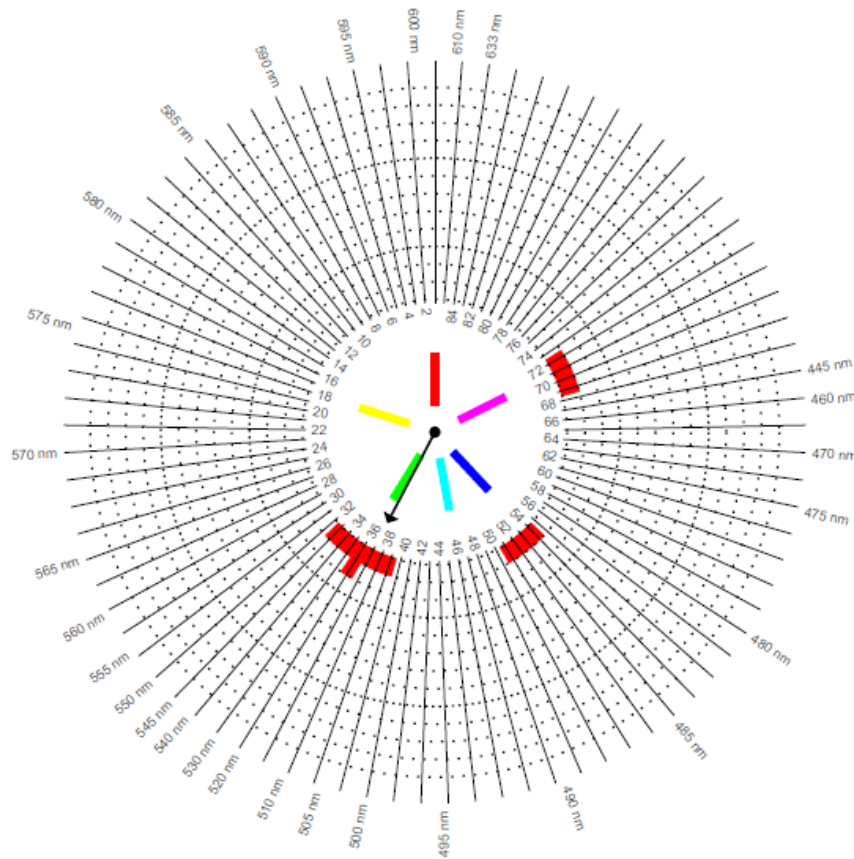


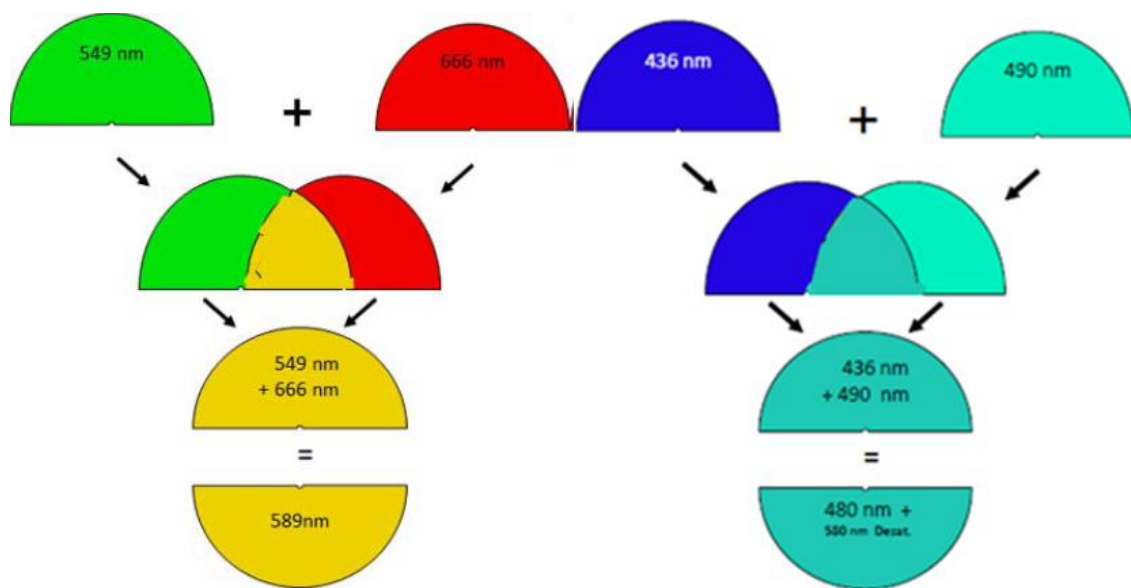
Figura 24-Resultado do teste de visão das cores das 100 Tonalidades de Farnsworth-Munsell de um observador com visão cromática normal. Cada registo a vermelho indica uma troca na ordem das tonalidades, o que se considera normal.

#### 1.7.4 Anomaloscópio

O Anomaloscópio de Nagel utiliza um método através de um prisma de dispersão. É considerado o padrão para a determinação de deficiências da visão das cores deutan e protan. Mas existem dois equipamentos equivalentes o Neitz OT (utiliza um método através de filtros de

interferência) e o Oculus Heidelberg (utiliza um método através de lasers de diodo e filtros de interferência).<sup>22</sup>

São utilizadas combinações de fontes de luz específicas. Para a determinação da deficiências da visão das cores na zona do vermelho/verde utiliza-se a equação de Rayleigh. Nas deficiências da visão das cores do azul/amarelo utiliza-se a equação de Moreland. A **Figura 25** representa graficamente estas equações.<sup>22</sup>



**Figura 25**-Representação das equações de Rayleigh (esquerda) e de Moreland (direita) (adaptado de Instruction Manual HMC-Anomaloskop).

O Anomaloscópio HMC OCULUS utiliza princípios de mistura aditiva de cores. Consiste em observar um círculo dividido em duas partes iguais. A zona superior do círculo corresponde a zona de mistura de cores, a zona inferior corresponde a zona de referência. O sujeito deve, através da alteração do brilho e das intensidades das cores, igualar as duas metades do círculo. Para a realização adequada é necessário respeitar algumas condições: campo de teste com ângulo de 2°, ambiente envolvente escuro e boa focagem da linha preta que separa as duas metades do campo de teste. Esta linha deve desaparecer quando ambos os campos de teste são observados como equivalentes. Os resultados obtidos são representados através de um diagrama de Pitt (Rayleigh) representado na **Figura 26**.<sup>27</sup>

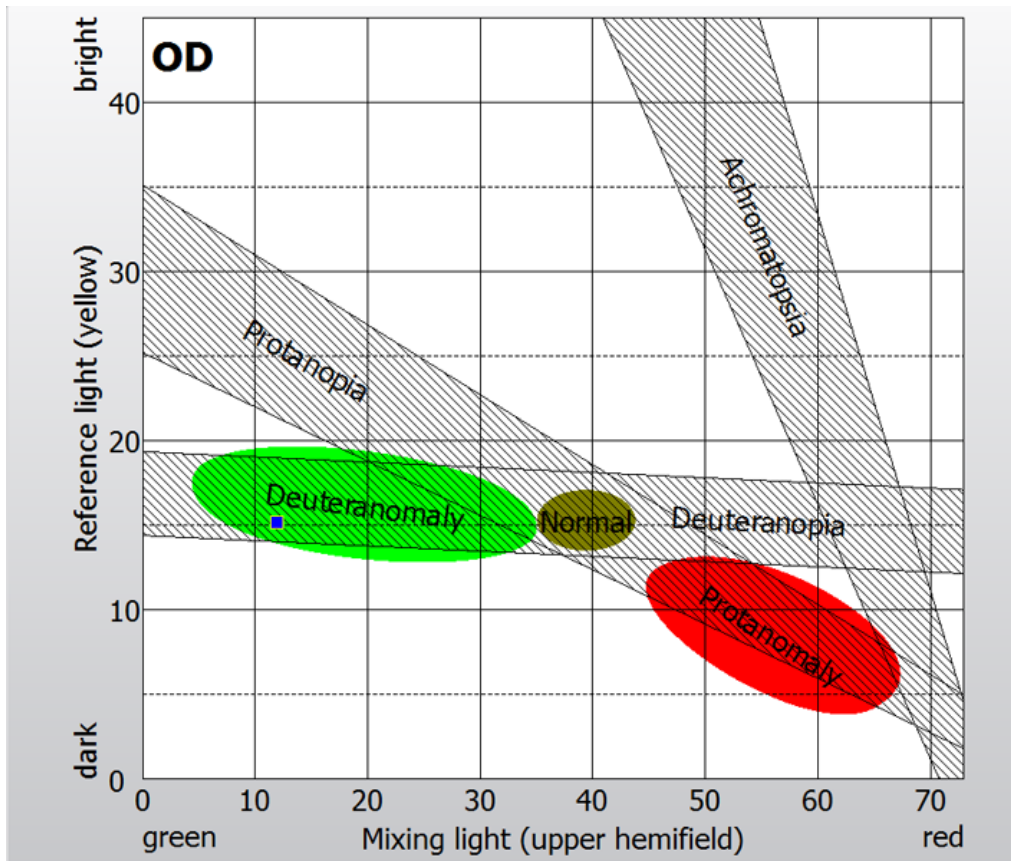


Figura 26-Representação dos resultados obtidos pelo anomaloscópio HMC, diagrama de Pitt Rayleigh

# Material e Métodos

## 2.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi testar se existem alterações na percepção e na leitura de patelas do teste de visão das cores de Ishihara, com a alteração da transmitância do cristalino com a idade, a partir de uma simulação do envelhecimento do cristalino. Caso existisse alteração da visão das cores, saber a partir de que idade essas alterações são relevantes. Foi também testada a influência do iluminante e da intensidade de iluminação na percepção da visão das cores do teste de Ishihara.

## 2.2 Métodos

A investigação decorreu no Colour Science Lab (CSL) na Universidade do Minho (Braga, Portugal). Os testes e recolha de dados experimentais foram realizados no Departamento de Física da Universidade do Minho (Braga, Portugal). Todo o material utilizados durante a realização desta investigação estavam disponíveis nas instalações acima referidas.

## 2.3 Tipo de estudo

Este estudo é observacional. Foram utilizadas imagens híperespectrais de patelas do teste de visão das cores de Ishihara. Os observadores foram recrutados da população universitária sendo na sua totalidade jovens estudantes. Todos os sujeitos intervenientes neste estudo tinham uma visão das cores normal, devidamente avaliada antes da aquisição de dados. Juntamente com as imagens híperespectrais do teste de Ishihara foram utilizados filtros digitais para simular as alterações de transmitância do cristalino com a idade. Foi também testada a resposta dos observadores para dois tipos de iluminantes em três níveis de intensidade cada.

