

Universidade do Minho
Escola de Ciências

Alterações nas cores de uma pintura causada pelo verniz

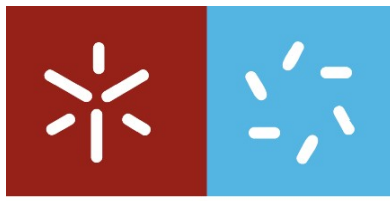
José Alexandre Rodrigues Monteiro

**Alterações nas cores de uma
pintura causada pelo verniz**

José Alexandre Rodrigues Monteiro

UMinho | 2019

Outubro de 2019



Universidade do Minho

Escola de Ciências

José Alexandre Rodrigues Monteiro

Alterações nas cores de uma
pintura causada pelo verniz

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Optometria Avançada

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor João Manuel Maciel Linhares

e

Professora Doutora Ana Maria dos Santos Bailão

Outubro 2019

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.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor João Linhares, pelo empenho e disponibilidade que demonstrou ao longo de todo o percurso, pela partilha de conhecimento e por ser um exemplo de profissionalismo.

À Professora Doutora Ana Bailão pela ajuda fundamental e pela disponibilidade que demonstrou.

Aos meus pais, irmãos e ao meu cunhado pelo apoio incondicional, por terem sido a melhor base que eu podia desejar para ser quem sou e por nunca desistirem de fazer o melhor para mim.

Ao meu afilhado que apesar de tenra idade sempre ajudou nos momentos de descontração.

À minha namorada que demonstrou paciência e compreensão nos momentos de maior tensão, por ter estado sempre presente quando mais precisei e por me incentivar a ser sempre a melhor versão de mim próprio.

Às minhas colegas de universidade Cláudia Borges, Ana Lacerda e Bruna Gomes pelo apoio e pela partilha de conhecimentos.

Às minhas colegas de trabalho por facilitarem os horários e pela compreensão.

A todos os professores e docentes que me auxiliaram na trajetória do conhecimento.

A todos os autores da literatura que foi utilizada na construção deste trabalho.

Um obrigado não chega...

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

Existe na literatura estudos que descrevem o efeito da camada protetora de pinturas artísticas, porém os estudos existentes recorrem a metodologias de elevada complexidade. Assim, está ainda por descrever se recorrendo a uma metodologia mais simples se consegue estimar o efeito que a camada protetora de uma pintura tem na perceção cromática de uma pintura, em particular após anos de envelhecimento e degradação.

O presente estudo tem como objetivo avaliar a eficácia de uma metodologia simplificada na obtenção de informação sobre a influência de uma camada protetora de pinturas e na sua utilização para a realização de um restauro virtual a partir das características espectrais específicas associadas à camada protetora de cada pintura. Foram utilizados dados espectrais de 6 pinturas pertencentes ao acervo da Faculdade de Belas-Artes de Lisboa obtidos com o sistema hiperespectral antes e após a remoção da camada protetora. Os dados espectrais foram convertidos em reflectância e posteriormente em coordenadas cromáticas no espaço CIELAB assumindo o iluminante CIE D65 e o Observador Padrão CIE 1931, com o intuito de comparar o volume, a área e o número de cores discerníveis antes e depois da remoção da camada protetora, para estimar a influência desta na pintura. Após determinado o efeito cromático da camada protetora específica de cada pintura, esta foi utilizada para estimar a simulação da pintura sem a camada protetora. Verificou-se que a metodologia proposta devolveu imagens virtuais com uma diferença de cor média, em relação às imagens originais obtidas após o restauro, no valor de $CIEDE = 4.08 \pm 1.51$ superior ao limite de deteção de $CIEDE = 2.2$ JND para o olho humano em imagens complexas. Se as diferenças de luminosidade forem ignoradas e estimando apenas diferenças cromáticas, a diferença de cor média de todas as pinturas desce para $CIEDE = 3.06 \pm 1.31$.

Este resultado parece demonstrar que a metodologia simplificada não se revela perfeita, mas que pode ser utilizada para avaliar as alterações cromáticas provocadas pelo restauro, assim como para obter rapidamente uma imagem simulada de uma pintura após o restauro para uma primeira observação.

Palavras Chave: Hiperespectral, Influência da camada protetora, Restauro virtual de pinturas

ABSTRACT

There are studies in the literature that describe the effect of the protective layer in artistic paintings, but these studies report methodologies of high complexity. Nevertheless, it is yet to know if using a simpler methodology it is possible to describe the effect of the protective layer on the chromatic perception of a painting, in particular after years of aging and degradation.

The purpose of the present study was to evaluate the efficiency of a simplified methodology used to get information about the influence of the protective layer of paintings and its use in the virtual restoration starting with the spectral characteristics of the protective layer of each painting. The spectral data of 6 paintings belonging to the collection of the Faculdade de Belas-Artes de Lisboa and acquired using a hyperspectral imaging system before and after the removal of the protective layer was used. The spectral data was then converted into reflectance and into CIELAB chromaticity coordinates afterwards, assuming the CIED65 illuminant and the CIE 1931 Standard Observer in order to compare the volume, the area and the number of discernible colours before and after removal of the protective layer, to estimate its influence on the painting. After estimating the effect of the protective layer of each painting, it was used to get a simulation of the painting without the protective layer. It was found that the methodology proposed returned virtual images with an average colour difference in relation to the original image obtained after the restoration of about $CIEDE = 4.08 \pm 1,51$, higher than limit of detection of $CIEDE=2.2$ JND of the human eye for a complex image. If lightness differences are ignored and only the chromatic differences estimated the average colour difference reduces to $CIEDE = 3.06 \pm 1.31$.

This result seems to indicate that the simplified methodology used here is not perfect. Nevertheless, it seems that it may be used to estimate the chromatic change induced by the restoration, as to obtain a first quick observation of a simulation of a painting after restauration.

Key words: hyperspectral system, Influence of the protective layer, virtual restoration of paintings.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	iii
Alterações nas cores de uma pintura causada pelo verniz.....	v
RESUMO.....	v
Changes in the colours of a painting detected by varnish	vi
ABSTRACT	vi
ÍNDICE.....	vii
ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xx
1. REVISÃO DA LITERATURA	1
1.1 Sistema Visual.....	1
1.1.1 Espectro.....	1
1.1.2 Estrutura ocular	2
1.1.3 Recetores da retina.....	6
1.2 Perceção das cores.....	9
1.2.1 Teorias da Visão das Cores	12
1.3 Funções de correspondência de cor	15
1.4 Iluminantes	18
1.5 Triestímulos	19
1.6 Cromaticidade	19
1.7 Espaço de cor	22
1.7.1 Espaço de cor CIELAB	22
1.8 Número de cores perceptíveis.....	24
1.9 Remoção do verniz	25
2. HIPÓTESE E OBJETIVO DE ESTUDO	28
2.1 Formulação do Problema	28