O investigador não teve qualquer influencia sobre os sujeitos intervenientes. Visto tratar-se de um estudo observacional sem contacto direto entre o observador e o equipamento experimental utilizado e não ter sido utilizada qualquer técnica invasiva, a saúde geral do sujeito não foi comprometida.

## 2.4 Observadores

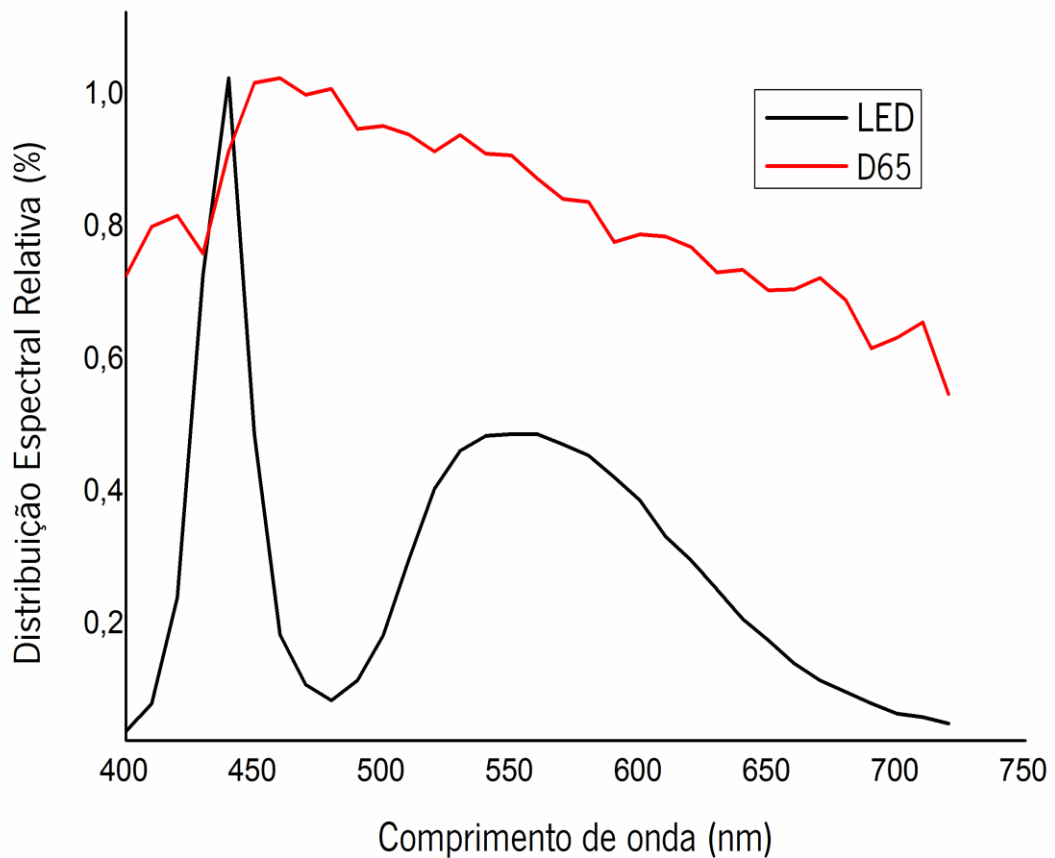
Participaram neste estudo 20 sujeitos jovens, com idade média de 21,55 anos  $\pm 1,27$  (as idades dos sujeitos estavam compreendidas entre os 20 e os 24 anos). Todos os sujeitos pertenciam à comunidade académica da Universidade do Minho. Os participantes possuíam estruturas oculares transparentes, não possuíam qualquer patologia, possuíam visão das cores normal. Se o observador não possuísse estas três condições cumulativamente seria excluído do estudo. Foram utilizados os testes de visão das cores das 100 tonalidades de Farnsworth-Munsell (FM-100) e o anomaloscópio para garantir a normalidade da visão das cores de todos os participantes.

Antes da realização do procedimento experimental os observadores assinaram um consentimento informado onde estava descrito e explicado todo o procedimento. O consentimento informado serviu também para que os sujeitos autorizassem que os dados obtidos fossem apenas utilizados para fins científicos de acordo com a Declaração de Helsinki.<sup>28</sup> Todos os sujeitos participaram no estudo de forma voluntária, podendo optar por desistir da participação no estudo em qualquer altura do mesmo, sem penalização.

## 2.5 Configuração Experimental

Os dados híperespectrais das patelas de Ishihara foram convertidos em imagens passíveis de serem representadas em ecrãs de computador. Para tal, assumiu-se o observador padrão CIE 1931, o Iluminante CIE D65 e o iluminante LED branco, na **Figura 27** está representada a distribuição espectral destes dois iluminantes, cada um destes simulados para três intensidades de luminância média 5, 10 e 15 cd/m<sup>2</sup>.





**Figura 27** Distribuição espectral relativa dos iluminantes utilizados durante o procedimento experimental. A linha a vermelho representa o iluminante D65 e a linha a preto o LED.

As imagens foram apresentadas num ecrã CRT, devidamente calibrado em cor e luminância.

Para cada um dos iluminantes e três intensidades respetivas, foi simulada a perceção das patelas de Ishihara para várias idades e correspondente alterações à transmitância do cristalino com a idade (entre os 20 e os 80 anos).

A simulação da perceção das patelas de Ishihara afetadas pelas alterações de transmitância do cristalino com a idade baseou-se nos dados apresentados por J. Pokorny, V. C. Smith, e M. Lutze em 1987.<sup>29</sup> Estimaram a função de densidade espectral do cristalino L, em duas componentes: a componente relacionada com o envelhecimento do cristalino L<sub>1</sub>, e a componente residual L<sub>2</sub>.<sup>10</sup>

Foi apresentada uma função para descrever o aumento da densidade ótica do cristalino com a idade,  $T_L$ , dependendo do comprimento de onda e da idade em que se encontra o sujeito:

$$T_{L20-60} = T_{L1}[1 + 0.02(A - 32)] + T_{L2}$$

$$T_{L60-80} = T_{L1}[1.56 + 0.0667(A - 60)] + T_{L2}$$

**Equação 8** - Equações que descrevem a variação da densidade ótica dos 20 aos 60 anos e dos 60 aos 80 anos, respetivamente.

Em que  $A$  é a idade do observador,  $T_{L1}$  e  $T_{L2}$  resultam da separação de  $T_L$  em duas componentes:  $T_{L1}$  representa a porção afetada pelo envelhecimento do cristalino após os 20 anos e  $T_{L2}$  representa a porção estável após os 20 anos. Estes valores estão tabelados e encontram-se na

**Tabela 2.**

A densidade ótica do cristalino estimada para as diferentes idades utilizando esta metodologia foi assumida como a absorvância do cristalino e convertida em transmitância. Posteriormente, a transmitância obtida foi utilizada para simular a percepção de cor das patelas de Ishihara para diferentes idades em observadores normais. A equação  $T_{L20-60}$  foi usada na faixa etária dos 20 aos 60 anos e a equação  $T_{L60-80}$  dos 60 aos 80 anos.

**Tabela 2**-Valores da densidade ótica da função de transmissão total da lente em função do comprimento de onda (nm),  $T_L$ , para um observador com uma idade média de 32 anos e a separação de  $T_L$  em duas componentes:  $T_{L1}$  que representa a porção afetada pelo envelhecimento do cristalino após os 20 anos e:  $T_{L2}$  representa a porção estável após os 20 anos (Adaptado de Pokorny J; 1987).

Comprimento de onda	Densidade ótica		
	$T_L$	$T_{L1}$	$T_{L2}$
400	1,600	0,600	1,000
410	1,093	0,510	0,583
420	0,733	0,433	0,300
430	0,493	0,377	0,116
440	0,360	0,327	0,033
450	0,300	0,295	0,005
460	0,267	0,267	—
470	0,233	0,233	—
480	0,207	0,207	—
490	0,187	0,187	—
500	0,167	0,167	—

510	0,147	0,147	—
520	0,133	0,133	—
530	0,120	0,120	—
540	0,107	0,107	—
550	0,093	0,093	—
560	0,080	0,080	—
570	0,067	0,067	—
580	0,053	0,053	—
590	0,040	0,040	—
600	0,033	0,033	—
610	0,027	0,027	—
620	0,020	0,020	—
630	0,013	0,013	—
640	0,007	0,007	—
650	0,000	0,00	—

## 2.5 Aquisição das patelas de Ishihara

As imagens das patelas do teste de Ishihara utilizadas no procedimento experimental foram adquiridas utilizando imagiologia híperespectral.

Um sistema de imagiologia híperespectral é capaz de adquirir dados registando a distribuição espectral da luz refletida em cada ponto do cenário em análise. Este sistema é um sistema de alta resolução capaz de adquirir imagens em várias gamas de comprimento de onda mesmo que muito próximos.

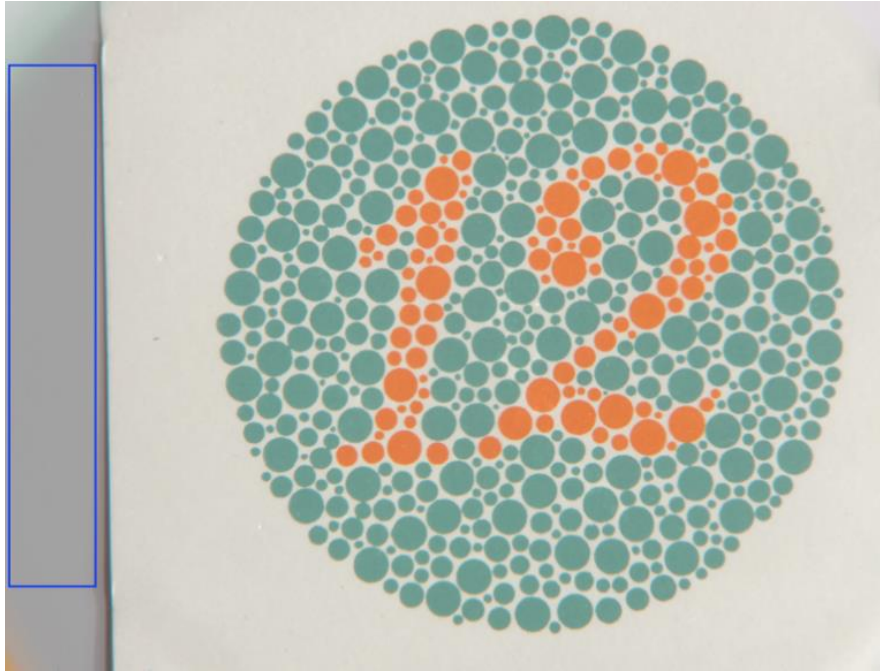
Ao contrário das imagens coloridas adquiridas por câmaras digitais convencionais, que registam a intensidade em apenas 3 sensores de cor – normalmente comprimentos de onda longos, médios e curtos (habitualmente referidos por sensores Vermelhos ou R, Verdes ou G e Azuis ou B), as imagens híperespectrais possuem a informação da intensidade da luz refletida pelo objeto em análise para vários comprimentos de onda. Desta forma associam a uma resolução espacial uma resolução espectral, permitindo uma análise colorimétrica bastante precisa, assim como diversas simulações colorimétricas.

Na aquisição das imagens híperespectrais para a realização do procedimento experimental utilizou-se o método desenvolvido por Foster e Nascimento.<sup>30</sup> Este sistema é composto por uma camara digital monocromática de grande resolução espacial (Hamamatsu-C4742-80 ORCAER)

com uma resolução de 1024 x 1344, um CCD de 8.66×6.66 mm em que cada pixel tem a dimensão de 6.45×6.45  $\mu\text{m}$ , de baixo ruído, arrefecida com Peltier e com 12 bits de sinal de saída. A lente acoplada à câmara funcionava tipicamente a 75 mm e a f/16 ou f/22 para uma maior profundidade de campo, produzindo cerca de 1 minuto de arco de campo de aquisição por pixel. Na frente do sistema existe um filtro de cristais líquidos que permite uma seleção automática do comprimento de onda (VariSpec, VSVIS2-10HC-35-SQ CRI) de sintonização rápida, entre os 400 e os 720 nm com 10 nm de intervalo entre cada comprimento de onda, com uma largura de banda a meia altura de 10 nm a 500 nm, 6 nm a 450 nm e 16 nm a 720 nm.

Para evitar a contaminação por luz infravermelha do sistema quando o filtro estava sintonizado para baixos comprimentos de onda, foi adicionado ao sistema um filtro de infravermelhos. Todo o sistema era controlado por um software desenvolvido no Laboratório de Ciências da Cor da Universidade do Minho controlando o tempo de exposição da câmara de forma automática por forma a maximizar o sinal adquirido em cada comprimento de onda, ao controlar o tempo de exposição da câmara digital monocromática para cada comprimento de onda.

De forma a compensar as variações espaciais do iluminante e não uniformidades espaciais do sistema durante o tempo de aquisição, foi utilizada uma superfície branca uniforme e esta imagem adquirida e utilizada no processamento das imagens das patelas de Ishihara. A reflectância foi estimada a partir de uma referência cinza conhecida que estava presente na cena durante todo o período de aquisição. No processamento da imagem assumiu-se que o iluminante presente na referência era uniforme por toda a patela de Ishihara, uma vez que as não uniformidades espaciais foram compensadas utilizando a referência branca. A **Figura 28** apresenta uma das patelas a ser adquirida, com a correspondente referência cinza presente na imagem durante todo o tempo de aquisição.

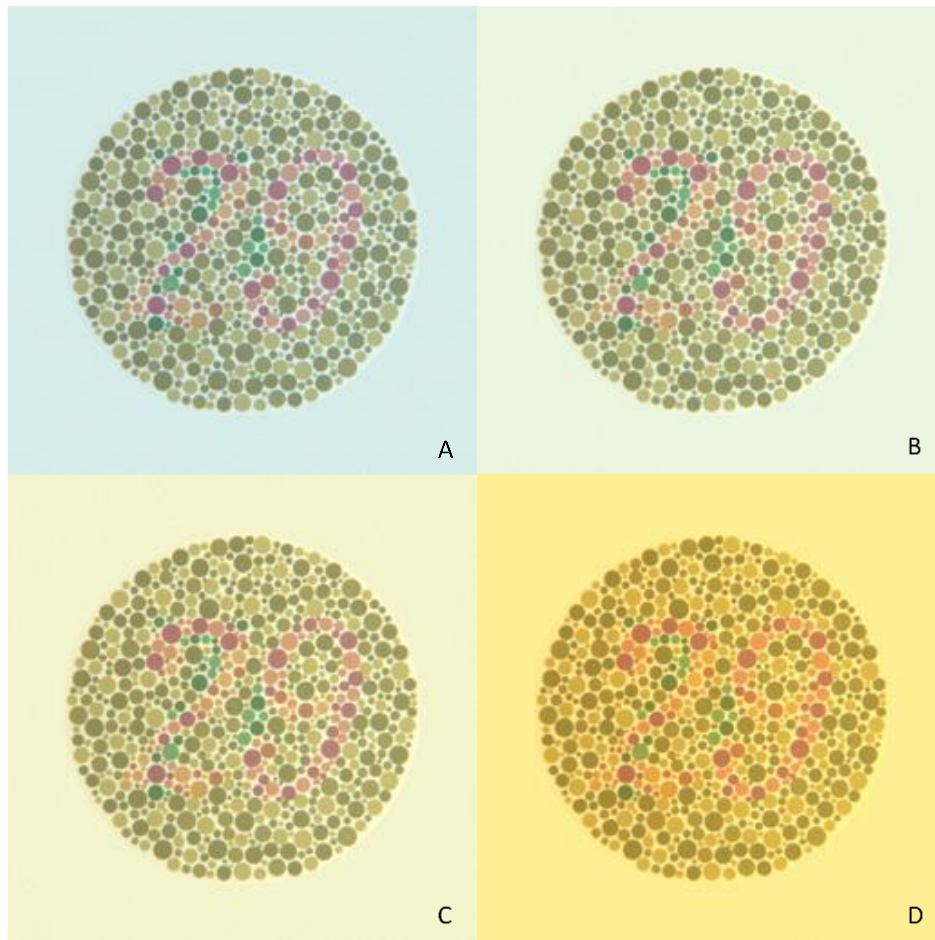


**Figura 28**-Representação da aquisição da imagem hiperespectral da primeira patela de Ishihara. O retângulo azul representa a posição da referência cinza.

## 2.6 Monitor e condições ambientais

As imagens da patelas do teste de Ishihara utilizadas durante o procedimento experimental foram apresentadas num monitor CRT (Sony–GDM F520, Sony Corporation, Japan) controlado por um sistema VisaGe MKII (Cambridge Research Systems, Kent, UK).

As imagens são apresentadas simulando a transmitância do cristalino para as várias idades em análise. Trata-se de um processo sequencial que se inicia com o filtro correspondente à idade do observador e vai aumentando de 2 em 2 anos à medida que o observador vai passando para as imagens seguintes. A imagem vai-se tornando cada vez mais amarela, tal como representado na **Figura 29**, até chegar ao limite dos 80 anos.



**Figura 29**-Representação da patela do teste de Ishihara número 5 para 20 (A), 40 (B), 60(C) e 80 (D) anos, com o iluminante CIE D65.

A distância do observador ao ecrã do computador era de 1 metro, resultando num campo de visão de 7,3 graus.

O ambiente do local da recolha de dados estava completamente escuro sendo a única iluminação a proveniente do monitor CRT. Foram testados dois tipos de iluminação: a iluminante CIE D65 e o iluminante LED. Dentro de cada iluminante foram testadas três intensidades de iluminação (a luminância média de cada imagem apresentada foi ajustada a 5 cd/m<sup>2</sup>, 10 cd/m<sup>2</sup> e 15 cd/m<sup>2</sup>).

Não foram utilizadas todas as patelas do teste de Ishihara. Apenas foram utilizadas 12 patelas para que o procedimento não se tornasse muito cansativo para o observador. As 12 patelas utilizadas foram escolhidas aleatoriamente mas correspondendo a duas patelas de cada cluster. A **Tabela 3** mostra as patelas utilizadas durante o procedimento experimental. A patela número 1 foi utilizada como referência e demonstração para que os sujeitos percebessem como proceder.

**Tabela 3-**Descrição dos clusters utilizados durante o procedimento experimental.

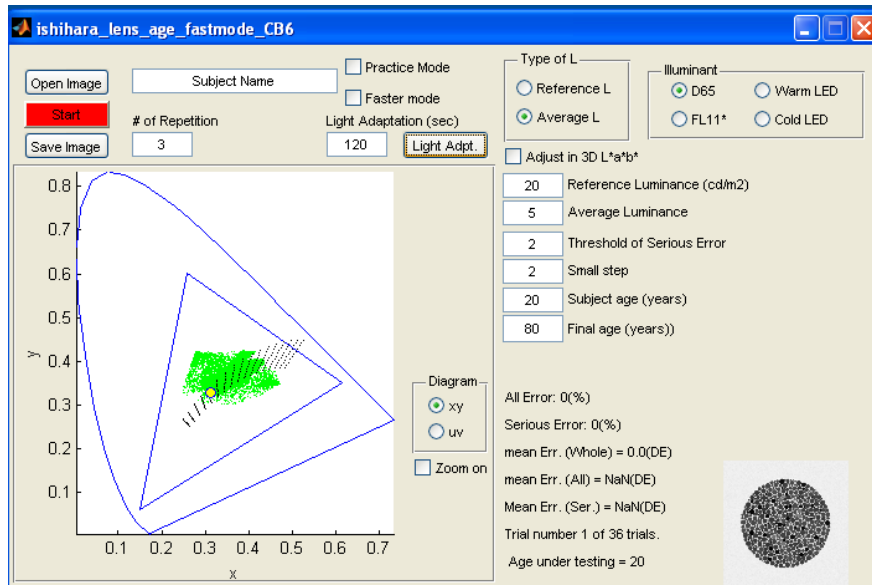
Clusters	Descrição	Nº da patela correspondente
Cluster 1	Patelas de transformação, fundo em tons de verde	2 e 5
Cluster 2	Patelas de transformação, fundo em tons de vermelho	6 e 7
Cluster 3	Patelas de esbatimento, fundo em tons de azul	9 e 10
Cluster 4	Patelas de esbatimento, fundo em tons de amarelo	12 e 14
Cluster 5	Patelas de ocultação	17 e 18
Cluster 6	Patelas de diagnóstico, fundo cinza	22 e 23

## 2.7 Procedimento experimental

O procedimento experimental começou com a análise da normalidade da visão das cores dos sujeitos, para determinar se os observadores são ou não elegíveis para a participação no estudo. Durante esta etapa foram utilizados o teste das 100 tonalidades de Farnsworth-Munsell (FM-100) e o anomaloscópio Oculus HMC. Foi também efetuada uma avaliação com o biomicroscópio para garantir que os meios oculares eram transparentes e não existiam patologias.