2.2	Hipóteses.....	28
2.3	Objetivo.....	29
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1	Tipo de estudo.....	30
3.2	Pinturas	30
3.3	Procedimento experimental	32
3.3.1	Estado de Conservação.....	32
3.3.2	Processo de Limpeza.....	33
3.3.3	Imagens Híperespectrais de Pinturas	35
3.3.4	Métodos de tratamento de imagem.....	36
3.3.5	Métricas utilizadas para avaliar a diversidade cromática	41
3.3.6	Determinação da influência da remoção da camada protetora.....	44
4.	RESULTADOS.....	48
4.1	Distribuição de cores em CIELAB antes e após o restauro.....	48
4.2	Alterações provocadas pela camada protetora nas métricas avaliadas	53
4.3	Reflectância por quadrantes antes e após o restauro	57
4.4	Efeito da camada protetora.....	60
4.5	Reflectâncias simuladas através do efeito da camada protetora.....	63
4.6	Estimativa da Diferença de cor a partir da distância Euclidiana.....	66
4.7	Simulação da remoção virtual da camada protetora	70
5.	Discussão de resultados.....	74
5.1	Análise das métricas propostas.....	75
5.2	Reflectância antes e após a remoção da camada protetora	82
5.3	Influência da camada protetora.....	84
5.4	Restauro Virtual	86
6.	Conclusões	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

%: percentagem

ΔE : distância Euclidiana

°: graus

μm : microns

cm: centímetros

mm: milímetros

nm: nanómetros

m: metros

km: quilómetros

cd: candelas

CIE: *Commission Internationale de l'Éclairage* (Francês) – Comissão Internacional da Iluminação (Português)

CMF: *colour-matching-function* (Inglês) – funções de correspondência cromática (Português)

CSL: *Colour Science Lab* (Universidade do Minho, Braga, Portugal)

CIELAB: espaço de cor definido pela CIE

CIE (a^*, b^*): projeção bidimensional do espaço de cor definido pela CIE

L: luminosidade no espaço de cor CIELAB da CIE

a^*, b^* : coordenadas cromáticas do espaço de cor CIELAB da CIE
CIE RGB: *Red-Green-Blue* (Inglês) - Vermelho-Verde-Azul (Português)

γ : gama

JND: diferença de cores discerníveis

IV: radiação infravermelha

UV: radiação ultravioleta

V_i: Influência da camada protetora

R_a : Reflectância após a remoção da camada protetora

R_b : Reflectância antes a remoção da camada protetora

R_{as} : Reflectância da simulação da remoção virtual da camada protetora

Var.: Variação

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Um feixe de luz solar entra numa câmara escura através do orifício F e depois atravessa o prisma ABC. Os raios refratados pelo prisma passam através do orifício H e a luz que atinge a superfície branca seguinte vai apresentar feixes de luzes coloridos ordenados, vermelho em t , amarelo em s verde em r azul em q e violeta em p . (Adaptado de [3]).....	1
Figura 1.2 Espectro eletromagnético com as diferentes gamas representadas incluindo uma representação pormenorizada do espectro da luz visível (Adaptado de [5])	2
Figura 1.3 Representação de uma secção do globo ocular ao nível do nervo ótico. (Adaptado de [6])	3
Figura 1.4 Representação esquemática da focagem da luz em situação de repouso, em processo de acomodação e alterações provocadas nas estruturas oculares. a) Raios de luz vindo de um objeto a mais de 6m b) e c) Raios oriundos de um objeto próximo e processo de focagem dos mesmos na retina. (Adaptado de [2])	4
Figura 1.5 Funcionamento das íris e o seu efeito no tamanho da pupila (Adaptado de [7])	5
Figura 1.6 Fotomicrografia a) Secção vertical da retina central humana b) Secção vertical da retina periférica humana. (Adaptado de [9]).....	5
Figura 1.7 Visualização por electro-micrografia dos cones e bastonetes na retina de um primata (Adaptado de [11])	6
Figura 1.8 Curvas de sensibilidade espectral dos bastonetes (R), cones sensíveis a comprimentos de onda curtos (S), médios (M) e longos (L). (Adaptado de [2])	8
Figura 1.9 Distribuição dos fotorreceptores em quatro indivíduos com visão das cores normal. Cones L representados a vermelho, cones M e S representados a verde e azul respetivamente (Adaptado de [16])	9
Figura 1.10 Representação dos quatro fenómenos óticos relacionados com a luz: absorção, reflexão, transmissão e refração, com a lâmpada a representar a fonte de luz.	9

Figura 1.11 Processo de mistura aditiva. Uma luz azul de comprimentos de onda curtos e uma luz amarela de comprimentos de onda médios e longos, resultam em uma luz branca composta por todos os comprimentos de onda. (Adaptado de [2]).....	10
Figura 1.12 Processo de mistura subtrativa. A letra L representa os comprimentos de onda longos, M e S representam os comprimentos de onda médios e curtos, respetivamente. A letra m representa os comprimentos de onda médios resultantes da reflexão seletiva. (Adaptado de [2])	11
Figura 1.13 Representação gráfica dos três atributos básicos para a perceção de uma cor (Adaptado de [20])	12
Figura 1.14 Experiência que veio reforçar a teoria tricromática. Um observador ajusta as quantidades dos 3 primários com comprimentos de onda distintos até fazer corresponder com a cor de teste. (Adaptado de [2]).....	12
Figura 1.15 Diagrama representativo das cores oponentes (Adaptado de [21])	14
Figura 1.16 Esquema que representa a fusão de ambas as teorias de visão das cores. (Adaptado de [2])	15
Figura 1.17 Color Matching Functions representando $\bar{r}(\lambda)$ a vermelho, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ a verde e azul respetivamente. (Adaptado de [4])	16
Figura 1.18 Color Matching Functions dos novos primários X, Y e Z de 1931 da CIE (linha preenchida) e color matching functions de 1964 da CIE (linha tracejada) (Adaptado de [4]).....	17
Figura 1.19 Iluminantes padrões propostos pela CIE em 1931 e 1964. (Adaptado de [23])	18
Figura 1.20 Diagrama de cromaticidade x, y da CIE 1931. O triângulo representa o espaço cromático obtido com os primários R,G e B. (Adaptado de [25])	20
Figura 1.21 Diagrama x, y e o diagrama u', v' , com linhas representativas de uma pequena diferença de cor equivalente em ambos os diagramas. (Adaptado de [4])	21
Figura 1.22 Representação do espaço de cor CIELAB. (Adaptado de [27])	23

Figura 1.23 Corte de um círculo JND referente ao estímulo R (Adaptado de [29]).	24
Figura 1.24 Imagem 3D representativa do cubo que estaria dentro de uma esfera JND centrada em A. Os 8 cantos distinguíveis entre si, mas indistinguíveis de A (Adaptado de [29])	25
Figura 1.25 Diagrama representativo da pintura (substrato do pigmento mais aglutinante) coberto por uma camada protetora envelhecida à esquerda, transparente fresco à direita e sem camada protetora no centro. (Adaptado de [25])	26
Figura 1.26 Diagrama representativo das várias interações da luz com a pintura e a camada protetora (Adaptado de [27])	26
Figura 1.27 Diagrama representativo da interação da luz com a camada protetora e pintura com as fórmulas associadas a cada fenómeno (Adaptado de [27])	27
Figura 3.1 Telas da autoria de Adriano Sousa Lopes e a Cópia de <i>Infanta</i> (Adaptado de [37])	32
Figura 3.2 Testes de limpeza realizadas numa pintura com 6 TriSolv® ((Adaptado de [37])	34
Figura 3.3 Processo de limpeza de uma pintura. Teste das soluções de limpeza na imagem mais à esquerda. Limpeza com acetona gelificada na imagem central. Limpeza da sujidade com água e surfactante na imagem mais à direita. (Adaptado de [37])	34
Figura 3.4 Processo de alinhamento de imagem com Matlab para a tela <i>Tronco nu masculino sentado</i> . Fase do processo onde manualmente se identifica detalhes comuns na imagem da pintura antes e após a remoção da camada protetora.	37
Figura 3.5 Processo de registo de imagem com Matlab para <i>Tronco nu masculino sentado</i> . Ponto de verificação onde é avaliado o ajuste entre a imagem antes do restauro (a verde) e após o restauro (a magenta).	38
Figura 3.6 Processo de alinhamento de imagem com Matlab para <i>Tronco nu masculino sentado</i> . “Checkerboard”, processo no qual verificamos a continuidade da imagem através dos diferentes quadrados. Quadrados ímpares e pares representam a imagem antes e depois do restauro. ...	38