Em seguida iniciou-se o procedimento experimental propriamente dito. Foi realizado em ambiente escuro apenas com a iluminação proveniente do monitor CRT. Inicialmente é mostrado ao paciente uma imagem de teste de Ishihara para que o sujeito se familiarize com o funcionamento dos equipamentos. A imagem utilizada nesta fase é a imagem nº1 do teste de Ishihara e esta imagem não é utilizada nos passos seguintes do procedimento. Posteriormente segue-se uma etapa de adaptação à iluminação em que o observador ficaria 120 segundos exposto à iluminação que iria ser testada (a interface do software, representada na **Figura 30**, permite

alterar vários parâmetros como a idade do observador (para ajustar a transmitância de acordo, o tipo de iluminação e a intensidade da iluminação)



**Figura 30**-Representação da interface do software. Nesta interface é possível alterar algumas variáveis como: iluminante, idade do observador (em anos), intensidade de iluminação entre outras.

A tarefa dos observadores era premir um botão num controlo remoto por forma a fazer circular no ecrã as imagens simuladas para a diferente transmitância do cristalino para as diferentes idades simuladas e responder quando se apercebia de uma alteração de cor nas imagens das patelas de Ishihara. A apresentação das imagens era progressiva, de menor idade para maior idade, não tendo o observador noção de quando os limites eram alcançados, para além da percepção visual dada pelas diferenças entre as imagens. Cada vez que o sujeito clicava no botão 1 do controlo remoto o filtro que simula a alteração da transmitância do cristalino com a idade aumentava a idade em 2 anos. Quando o sujeito percebia alterações da percepção da cor das patelas clicava no botão 2 do controlo remoto para passar à imagem seguinte. Caso o observador não percebesse alteração de cor na imagem, quando o limite dos 80 anos era atingido o programa automaticamente registava essa idade como resposta e avançava para a imagem seguinte. Este procedimento foi replicado 3 vezes (para dois tipos de iluminação e dentro de cada tipo de iluminação 3 intensidades de iluminação diferentes). Foram utilizadas 12 imagens do teste de Ishihara (duas imagens correspondentes de cada cluster), cada patela foi apresentada 3 vezes. Não foram utilizadas todas as patelas do teste de Ishihara, isso tornaria o procedimento muito longo e cansativo, o que poderia ter influência nos resultados, como referido anteriormente.



As instruções relativas à realização do procedimento foram apresentadas no monitor no início do procedimento para que fossem descritas da mesma maneira para todos os observadores. A ordem de apresentação das patelas, do tipo de iluminação e da intensidade de iluminação foi completamente aleatório, como mostra a **Tabela 4**. O procedimento completo teve a duração de cerca de 2h por observador.

**Tabela 4**-Tabela de aleatorização

Tipo de iluminante	D65			LED		
	5	10	15	5	10	15
observador 1	1º	2º	3º	1º	2º	3º
observador 2	3º	2º	1º	1º	3º	2º
observador 3	2º	1º	3º	3º	2º	1º
observador 4	1º	2º	3º	1º	3º	2º
observador 5	2º	3º	1º	2º	1º	3º
observador 6	2º	1º	3º	2º	3º	1º
observador 7	1º	3º	2º	1º	3º	2º
observador 8	1º	3º	2º	3º	2º	1º
observador 9	3º	1º	2º	3º	1º	2º
observador 10	2º	3º	1º	1º	2º	3º
observador 11	3º	2º	1º	2º	3º	1º
observador 12	3º	2º	1º	3º	2º	1º
observador 13	1º	2º	3º	1º	2º	3º
observador 14	2º	1º	3º	2º	3º	1º
observador 15	2º	1º	3º	1º	3º	2º
observador 16	2º	1º	3º	3º	1º	2º
observador 17	1º	3º	2º	3º	1º	2º
observador 18	1º	3º	2º	3º	2º	1º
observador 19	3º	2º	1º	1º	2º	3º
observador 20	2º	1º	3º	2º	3º	1º

## 2.8 Análise dos resultados

Durante análise dos resultados começou-se por determinar as médias e desvio padrão das idades, para o qual os indivíduos percebiam alterações na percepção das patelas do teste de Ishihara. Foram calculados estes parâmetros para os dois iluminantes e para as 3 intensidades de iluminação.

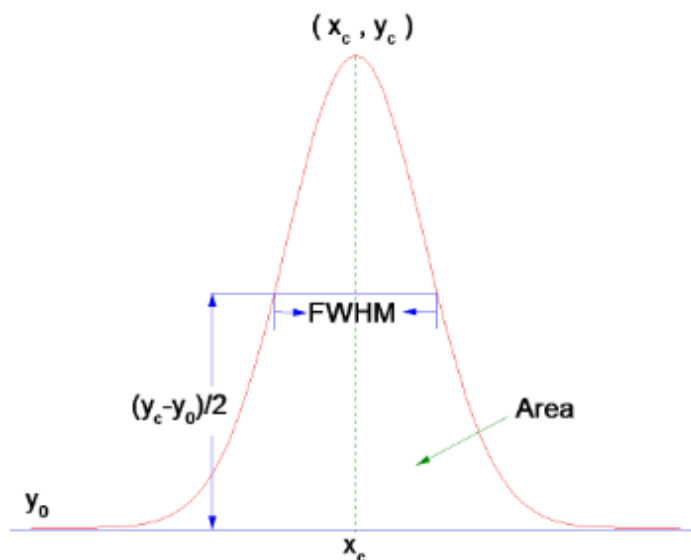
Foram determinadas as frequências de resposta para cada iluminante e intensidade de iluminação em função da idade simulada para a transmitância do cristalino. O intervalo das idades em análise foi determinado a partir da fórmula de Sturges descrita abaixo:

$$K = 1 + 3.322 \times \log N$$

**Equação 9**-Fórmula de Sturges.

Em que  $K$  é número de intervalos e o  $N$  é o número de observações, sendo para cada iluminante,  $N=2160$  (20 observadores x 12 imagens x 3 repetições de cada imagem x 3 intensidades). Obteve-se  $K = 12$ . Para facilitar a distribuição consideraram-se 13 intervalos, ou seja, intervalos de 5 em 5 anos entre os 20 e os 80 anos.

Para determinar os picos de resposta da frequência, ajustaram-se funções do tipo Gaussiana, como representada na **Figura 31**, às distribuições de frequências de respostas em função da idade da transmitância do cristalino.



**Figura 31**-Representação de uma distribuição gaussiana, em que o pico da curva é representado por  $x_c$ , com coordenadas  $(x_c, y_c)$ , com  $y_c=0$  (adaptado de <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Gaussian-Function-FitFunc#Function>, setembro de 2019).

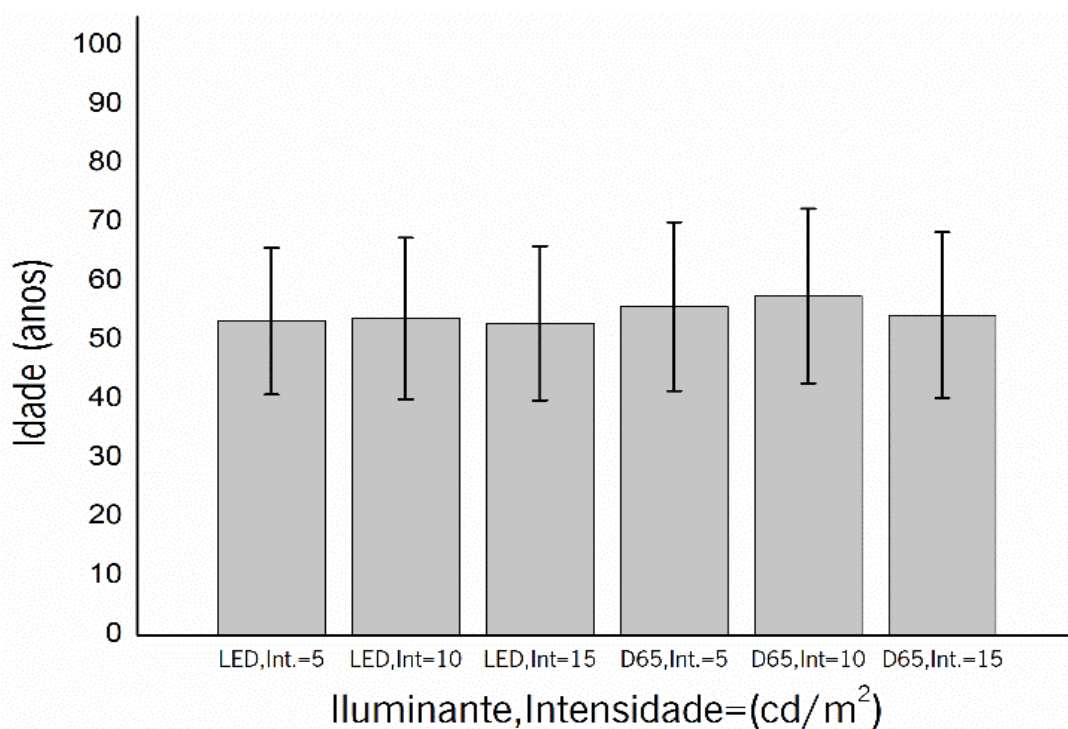
Em alguns casos a curva de melhor ajuste não era uma Gaussiana, mas sim uma bi-Gaussiana (sobreposição de duas funções Gaussianas, como a representada na **Figura 31**). A forma de seleção da melhor curva a ajustar a cada conjunto de dados baseou-se no ajuste da curva que permitia obter o melhor  $r^2$ .

Dada a dificuldade em obter uma única curva que se ajustasse a todos os dados, e dada a natureza de duplo pico de algumas das distribuições, procurou-se uma forma alternativa de analisar os dados. Para tal utilizou-se uma aproximação não paramétrica que não assume qualquer forma sobre a função que está subjacente aos dados em análise, exceto a suavidade da curva.<sup>21</sup>

Este método analisa a frequência cumulativa das respostas e extrai o valor esperado para diversos limiares de detecção. Neste trabalho foram utilizados os limiares de 50% e 75%. Os limiares extraídos permitem identificar a resposta esperada dos observadores considerando 50% e 75% das respostas obtidas, respetivamente.

## Resultados

O gráfico da **Figura 32** e a **Tabela 5** representam as médias e desvio padrões das respostas indicadas pelos observadores por iluminante e para cada uma das três intensidades respectivas. As respostas indicam a frequência média de respostas englobando todos os observadores onde o valor indicado representa a idade simulada para a transmitância do cristalino selecionada à qual os observadores perceberam uma alteração de cor na patela em análise.



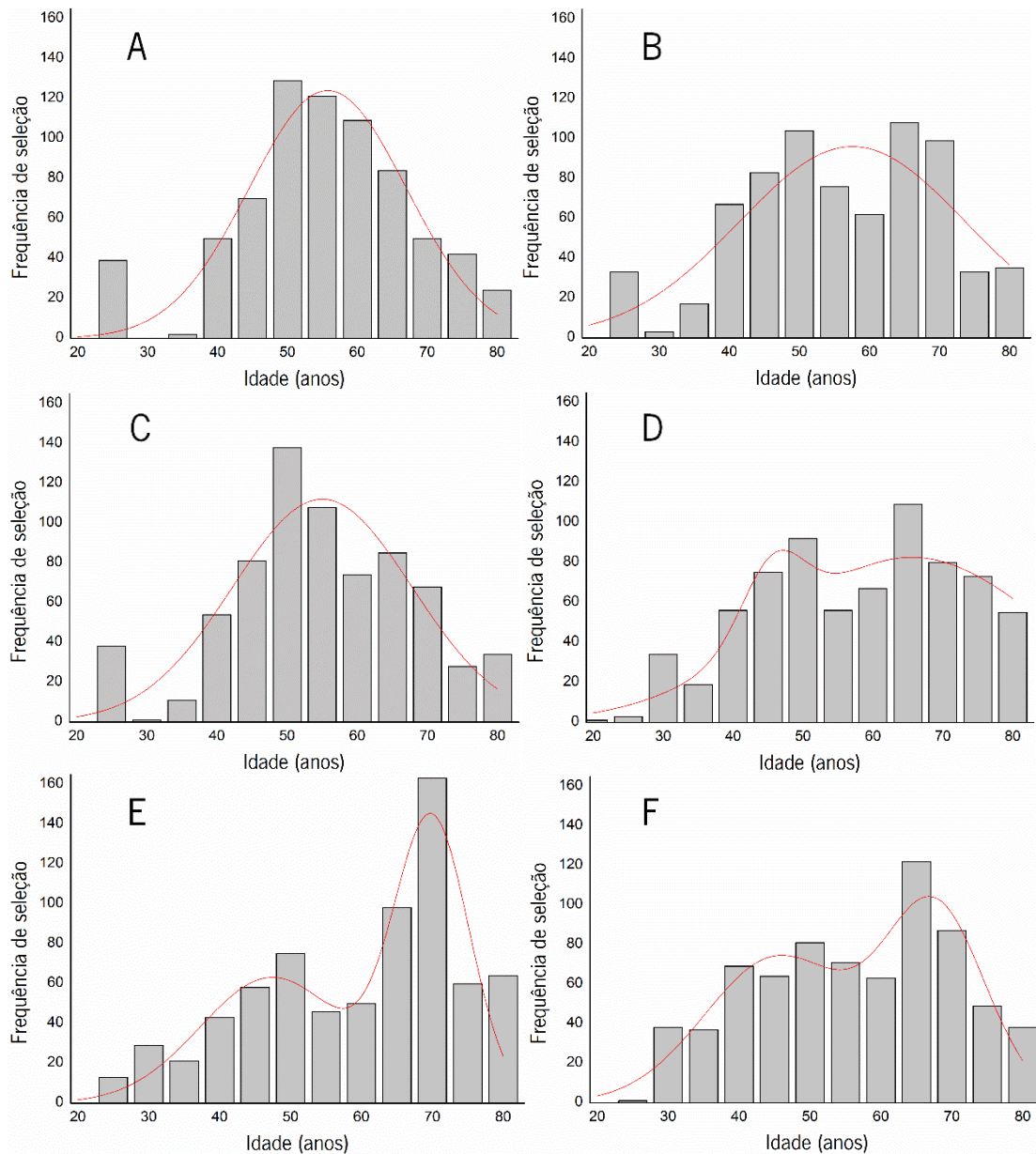
**Figura 32**-Idade média da simulação da transmitância do cristalino, em que os observadores percebem alteração de cor na patela, para cada intensidade de iluminação testada correspondente a cada iluminante e respectivo desvio padrão.

**Tabela 5**-Valores das médias e desvio padrões correspondentes ao gráfico da figura 32

Iluminante	Intensidade (cd/m <sup>2</sup> )	Média (anos)	Desvio padrão (anos)
LED	5	53,37	12,47
LED	10	53,84	13,70
LED	15	53,03	13,06
D65	5	55,86	14,33
D65	10	57,66	14,82
D65	15	54,37	14,07
Total	—	54,69	13,74

Verifica-se que em média os observadores percebem alteração aos 54,69 anos  $\pm$  13,74. Para as tres intensidades de iluminação testadas de cada um dos tres iluminates as medias foram de: LED intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup> média de 53,37 anos  $\pm$  12,47; LED intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup> média de 53,84 anos  $\pm$  13,70; LED intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup> média de 53,03 anos  $\pm$  13,06; D65 intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup> média de 55,86 anos  $\pm$  14,33; D65 intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup> média de 57,66 anos  $\pm$  14,82; D65 intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup> média de 54,37 anos  $\pm$  14,07 (**Tabela 5**).

Os graficos da **Figura 33** representam a distribuição de frequencias de seleção das idades dos observadores. Cada um dos graficos é correspondente a cada uma das tres intensidades de iluminação (5 cd/m<sup>2</sup>, 10 cd/m<sup>2</sup>, 15 cd/m<sup>2</sup>) testadas nos dois iluminates (LED e D65). A linha a vermelho representa a distribuição com melhor ajuste para cada situação.



**Figura 33**-Representações gráficas das distribuições das frequências de seleção das idades dos observadores. As linhas a vermelho representam a distribuição com melhor ajuste. A- iluminante LED com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; B- iluminante LED com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; C- iluminante LED com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>; D- iluminante D65 com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; E- iluminante D65 com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; F- iluminante D65 com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>.

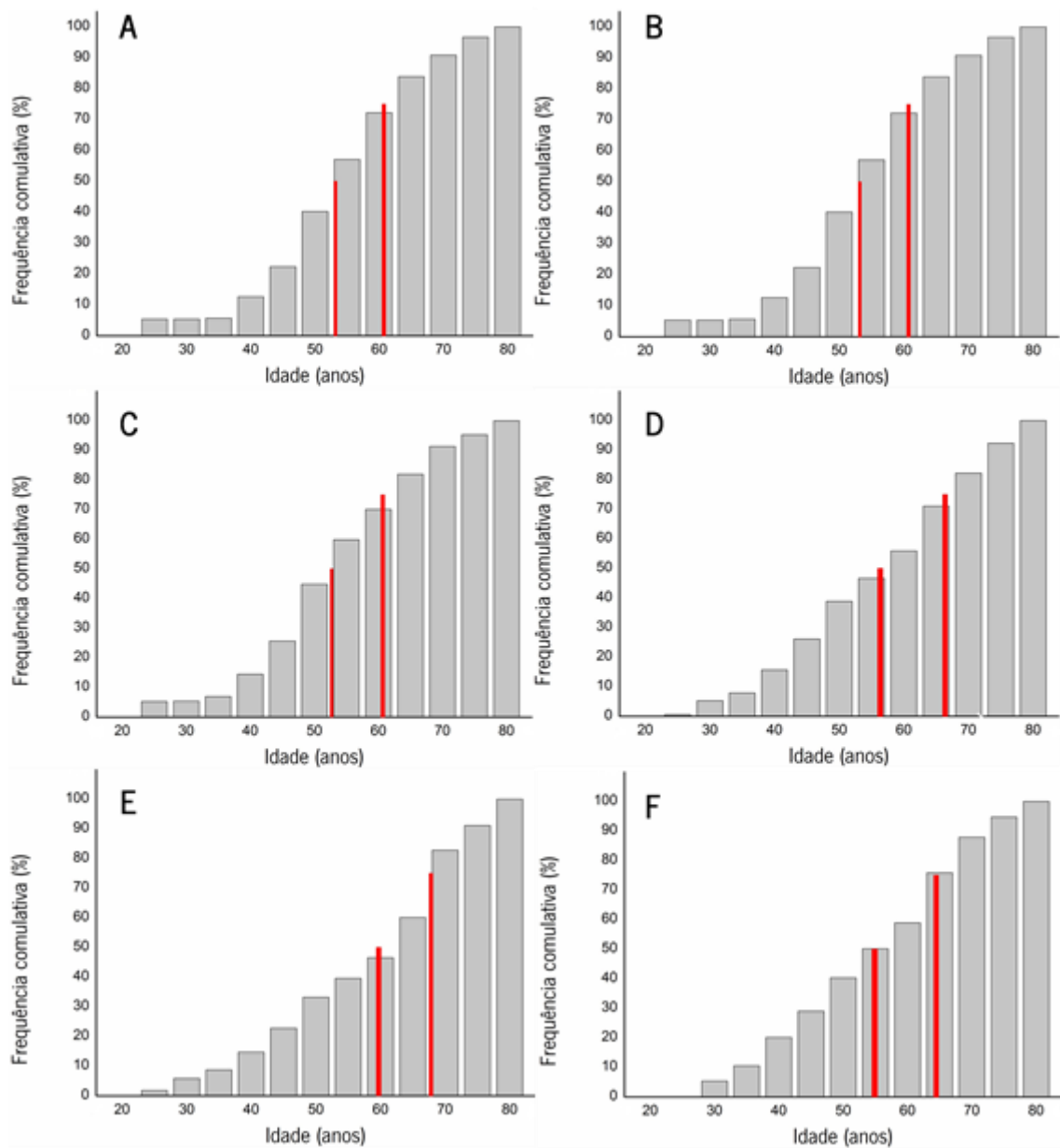
**Tabela 6**-Valores da posição do máximo da(s) curva(s) Gaussiana(s) ajustada aos dados de frequência e correspondente  $R^2$  dos gráficos da figura 33

Iluminante	Gráfico (Figura 33)	Intensidade de iluminação (cd/m <sup>2</sup> )	Curva de melhor ajuste	máximo da curva 1 (anos)	máximo da curva 2 (anos)	$R^2$
LED	A	5	Gaussiana	55,7	————	0,864
LED	B	10	Gaussiana	57,5	————	0,652
LED	C	15	Gaussiana	55,0	————	0,759
D65	D	5	Bi-Gaussiana	45,6	65,5	0,854
D65	E	10	Bi-Gaussiana	47,4	69,9	0,831
D65	F	15	Bi-Gaussiana	45,5	67,6	0,873

No iluminante LED nas três intensidades de iluminação a distribuição de melhor ajuste foi a Gaussiana, enquanto que no iluminante D65 a distribuição de melhor ajuste foi a Bi-Gaussiana. Os valores máximos das curvas e de  $r^2$ , para as três intensidades de cada um dos iluminantes, estão descritos na **Tabela 6**.