Figura 3.7 Verificação em três comprimentos de onda de forma a verificar a independência das aberrações provocadas pelo sistema. Em a) verificação no comprimento de onda 550nm em b) e c) 430nm e 700nm respetivamente.....	39
Figura 3.8 Ilustração da área de corte comum de uma pintura de forma a ajustar o tamanho das duas imagens, antes de depois do restauro.....	40
Figura 3.9 Imagem representativa do desenvolvimento do processo de alinhamento de imagem. As imagens superiores representam uma primeira tentativa e os maus resultados obtidos nas verificações. As imagens inferiores representam as mudanças de critérios e os melhores resultados obtidos.....	41
Figura 3.10 Volume cromático no espaço de cor CIELAB da pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i>	42
Figura 3.11 Área Cromática no espaço CIE(a^* , b^*) da pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i>	43
Figura 3.12 Representação em CIE(a^* , b^*) da divisão do gamut de cores em quadrados para contabilizar o número de cores discerníveis. O processo para CIELAB é idêntico, mas considerando a terceira dimensão e a divisão feita em cubos.	44
Figura 3.13 Cores discerníveis de uma pintura representadas no espaço de cores CIE(a^* , b^*) com diferentes cores representando os diferentes quadrantes assumidos neste estudo.....	45
Figura 4.1 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i>	48
Figura 4.2 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura <i>Cerco de Lisboa</i>	49
Figura 4.3 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura <i>Senhora de Chapéu</i>	50
Figura 4.4 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i>	50

Figura 4.5 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i>	51
Figura 4.6 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura cópia de <i>Infanta</i>	52
Figura 4.7 Resultado das variações correspondentes de cada parâmetro para cada pintura. Valores abaixo de zero representam uma diminuição, valores acima de zero representam um aumento.	53
Figura 4.8 Média da reflectância por quadrante para a pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i> . Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.....	57
Figura 4.9 Média da reflectância por quadrante para a pintura <i>Cerco de Lisboa</i> . Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.....	57
Figura 4.10 Média da reflectância por quadrante para a pintura <i>Senhora de Chapéu</i> . Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.....	58
Figura 4.11 Média da reflectância por quadrante para a pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i> . Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.....	58
Figura 4.12 Média da reflectância por quadrante para a pintura cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i> . Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.....	59
Figura 4.13 Média da reflectância por quadrante para a pintura cópia de <i>Infanta</i> . Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.....	59
Figura 4.14 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i>	60

Figura 4.15 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura <i>Cerco de Lisboa</i>	61
Figura 4.16 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura <i>Senhora de Chapéu</i>	61
Figura 4.17 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i>	62
Figura 4.18 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura Cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i>	62
Figura 4.19 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura cópia de <i>Infanta</i>	63
Figura 4.20 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i>	64
Figura 4.21 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura <i>Cerco de Lisboa</i>	64
Figura 4.22 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura <i>Senhora de Chapéu</i>	64
Figura 4.23 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i>	65
Figura 4.24 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada	

protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i>	65
Figura 4.25 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura cópia de <i>Infanta</i>	65
Figura 4.26 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i> entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^*,b^*).....	67
Figura 4.27 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura <i>Cerco de Lisboa</i> entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^*,b^*).	67
Figura 4.28 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura <i>Senhora de Chapéu</i> entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^*,b^*).	68
Figura 4.29 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i> entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^*,b^*).....	69
Figura 4.30 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i> entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^*,b^*).	69
Figura 4.31 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura cópia de <i>Infanta</i> entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^*,b^*).	70
Figura 4.32 Representação da pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i> antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.	71

Figura 4.33 Representação da pintura <i>Senhora de Chapéu</i> antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.	71
Figura 4.34 Representação da pintura <i>Cerco de Lisboa</i> antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.	72
Figura 4.35 Representação da pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i> antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.	72
Figura 4.36 Representação da pintura cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i> antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.	73
Figura 4.37 Representação da pintura cópia de <i>Infanta</i> antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.	73
Figura 5.1 Representação da seleção dos pontos não representativos da pintura no espaço de cor CIELAB. Pontos vermelhos representam todas as coordenadas da pintura, os círculos azuis rodeiam todas as coordenadas que representam um número maior ou igual a dois pixéis.	79
Figura 5.2 Representação da seleção dos pontos não representativos da pintura no espaço de cor CIE(a^* , b^*). Pontos vermelhos representam todas as coordenadas da pintura, os círculos azuis rodeiam todas as coordenadas que representam um número maior ou igual a dois pixéis.	79
Figura 5.3 Alterações das variações da área e do volume quando retirados os artefactos.....	80
Figura 5.4 Variações dos parâmetros analisados com a remoção das cores não representativas das pinturas. Valores abaixo de zero representam uma diminuição, valores acima de zero representam um aumento.	82
Figura 5.5 Média das reflectâncias por quadrante da tela <i>Senhora do Chapéu</i> com a representação das cores para visualização associada aos comprimentos de onda (cores aproximadas).	84

Figura 5.6 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante, da pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i> , com a divisão dos valores no valor de reflectância 1 e a sua explicação.	85
Figura 5.7 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1904 à direita, para a pintura <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i>	88
Figura 5.8 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura <i>Cerco de Lisboa</i>	89
Figura 5.9 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura <i>Senhora de Chapéu</i>	89
Figura 5.10 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1904 à direita, para a pintura <i>Tronco nu masculino sentado</i>	89
Figura 5.11 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i>	90
Figura 5.12 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura cópia de <i>Infanta</i>	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*,b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com <i>Var</i> representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela de <i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i>	54
Tabela 4.2 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*,b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com <i>Var</i> representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela <i>Cerco de Lisboa</i>	54
Tabela 4.3 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*,b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com <i>Var</i> representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela <i>Senhora de Chapéu</i>	55
Tabela 4.4 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*,b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com <i>Var</i> representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a <i>Tronco nu masculino sentado</i>	55
Tabela 4.5 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*,b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com <i>Var</i> representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela Cópia do <i>Retrato de Carlos I de Inglaterra</i>	56
Tabela 4.6 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*,b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com <i>Var</i> representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela Cópia de <i>Infanta</i>	56
Tabela 5.1 Percentagens relativas do 1º e 4º quadrante em relação à totalidade da pintura.....	74

Tabela 5.2 Tabela com o valor da área e do volume antes e depois da remoção da camada protetora e com e sem os artefactos, e as correspondentes variações em percentagem..... 81

1. REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Sistema Visual

1.1.1 Espectro

Do espectro eletromagnético que atinge a superfície terrestre apenas uma pequena parte é utilizada na visão humana. Essas ondas eletromagnéticas são caracterizadas pelo seu comprimento de onda e pela sua frequência [1]. O comprimento de onda é a distância que vai de um pico ao outro de uma onda eletromagnética [2] e a frequência o número de vezes que os picos ocorrem num certo intervalo de tempo. A unidade do comprimento de onda é o nanômetro que é 10^{-9} metros.