Na **Figura 34** mostra os gráficos de frequência cumulativa, as barras a vermelho representam os limiares de detecção de 50% e 75%. Na

**Tabela 7** estão descritos os valores dos limiares de detecção de 50% e 75%, e respectivo desvio padrão.



**Figura 34** Representações gráficas das distribuições das frequências cumulativas, as barras a vermelho representam os limiares de 50% e 75%. A- Iluminante LED com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; B- iluminante LED com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; C- iluminante LED com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>; D- iluminante D65 com intensidade de 5 cd/m<sup>2</sup>; E- iluminante D65 com intensidade de 10 cd/m<sup>2</sup>; F- iluminante D65 com intensidade de 15 cd/m<sup>2</sup>.



**Tabela 7**-Valores dos limiares de 50% e 75% relativos aos gráficos da figura 34

Iluminante	Gráfico (Figura 34)	Intensidade de iluminação (cd/m <sup>2</sup> )	Limiares 50% (anos)	Limiares 75% (anos)
LED	A	5	52,9±0.20	60,7±0.26
LED	B	10	53,8±0.28	62,9±0.28
LED	C	15	52,4±0.20	60,6±0.26
D65	D	5	56,3±0.39	66,3±0.36
D65	E	10	59,7±0.35	67,8±0.28
D65	F	15	54,9±0.42	64,4±0.35

## Discussão dos resultados

O objetivo deste trabalho era testar a influencia do envelhecimento do cristalino na percepção de patelas do teste de visão das cores de Ishihara, conjugado com dois iluminantes diferentes e três intensidades de iluminação.

Em termos de legibilidade das patelas do teste do Ishihara não houveram alteração na sua leitura.<sup>31</sup> Estudos anteriores realizado com o teste de FM-100 mostram que o envelhecimento do cristalino não altera a leitura, nem aumentam o número de erros. Outros fatores como o tamanho pupilar, a cor da iris e o pigmento macular, podem ter maior influência nas alterações de leitura do teste FM-100.<sup>32</sup>

As médias das idades simuladas em que os observadores perceberam alteração nas patelas de Ishihara (para cada intensidade de iluminação de cada um dos iluminantes), são muito idênticas tal como os desvio-padrão. A média foi de 54,7 anos  $\pm$ 13,7. Seria de esperar que os valores de seleção surgissem acima dos 40 anos, pois estudos anteriores mostram que a densidade ótica do cristalino (este tornando-se mais amarelado) torna-se significativa a partir dos 40 anos.<sup>33</sup> A dissertação de 2018 de Sara Marinho refere que apenas é perceptível a influencia do envelhecimento do cristalino no teste de visão das cores de Ishihara a partir dos 50 anos.<sup>31</sup>

Como os desvios padrões são muitos dispersos e os intervalos são amplos, foi necessário testar qual a distribuição que se ajustava melhor as várias situações.

Em termos de distribuição foi possível observar que no iluminante LED a distribuição de melhor ajuste era a Gaussiana, enquanto que no iluminante D65 a distribuição de melhor ajuste era a bi-Gaussiana. No iluminante LED é possível observar que a idade com a maior frequência de seleção era de em média 56,0 anos  $\pm$ 1,3. Enquanto que no iluminante D65 a distribuição de melhor ajuste é uma bi-Gaussiana uma vez que existem dois valores máximos de seleção. Neste caso o primeiro valor máximo encontra-se em média 46,2 anos  $\pm$ 1,1 e o segundo valor máximo encontra-se em média nos 67,7 anos  $\pm$ 1,8.

Ao realizar os ajustes das distribuições das frequências de seleção obtiveram-se dois tipos de distribuição (Gaussiana e bi-Gaussiana) para realizar uma análise estatística mais aprofundada, calcularam-se as frequências cumulativas e determinaram-se os limiares de 50% e 75%. Os valores

dos limiares são muito parecidos entre cada situação, com 50% dos observados a fazerem a seleção entre os 52 e 59 anos e 75% dos observadores a fazerem a sua seleção entre os 60 e os 67anos.

O monitor CRT não é capaz de reproduzir todas as cores presentes nas patelas do teste de Ishihara. Algumas das imagens apresentadas tem erros associados superiores a 10% (10% das cores o monitor não é capaz de reproduzir). Estes erros superiores a 10% apenas acontecem no iluminante LED, em idades superiores a 76 anos. As imagens com erros superiores a 10% são: no iluminante LED a imagem 6 para a idade de 80 anos nas três intensidades luminosas, no iluminante LED a imagem 17 para as idades de 76, 78 e 80 anos nas três intensidades luminosas e a imagem 18 correspondente ao iluminante LED para as idades de 78 e 80 anos para as três intensidades luminosas.

## Conclusões e trabalho futuro

As médias das idades de seleção são muito idênticas entre cada situação, sendo muito próximas dos 55 anos. Em termos de frequência cumulativa os limiares de 50% e 75% também tem valores muito parecidos, entre cada situação, 55 anos e 65 anos respectivamente. Desta forma podemos concluir que as alterações da transmitância do cristalino que influenciam a seleção dos sujeitos, são perceptíveis perto dos 55 anos. Em termos de alterações do tipo de iluminante e da intensidade de iluminação, este não tem grande influência na percepção das patelas do teste de visão das cores de Ishihara. Em termos de legibilidade das patelas estes parâmetros não tiveram qualquer influência.

Como as patelas do teste de Ishihara foram apresentadas num monitor, este tem dificuldades em reproduzir todos os tons de cor representados no teste de Ishihara. Estas alterações dos tons de cor, não tiveram influência nos resultados, pois apenas se fizeram sentir (em pequenas percentagens) no iluminante LED em idades muito avançadas (onde a maior parte dos observadores não selecionava).

Para a realização de um trabalho futuro seria bom utilizar um teste de visão das cores diferente, visto que o teste de Ishihara não se verificaram alterações significativas (teste de visão das cores que teste a zona do azul). Seria também interessante focar mais nas idades entre os 40 e os 70 anos, utilizando assim o intervalo de idades onde se verificaram alterações mais significativas. E estudar mais as características individuais de cada sujeito.

## Bibliografia

1. Senell, Richard S.; Lemp, M. A. *Clinical Anatomy of the Eye*. (1998).
2. Kels, B. D., Grzybowski, A. & Grant-kels, J. M. Human ocular anatomy. *Clin. Dermatol.* **33**, 140–146 (2015).
3. Willoughby, C. E. *et al.* Review Anatomy and physiology of the human eye : effects of mucopolysaccharidoses disease on structure and function – a review. 2–11 (2010). doi:10.1111/j.1442-9071.2010.02363.x
4. Rabbetts, R. B. *Clinical Visual Optics*. (2007).
5. Delmonte, D. W. & Kim, T. Anatomy and physiology of the cornea. *J. Cart. Refract. Surg.* **37**, 588–598 (2011).
6. Mafee, M. F., Karimi, A. & Shah, J. D. Anatomy and Pathology of the Eye : Role of MR Imaging and CT. **14**, 249–270 (2006).
7. Kanski, J. J. *Clinical Ophthalmology*. (1999).
8. Hejtmancik, J. F. & Shiels, A. Overview of the Lens. 119–127 (2017). doi:10.1016/bs.pmbts.2015.04.006.Overview
9. Benjamin, W. J. *Borish's Clinical Refraction*. (2006).
10. Gronfier, C., Claustrat, B., Denis, P. & Cooper, H. M. Aging of Non-Visual Spectral Sensitivity to Light in Humans : Compensatory Mechanisms ? **9**, 1–10 (2014).
11. Michael, F. & Marmor, M. Ophthalmology and Art: Simulation of Monet's Cataracts and Degas' Retinal Disease. *Arch Ophthalmol* **124**, 1764–1769 (2006).
12. Malhotra, A., Minja, F. J., Crum, A. & Burrowes, D. Ocular Anatomy and Cross-Sectional Imaging of the Eye. *YSULT* **32**, 2–13 (2011).
13. Hart, W. M. *Physiology of the Eye*. (1992).
14. Hunt, R. W. . *Mesuring Colour*. (2011).
15. Manuel, J., Linhares, M., Pinto, P. D., Miguel, S. & Nascimento, C. The number of

- discernible colors in natural scenes. **25**, 2918–2924 (2008).
16. Pointer, M. R. & Attridge, G. G. The Number of Discernible Colours. 17–19 (1997).
  17. Schanda, J. *Colorimetry, Understanding the CIE System*. (2007).
  18. Birch, J. Worldwide prevalence of red-green color deficiency. **29**, 313–320 (2012).
  19. Linhares, J. M. . Diversidade cromática de cenários complexos digitalizados com imagiografia. (2011).
  20. Speranskaya, N. Determination of spectral color co-ordinates for twenty-seven normal observers. *Opt. Spectrosc* **7**, 424–428 (1959).
  21. Stiles, W. & Burch, J. N.P.L. color-matching investigation: Final report. *Opt. Acta (Lond)*. **6**, 1–26 (1959).
  22. Dain, S. J. Clinical colour vision tests. *Clin Exp Optom* **87**, 276–293 (2004).
  23. Zarazaga, A. F., Vásquez, J. G. & Royo, V. P. Review of the main colour vision clinical assessment tests & . *Arch. la Soc. Española Oftalmol. (English Ed)*. **94**, 25–32 (2019).
  24. D, S. I. M. The Series of Plates Designed as a Test for Colour-Deficiency by.
  25. The, O. N. & The, R. O. F. Ishihara plates appearing in the American Optical Company ' s test. **302**, 295–302 (2015).
  26. Birch, J. Clinical use of the American Optical Company ( Hardy , Rand and Rittler ) pseudoisochromatic plates for red-green colour deficiency. *Ophthal. Physiol. Opt.* **17**, 248–254 (1997).
  27. Manual, I. Examination of Colour Vision Notes on this Instruction Manual.
  28. World Medical Association Declaration of Helsinki, Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. 1–5 (2008).
  29. Pokorny, J., Smith, V. C. & Lutze, M. Aging of the human lens. **26**, 1437–1440 (1987).
  30. Foster, D. H., Nascimento, S. M. C. & Amano, K. Europe PMC Funders Group Information Limits on Neural Identification of Colored Surfaces in Natural Scenes. **21**, 331–336 (2007).
  31. Marinho, S. A influência dos meios oculares na percepção do teste de visão das cores de

Ishihara. (2018).

32. Beirne, R. O., Mcilreavy, L. & Zlatkova, M. B. The effect of age-related lens yellowing on Farnsworth – Munsell 100 hue error score. 448–456 (2008). doi:10.1111/j.1475-1313.2008.00593.x
33. Duncan, G., Wormstone, I. M. & Davies, P. D. The aging human lens : structure , growth , and physiological behaviour. 818–823 (1997).

# Anexos



## Anexo 1 Exemplo do consentimento informado entregue aos sujeitos que participaram no estudo.



101 Escola de Ciências  
Campus de Guimarães  
4710-057 Braga -  
Portugal

### CONSENTIMENTO INFORMADO E INFORMAÇÃO AOS VOLUNTÁRIOS

**Estudo:** A influência dos meios oculares na percepção do teste de visão das cores do Ishihara

**Responsável:** João Manuel Maciel Linhares, [jlinhares@fisica.uminho.pt](mailto:jlinhares@fisica.uminho.pt)

**Investigador:** João Pedro Teixeira Cunha, [jp1496@hotmail.com](mailto:jp1496@hotmail.com)

Este documento visa informar sobre a experiência psicofísica que irá ser realizada no contexto do projeto acima indicado e obter o seu consentimento informado de acordo com a "Declaração de Helsinquia" (1964, Associação Médica Mundial).

Este trabalho consiste na utilização de imagens de patelas de Ishihara, apresentadas num ecrã de computador, que simulam a influência dos meios oculares na alteração da cor das mesmas, em observadores com a visão das cores normal. Esta experiência tem apenas objetivos científicos sem fins comerciais.

A visão das cores dos observadores será avaliada para garantir a sua normalidade, utilizando métodos observacionais, não invasivos. Experimentalmente, serão apresentadas várias imagens num ecrã de computador e o observador terá que executar uma ação de resposta através de um controlo remoto (semelhante ao controlo remoto de video jogos), ao premir os botões disponíveis para o efeito.

Durante toda a avaliação serão utilizadas técnicas não invasivas, ou seja, não haverá invasão das barreiras naturais ou corpo do observador. Como é um estudo de natureza observacional não influencia o processo natural nem compromete a saúde geral do observador em estudo.

Serão recolhidos alguns dados pessoais como a data de nascimento, nome e contacto, que serão mantidos em anonimato e não serão cruzados com os dados clínicos. Estes dados serão tratados estatisticamente de forma anónima. Os estatísticos resultantes serão publicados em trabalhos científicos, sem qualquer indicação da origem e/ou fonte individual dos mesmos garantindo-se o seu anonimato. Os dados recolhidos não serão passados a terceiros sem a autorização expressa e escrita do seu detentor.

A recolha de dados e análise de resultados será efetuada no Laboratório da Cor do Departamento de Física da Universidade do Minho.

Eu, \_\_\_\_\_ declaro que:  
Tomei conhecimento dos objetivos, procedimentos e implicações do estudo acima indicado;

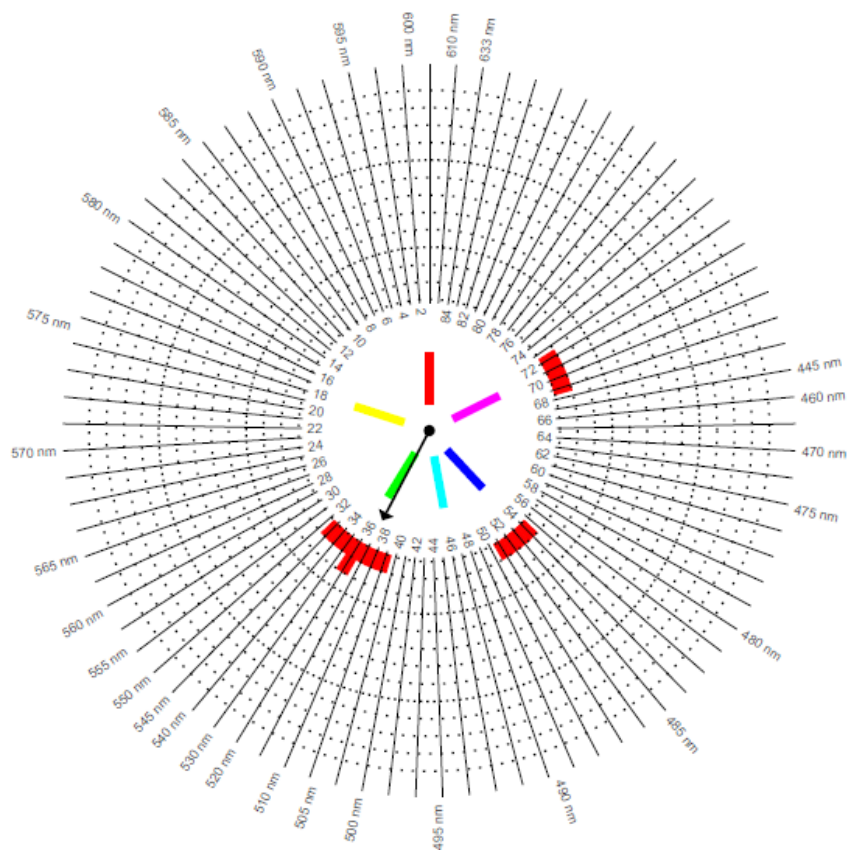
- Todos os aspetos relevantes sobre a experiência a ser realizada foram explicados;
- Foi-me dada oportunidade de colocar qualquer questão ao investigador, tendo sido respondido de forma satisfatória;
- Entendo que posso recusar, a qualquer momento, a continuidade da minha participação em estudo sem consequências no futuro;
- Fui informado(a) que todos os dados recolhidos serão mantidos em anonimato e autorizo que sejam utilizados exclusivamente para fins científicos e/ou académicos que a equipa investigadora considerar apropriados

Braga, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 20\_\_

Observador: \_\_\_\_\_

Investigador: \_\_\_\_\_

## Anexo 2 Exemplo de um resultado obtido após a realização do FM-100



Anexo 3 Exemplo de uma folha de registo do Anomaloscópio



# HMC ANOMALOSKOP

Red/Green Color Vision

Name: Nn

First name: LI

Date of birth: 12/09/97

Anomaly Quotient (absolute matching range)

R \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

L 1.04 - 0.93

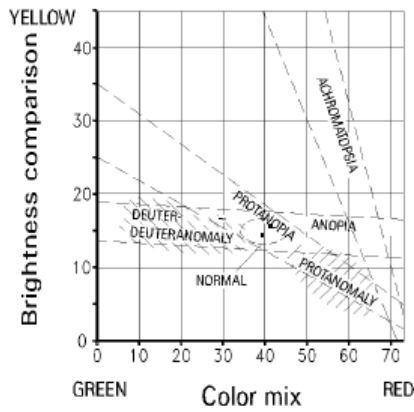
Remarks: \_\_\_\_\_

Matching range  
(assumed equations from - to)

R \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

L 39.2 - 41.2

14.3 - 15.5



Norm 34 - 46 / 15  
Normal match 40 / 15

Standard examination  
 ABS = absolute matching range

Additional examination  
 REL = relative matching range (especially for acquired color vision deficiencies)

City, date: \_\_\_\_\_

Stamp, signature: \_\_\_\_\_

Anexo 4 Exemplo de uma folha de registo do teste de Ishihara.

NR da placa	Visão das cores normal	Deficiência vermelho/verde				Sem visão das cores	Resposta
		Proto		Deuta			
		Severo	Suave	Severo	Suave		
1	12					12	12
2	8					X	8
3	6					X	6
4	29					X	29
5	57					X	57
6	5					X	5
7	3					X	3
8	15					X	15
9	74					X	74
10	2					X	2
11	6					X	6
12	97					X	97
13	45					X	45
14	5					X	5
15	7					X	7
16	16					X	16
17	73					X	73
18	X					X	X
19	X					X	X
20	X					X	X
21	X					X	X
		Proto		Deuta			
		Severo	Suave	Severo	Suave		
22	26	6	(2)6	2	2(6)	X	26
23	42	2	(4)2	4	4(2)	X	42
24	35	5	(3)5	3	3(5)	X	35
25	96	6	(9)6	9	9(6)	X	96