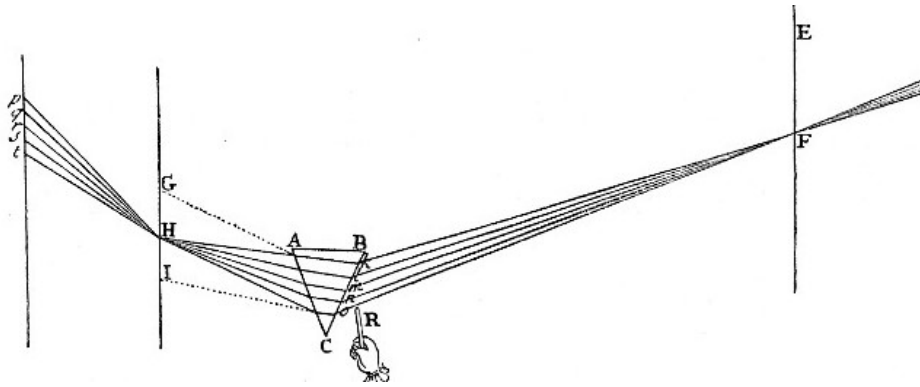


Figura 1.1 Um feixe de luz solar entra numa câmara escura através do orifício F e depois atravessa o prisma ABC. Os raios refratados pelo prisma passam através do orifício H e a luz que atinge a superfície branca seguinte vai apresentar feixes de luzes coloridos ordenados, vermelho em *t*, amarelo em *s*, verde em *r*, azul em *q* e violeta em *p*. (Adaptado de [3])

Isaac Newton, em 1666, realizou uma experiência onde se observou a decomposição da luz branca num conjunto ordenado de cores. Na Figura 1.1 está esquematizada a experiência de Newton que ao fazer um feixe de luz branca atravessar um prisma, constatou que a mesma se decompõe em feixes ordenados de luz colorida, concluindo assim que a luz branca era composta por todas aquelas componentes coloridas. Quando um desses feixes coloridos atravessava novamente um prisma permanecia exatamente com a mesma cor, não havendo novamente uma separação dos componentes [3].

Quando fez o espectro de cor passar na sua totalidade por um segundo prisma invertido voltou a obter luz branca [1], [4].

Sendo assim a luz branca é uma luz policromática, constituída pela combinação dos feixes de luz apresentados, sendo eles por consequente feixes de luz monocromáticos [1].

Ao decompor um feixe de luz solar é observado um espectro muito amplo. Usualmente esse espectro é dividido em três gamas: gama de radiações ultravioleta (UV), gama de radiação infravermelha (IV) e a gama do visível. A IV tem comprimentos de onda maiores que o espectro visível e as UV tem comprimentos de onda menores que o espectro visível [4]. A zona do espectro que é visível para o sistema visual humano está confinada a uma faixa entre os 380nm e os 780nm [1]. Os limites dos comprimentos de onda para cada cor no espectro do visível são tidos como valores aproximados, pois cada cor funde-se gradualmente com a cor seguinte, como representado na Figura 1.2. Quando observado o espectro resultante da dispersão de uma fonte de luz branca, a cor observada em cada feixe vai depender das condições de visualização e do observador [4].

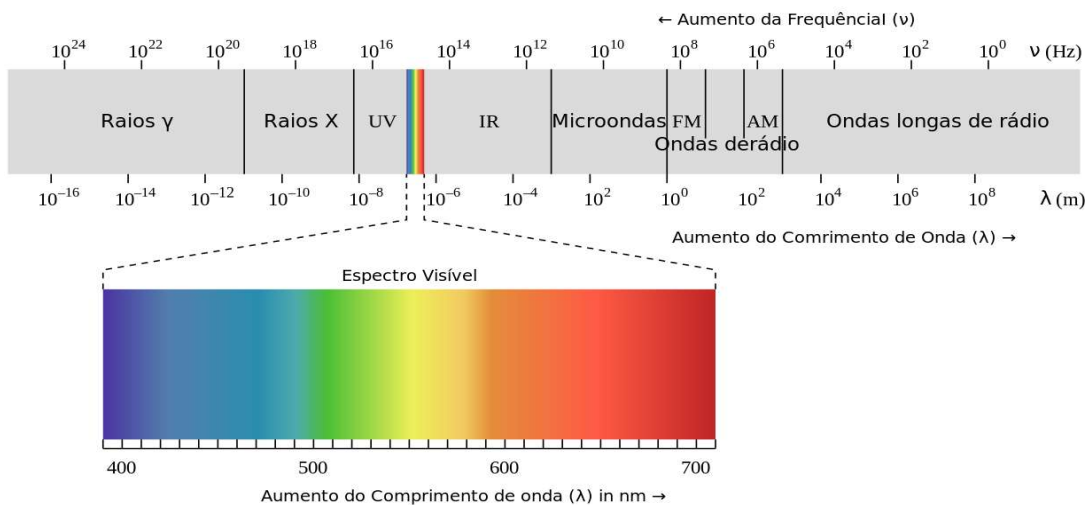


Figura 1.2 Espectro eletromagnético com as diferentes gamas representadas incluindo uma representação pormenorizada do espectro da luz visível (Adaptado de [5])

1.1.2 Estrutura ocular

Na Figura 1.3 estão ilustrados parte dos componentes essenciais para o processo visual. No sistema visual os componentes tidos como essenciais para que os raios de luz

cheguam à retina e contribuam para a formação de imagens são: a lágrima, as pálpebras, a córnea, a íris, o cristalino, a retina, a coroide e a esclera [1].

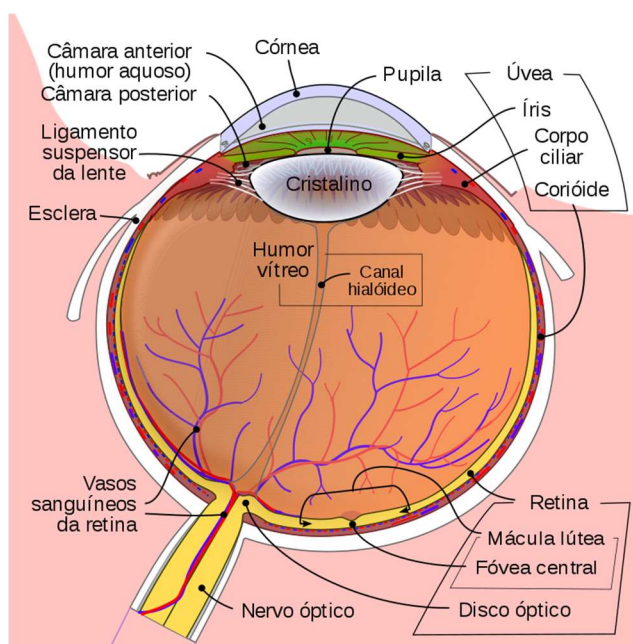


Figura 1.3 Representação de uma secção do globo ocular ao nível do nervo ótico. (Adaptado de [6])

O poder ótico do olho provém da diferença dos índices de refração e da curvatura da córnea e do cristalino. A córnea é tida como uma lente de valor fixo, responsável por 80% do poder dióptrico do olho, já o cristalino é tido como uma lente que pode alterar o poder dióptrico consoante a posição a que se encontra o estímulo visual, sendo responsável pelos restantes 20% [4].

Como ilustrado na Figura 1.4 a) quando o olho fixa um objeto distante, e por distante assume-se distar mais de 20 pés (6m), os raios entram no sistema visual essencialmente paralelos e, em condições normais, o sistema ótico do olho foca a imagem na retina. Se o objeto se aproximar os raios refletidos pelo objeto entram no sistema visual com uma maior divergência. O poder dióptrico dos restantes elementos não é suficiente e, assim sendo, o músculo ciliar vai relaxar, o cristalino vai aumentar a sua curvatura e espessura, resultando num aumento do poder dióptrico do mesmo e conseqüentemente um aumento do poder dióptrico do olho levando a que os raios se foquem na retina [2]. Este processo é denominado de acomodação.

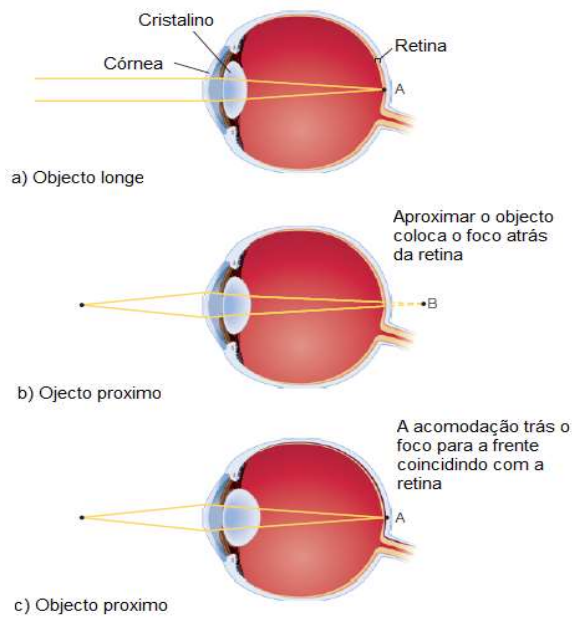


Figura 1.4 Representação esquemática da focagem da luz em situação de repouso, em processo de acomodação e alterações provocadas nas estruturas oculares. a) Raios de luz vindo de um objeto a mais de 6m b) e c) Raios oriundos de um objeto próximo e processo de focagem dos mesmos na retina. (Adaptado de [2])

O sistema visual também possui um mecanismo de controlo da entrada de luz no interior do globo ocular, de forma a que o excesso de luz ou a sua falta não prejudique a captação da luz pela retina. A estrutura anatómica responsável por essa função é a íris.

A íris é uma estrutura ocular física, mas adaptável, que controla a quantidade de luz que entra no sistema visual humano. Numa situação com elevada quantidade de luz, a pupila vai contrair de forma a reduzir a quantidade de luz que entra no sistema visual, impedindo que o excesso de luz dificulte o processo visual. Na situação oposta, num ambiente com pouca luminosidade o sistema visual precisa de obter o máximo de luz possível. Para otimizar o processo visual, então a pupila vai dilatar. Na Figura 1.5 está ilustrado o funcionamento da íris e os músculos envolvidos. A íris altera o seu tamanho para facilitar o processo visual, aumenta e diminui consoante a luminosidade exterior e controla assim a quantidade de luz que a atravessa [7].

Quando a íris contrai aumenta o seu tamanho e reduz o diâmetro da pupila, esta modificação vai aumentar a profundidade de campo. Quanto menor o tamanho da íris

consequentemente menor a profundidade de campo, ou seja, a íris não só controla a entrada de luz no sistema visual como influencia a capacidade de focagem do sistema visual [2].

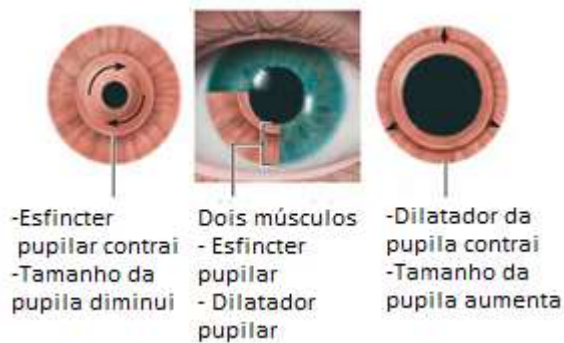


Figura 1.5 Funcionamento das íris e o seu efeito no tamanho da pupila (Adaptado de [7])

Após a passagem da luz através da lágrima, córnea, humor aquoso, íris, cristalino e humor vítreo, a luz alcança a retina onde ocorre a transdução. A transdução é o processo de transformação de uma forma de energia, em outra forma de energia. No sistema visual este processo consiste na captura de fótons e a sua transdução para um sinal nervoso. As células responsáveis pela fototransdução são os fotorreceptores, os sensores do sistema visual [2], [8].

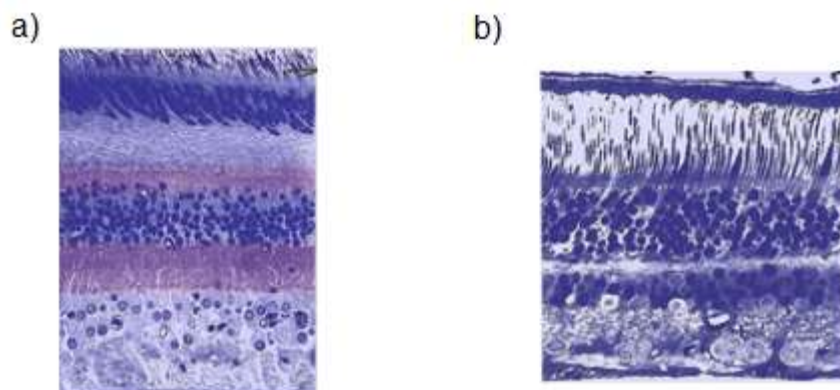


Figura 1.6 Fotomicrografia a) Secção vertical da retina central humana b) Secção vertical da retina periférica humana. (Adaptado de [9])

A retina é usualmente dividida em retina central e retina periférica. A retina central é aproximadamente um círculo de 6mm de diâmetro centrado na fóvea. A retina periférica estende-se dos limites da retina central até à ora serrata (zona de ligação entre a retina e o corpo ciliar). As duas partes da retina têm diferenças anatómicas como ilustrado na Figura

1.6. A retina central tende a ser mais espessa que a retina periférica devido a um maior número de fotorreceptores, essencialmente cones e as estruturas associadas.