Anexo 5 Imagens utilizadas durante o procedimento experimental

Imagem 1



Imagem 2

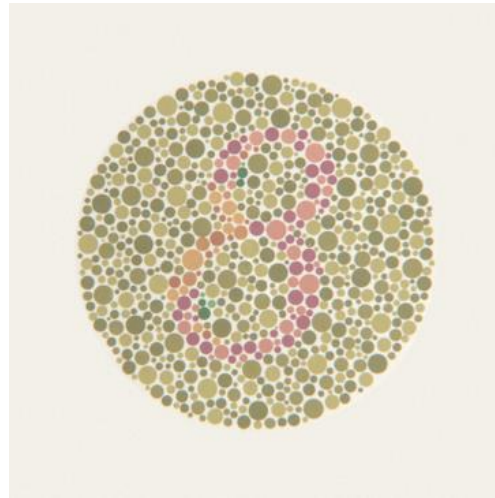


Imagem 5

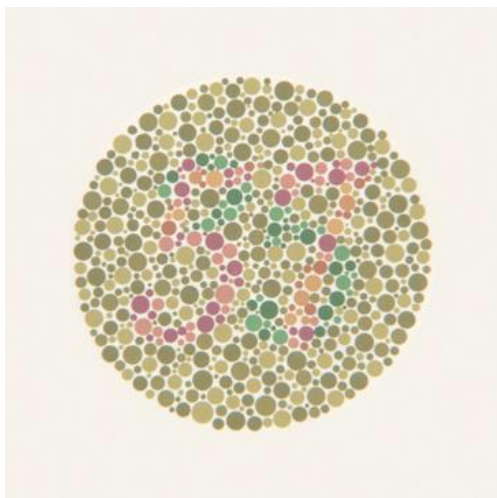


Imagem 6

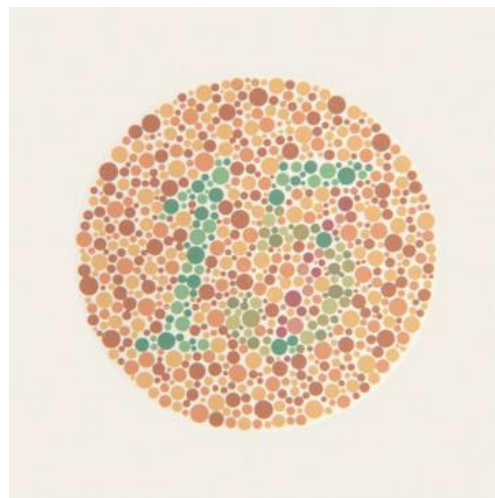


Imagem 7

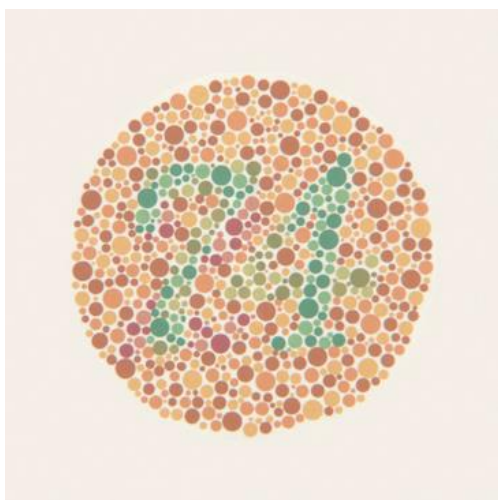


Imagem 9

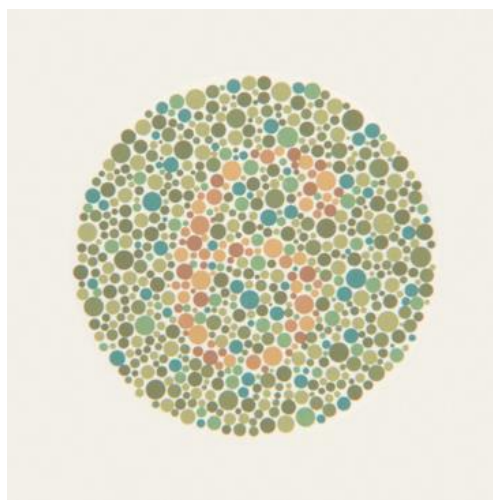


Imagem 10

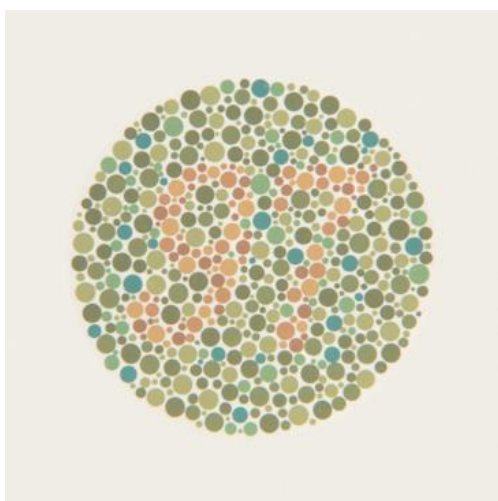


Imagem 12

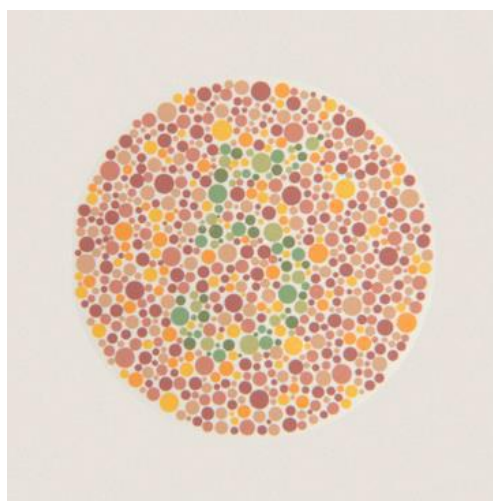


Imagem 14

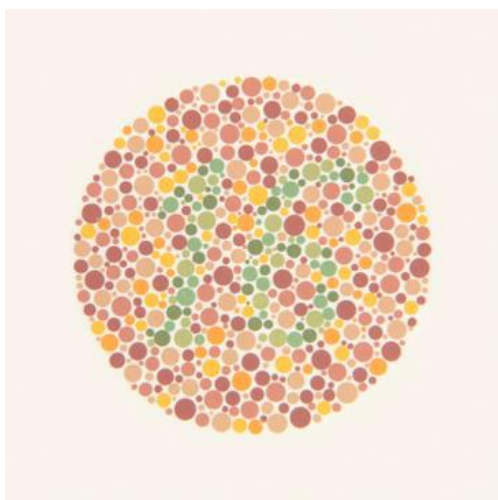


Imagem 17

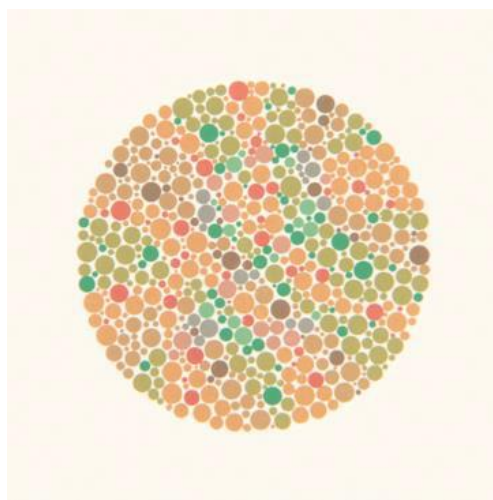


Imagem 18

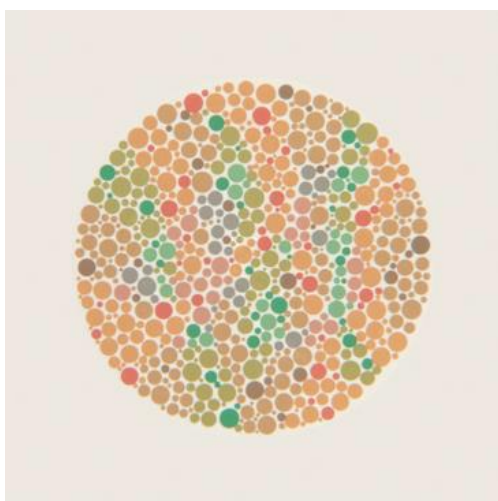


Imagem 22

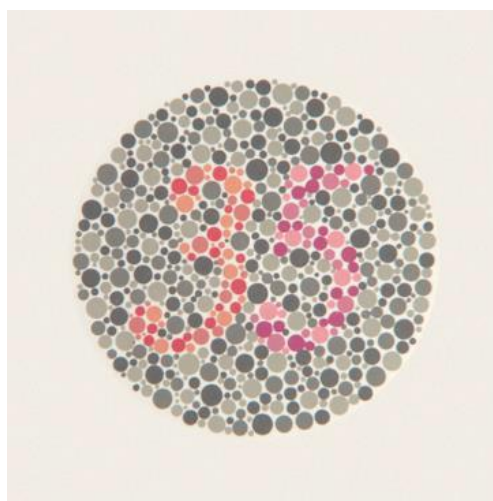
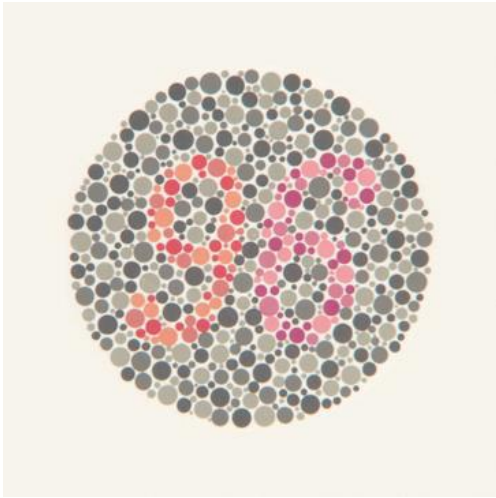


Imagem 23





## Anexo 6-Parcer da subcomissão de ética para as ciências da vida e da saúde



Universidade do Minho

SECVS

### Subcomissão de Ética para as Ciências da Vida e da Saúde

Identificação do documento: SECVS 175/2017

Título do projeto: *Caracterização espectral do corpo humano e estudo das suas aplicações*

Investigador(s) responsável: Sérgio Miguel Cardoso Nascimento, Departamento de Física da Escola de Ciências da Universidade do Minho; José Carlos Cardoso, Departamento de Dermatologia dos Hospitais da Universidade de Coimbra.

Subunidade científica: Laboratório de Ciências da Cor, Centro de Física, Escola de Ciências, Universidade do Minho.

Outras Unidades: Serviços de Medicina Geral e de Dermatologia dos Hospitais da Universidade de Coimbra que serão a principal fonte de participantes do estudo. Outras instituições, como hospitais e clínicas, poderão vir a ser consideradas para trabalhar em rede ou em alternativa aos Hospitais da Universidade de Coimbra, sempre que a totalidade das partes esteja de acordo, transferindo-se os termos deste protocolo de investigação para a relação com novos parceiros.

### PARECER

A Subcomissão de Ética para as Ciências da Vida e da Saúde (SECVS) analisou o processo relativo ao projeto intitulado *Caracterização espectral do corpo humano e estudo das suas aplicações*.

Os documentos apresentados revelam que o projeto obedece aos requisitos exigidos para as boas práticas na experimentação com humanos, em conformidade com o Guia para submissão de processos a apreciar pela Subcomissão de Ética para as Ciências da Vida e da Saúde.

Face ao exposto, a SECVS nada tem a opor à realização do projeto.

Braga, 30 de janeiro de 2018.

A Presidente

MARIA CECÍLIA DE  
LEMONS PINTO  
ESTRELA LEÃO

Assinado de forma digital por  
MARIA CECÍLIA DE LEMOS  
PINTO ESTRELA LEÃO  
Dados: 2018.01.30 13:06:42Z

Maria Cecília de Lemos Pinto Estrela Leão