Realizando um corte histológico na retina podemos identificar três camadas de corpos celulares nervosos e duas camadas de sinapses nervosas. A camada nuclear mais externa contém os corpos celulares dos fotorreceptores, onde são absorvidos os fótons. Na camada nuclear interna encontramos as células bipolares, horizontais e amácrinas, a terceira camada contém as células ganglionares [8], [9].

1.1.3 Recetores da retina

A camada que contém os fotorreceptores é a mais externa. De forma a otimizar o processo visual, na fóvea, as células retinianas neurais estão inclinadas tendencialmente para a periferia, principalmente na foveola, para que a luz que chega à foveola seja captada pelos fotorreceptores sem ser difundida por outra estrutura retiniana [10].



Figura 1.7 Visualização por electro-micrografia dos cones e bastonetes na retina de um primata (Adaptado de [11])

Os cones e os bastonetes são os fotorreceptores presentes na retina que contribuem para a visão. Têm uma organização da sua estrutura semelhante, sendo compostos por um segmento externo, segmento interno e uma terminação sináptica. Os cones e os bastonetes são principalmente distinguíveis pela forma do seu segmento externo como podemos observar na Figura 1.7 [10], [11].

Os bastonetes são fotorreceptores que atuam sob condições de pouca luminosidade, ou seja, em condições de visão escotópica e por vezes mesópica, ficando saturados em condições de luminosidade superiores e por isso, incapazes de continuar a contribuir para a

formação da visão. São altamente sensíveis, tendo o seu máximo de absorção na zona dos azuis-verdes. Por sua vez os cones são fotorreceptores que são ativados em condições de média e alta luminosidade, em visão mesópica e fotópica e o seu máximo de absorção vai depender do tipo de cone. Em condições de visão mesópica tanto os cones como os bastonetes funcionam em simultâneo. O primeiro passo do processo visual é a absorção de luz num pigmento fotossensível [4], [12].

O pigmento visual ou fotossensível é composto principalmente por duas partes: opsina, uma proteína com grande dimensão, e por um retinol uma proteína com dimensões menores, mas sensível à luz. Apenas com a combinação destas duas partes é possível o pigmento visual conseguir absorver o fóton e produzir uma energia metabólica [2].

O pigmento visual tem a capacidade de alterar a sua forma. Se o sistema se encontra em escuridão, o retinol mantém-se fletido, quando o pigmento absorve um fóton, o retinol estende-se, esta mudança de forma denomina-se por isomerização, que vai criar uma reação química em cadeia produzindo uma percepção luminosa [2].

A retina humana tem em média aproximadamente 110 milhões de bastonetes localizados por toda a retina, mas com uma menor presença na fóvea e mesmo inexistentes na foveola. Os aproximadamente 6,4 milhões de cones estão localizados na sua maioria em toda a mácula, mas em maior número na foveola [8].

Dependendo da sua estrutura, os fotorreceptores vão ter sensibilidades diferentes. Na retina temos 4 tipos de fotorreceptores que contribuem para a visão, todos se baseiam no retinol combinado com uma opsina, distinguindo-se por terem opsinas específicas [13].

Devido às diferentes sensibilidades que os cones podem apresentar, é possível subdividir em três tipos, os cones sensíveis aos comprimentos de onda longos (L), comprimentos de onda médios (M) e comprimentos de onda curtos (S, do Inglês *short*), com os seus picos máximos de absorção em 567nm, 535nm e 415nm, respetivamente, como representado na Figura 1.8 [13].

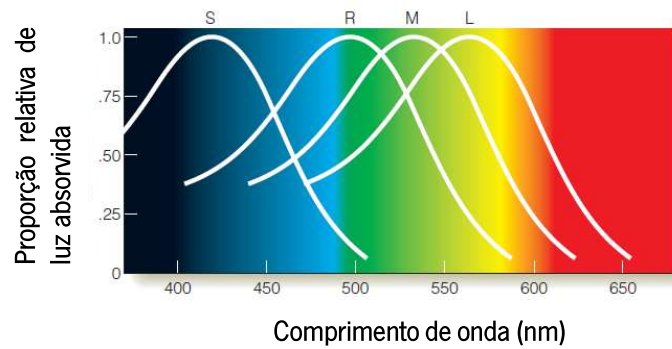


Figura 1.8 Curvas de sensibilidade espectral dos bastonetes (R), cones sensíveis a comprimentos de onda curtos (S), médios (M) e longos (L). (Adaptado de [2])

Se o sistema visual só obtivesse informação de uma função de sensibilidade espectral, não poderia por si só fornecer uma base para a visão das cores, uma vez que o sistema não seria capaz de distinguir mudanças de comprimento de onda de mudanças de intensidade de um mesmo comprimento de onda [1], [4], [14].

Nos cones de tipo L são encontrados variantes do pigmento, mas todos com o seu pico de sensibilidade entre os 550 e 560nm. A mesma variabilidade também é encontrada nos cones de tipo M, com um pico de sensibilidade entre os 530 e 536nm. Esta variação não é tão notória nos cones S que têm o seu pico de sensibilidade nos 415nm [4], [14], [15].

Com três tipos de cones, e processando a informação recolhida pelos três, o sistema visual é capaz de detetar diferenças de comprimentos de onda e intensidades. Uma luz com um certo comprimento de onda, vai desencadear uma resposta nos três tipos de cones e modelar a força da resposta produzida por cada cone, de forma a produzir uma sensação de cor final [4].

A distribuição dos cones na retina não é regular, apesar de em algumas retinas se verificar uma aglomeração de cones do mesmo tipo [4], [15]. Os cones S estão presentes em menor percentagem e geralmente com uma distribuição regular entre os cones L e M [15]. A relação média entre os tipos de cones é uma proporção de 40 para 20 para 1 entre os cones L, M e S respetivamente [4].

Na Figura 1.9 estão representadas porções de 4 retinas com diferentes distribuições e proporções de cones L (vermelho), M (verde) e S (azul), mas que não inviabiliza a capacidade de os indivíduos terem uma visão das cores normal [16].

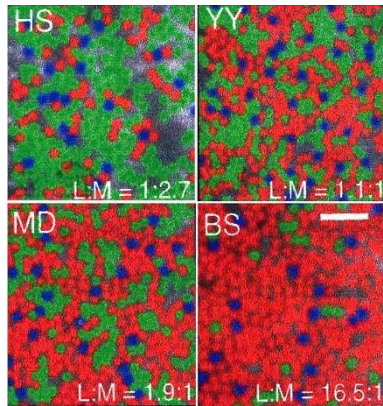


Figura 1.9 Distribuição dos fotorreceptores em quatro indivíduos com visão das cores normal. Cones L representados a vermelho, cones M e S representados a verde e azul respetivamente (Adaptado de [16])

1.2 Perceção das cores

É possível com os termos azul, verde, amarelo e vermelho descrever todas as cores que conseguimos perceber. Considerando estas quatro cores como cores puras ou cores únicas, através das mesmas é possível criar as restantes cores. O ser humano tem a capacidade de discriminar cerca de 2 milhões de cores em imagens de cenas naturais [17], [18].

A cor é muitas vezes associada à propriedade física do comprimento de onda. Aos comprimentos de onda de 700 a 620nm associa-se a cor vermelha, 590 a 575nm amarela, 575 a 500nm verde e de 500 a 450nm azul.

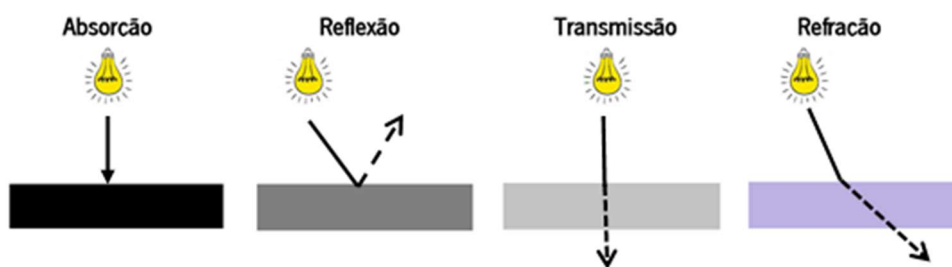


Figura 1.10 Representação dos quatro fenómenos óticos relacionados com a luz: absorção, reflexão, transmissão e refração, com a lâmpada a representar a fonte de luz.

Na interação entre a luz e um objeto opaco, as cores que percebemos desse objeto estão relacionadas com os comprimentos de onda refletidos pelo objeto [2]. Quando a luz alcança um objeto podem essencialmente ocorrer quatro processos, reflexão, transmissão, absorção e refração, apesar da ocorrência destes processos depender das propriedades do material, como

ilustrado na Figura 1.10. Dependendo das propriedades do objeto, pode acontecer um dos fenômenos isolados ou várias combinações entre eles.

Na situação de um objeto opaco, cores como o azul são percebidas quando há uma reflexão seletiva, todos os comprimentos de onda são absorvidos, exceto o da cor azul. Cores como o branco, cinza e preto ocorrem quando a luz é refletida numa quantidade sensivelmente uniforme por todo o espectro, variando só a luminância. A maioria das cores são criadas pela reflexão seletiva de comprimentos de onda [2].

Quando se trata de objetos translúcidos como líquidos, plásticos e vidros, a cor é criada pela transmissão seletiva. Em vez de haver a percepção da cor correspondente ao comprimento de onda que é refletido pelo objeto, temos a percepção da cor correspondente ao comprimento de onda que é transmitido pelo objeto [2].

Em muitas situações do quotidiano não estamos na presença de um só comprimento de onda, mas de vários. Esses componentes vão produzir um estímulo colorido, capaz de ser percebido, através de dois métodos: misturas aditivas e mistura subtrativas.

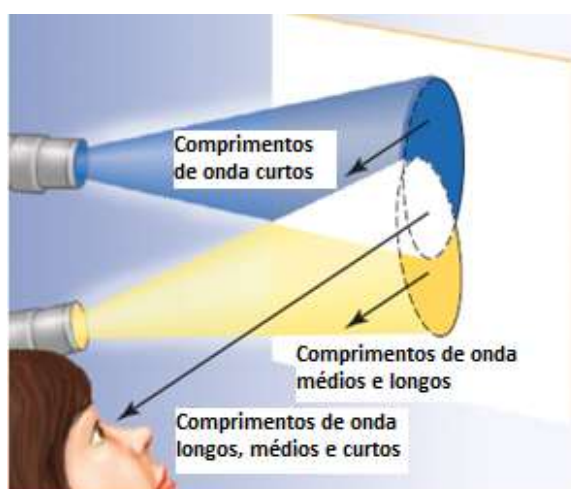


Figura 1.11 Processo de mistura aditiva. Uma luz azul de comprimentos de onda curtos e uma luz amarela de comprimentos de onda médios e longos, resultam em uma luz branca composta por todos os comprimentos de onda. (Adaptado de [2])

As misturas aditivas consistem como o próprio nome indica na soma dos comprimentos de onda envolvidos. Por exemplo, se forem projetados numa folha branca dois feixes de luz, um azul resultante de comprimentos de onda curtos e um outro amarelo resultante de comprimentos

de onda longos e médios, na zona onde os feixes de luz coincidem a cor resultante será branca, devido à soma dos comprimentos de onda curtos da luz azul, com os comprimentos de onda médios e longos da luz amarela, como ilustrado na Figura 1.11 [2], [13], [19].

Na Figura 1.12 está representado uma mistura de cores subtrativa com duas tintas, uma azul e uma amarela. Para existir a percepção que a tinta é azul, o material está a absorver comprimentos de onda longos e médios (não totalmente) e a refletir os comprimentos de onda curtos e alguns médios. Para haver a percepção da cor amarela, o material vai absorver os comprimentos de onda curtos e refletir os comprimentos de onda médios e longos. A mistura das duas tintas resulta na percepção da cor verde, resultante de comprimentos de onda médios. Isto verifica-se porque com a adição da tinta azul à tinta amarela, os comprimentos de onda que são refletidos são os comprimentos de onda médios, os restantes são absorvidos por uma das tintas da mistura [2], [13], [19].

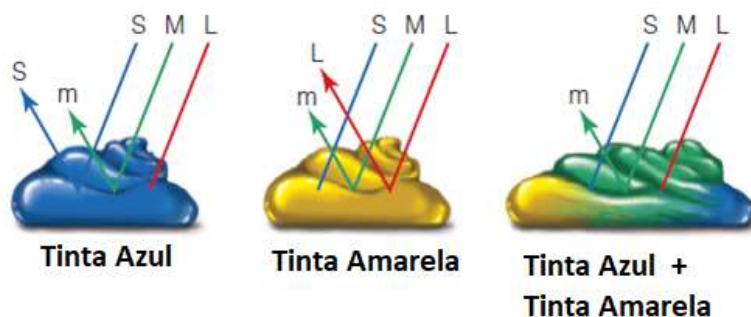


Figura 1.12 Processo de mistura subtrativa. A letra L representa os comprimentos de onda longos, M e S representam os comprimentos de onda médios e curtos, respetivamente. A letra m representa os comprimentos de onda médios resultantes da reflexão seletiva. (Adaptado de [2])

Quando nos referimos ao caso específico de pinturas, referimo-nos a uma percepção cromática que resulta de processos subtrativos.

No processo de percepção das cores existem três características básicas: luminosidade, saturação e cor como representado na Figura 1.13. A intensidade do estímulo vai determinar a luminosidade, a cor vai representar a tonalidade do estímulo e a saturação vai representar uma quantidade maior ou menor de cor que o estímulo vai apresentar [4], [20].

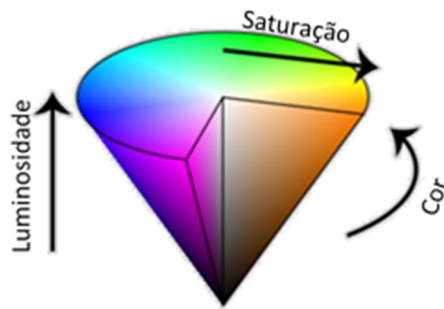


Figura 1.13 Representação gráfica dos três atributos básicos para a percepção de uma cor (Adaptado de [20])

1.2.1 Teorias da Visão das Cores

❖ Teoria Tricromática

Organismos com uma visão das cores baseada na tricromacia são chamados tricromatas.

A teoria tricromática de visão das cores assenta no pressuposto da atividade de três fotorreceptores diferentes, foi proposta no século XIX por Thomas Young e Hermann von Helmholtz [2], [14].

Thomas Young propôs a teoria da tricromacia, sugerindo que os diferentes comprimentos de onda estimulavam três tipos de fibras nervosas da retina em diferentes graus. A teoria na época não gerou grande impacto até que Helmholtz, após 50 anos, voltou a reavivar a teoria tricromática.

Maxwell demonstrou que qualquer cor do espectro poderia ser produzida combinando as três cores primárias monocromáticas: azul, verde, vermelho dando robustez à teoria da tricromacia. Na Figura 1.14 está representada uma das experiências que veio reforçar a teoria tricromática [2], [14].

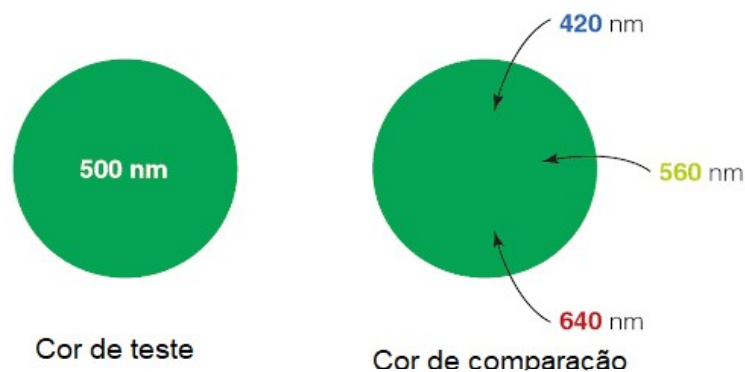


Figura 1.14 Experiência que veio reforçar a teoria tricromática. Um observador ajusta as quantidades dos 3 primários com comprimentos de onda distintos até fazer corresponder com a cor de teste. (Adaptado de [2])

A base da teoria assenta num princípio fundamental da cor - qualquer cor pode ser criada misturando quantidades apropriadas apenas dos três comprimentos de onda primários [2], [14]. Os ecrãs dos computadores e dos telemóveis, são alguns dos exemplos de sistemas que funcionam com três primários, atingindo uma boa reprodução de cores.

A tricromacia baseia-se nos três tipos de cones da retina, que detetam cores com comprimentos de onda longos, médios e curtos. A Comissão Internacional de Iluminação (CIE) definiu três funções de sensibilidade espectral, com correspondência com a quantidade de luz que é necessário utilizar na cor de comparação para encontrar a cor de teste, sendo as últimas denominadas por funções de correspondência de cor [2], [14], [15].

Uma luz vermelha que chegue à retina vai estimular mais os cones L, cones mais sensíveis nessa zona do espectro. Já uma luz amarela vai estimular os cones M e com menor intensidade os cones L e S. Segundo a teoria tricromática a visão das cores é o equilíbrio das respostas fornecidas pelos três cones [2], [13]–[15].

Todas as cores podem ser definidas pela resposta dos três tipos de cones. As funções de sensibilidade de cada cone sobrepõem-se em alguns comprimentos de onda, assim o sistema visual evoluiu no sentido de registar melhor as diferenças entre as respostas de cada cone [2], [14].

❖ Teoria da Cor oponente

A hipótese em que o sistema de processamento de cor era baseado em respostas apenas com duas direções e opostas entre si, vermelho-verde, azul-amarelo, como esquematizado na Figura 1.15, foi proposta inicialmente por Ewald Hering [2], [14].

A teoria de cor oponente sugere que existem três tipos de canais oponentes: vermelho-verde, azul-amarelo e preto-branco. Sendo as respostas em cada canal antagónicas entre si, ou seja, cores oponentes nunca são percebidas em simultâneo. No entanto, assume que dois tipos de sinais opostos possam ser gerados dependendo do comprimento de onda. Sendo assim, podem existir respostas tais como vermelho e amarelo, amarelo e verde, mas nunca verde e vermelho em simultâneo [2], [14], [15].

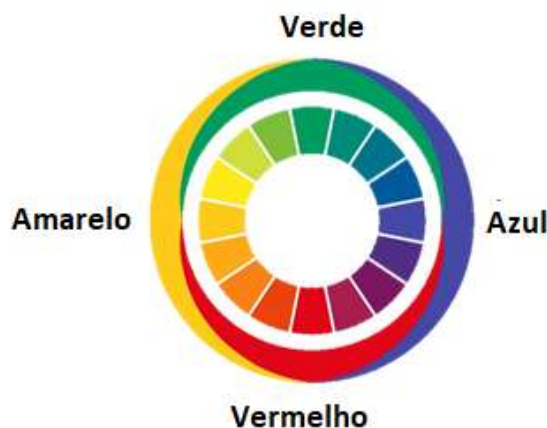


Figura 1.15 Diagrama representativo das cores oponentes (Adaptado de [21])

Hering observou que daltónicos com dificuldade em perceber vermelho tinham dificuldades em discriminar a cor verde e que pessoas que não conseguem ver o amarelo também tinham dificuldade na cor azul, este facto veio favorecer a teoria que tinha proposto [2].

Apesar da teoria de cor oponente ter permanecido durante um longo período, como sendo a única explicação fisiológica para a visão das cores é incapaz de explicar estímulos de cores misturadas. A teoria de cor oponente não consegue explicar o facto de uma mistura aditiva de vermelho e verde resultar na perceção da cor amarela [2], [14].

A teoria de cor oponente vêm dar uma explicação aceitável, para as cores percebidas nas pós-imagens, como por exemplo, ver uma pós-imagem verde de um ponto vermelho, isto resulta de uma fadiga das vias visuais [2], [14].

Os dois canais oponentes verde-vermelho e azul-amarelo são bem aceites. O terceiro canal preto-branco devido a não se poderem eliminar mutuamente, não é tão bem aceite. Este vai depender do contraste e da distribuição das reflectâncias envolventes, por isso deduz-se que as células não sejam oponentes e forneçam o mesmo tipo de resposta em todo o espectro [2], [14].

Quando propostas inicialmente a teoria tricromática e a teoria da cor oponente foram apresentadas como exclusivas uma da outra, após a descoberta de evidências fisiológicas que apoiaram as duas teorias, conclui-se que ambas estavam corretas.

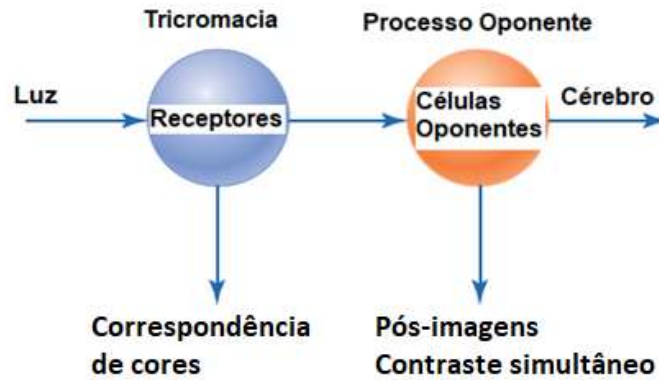


Figura 1.16 Esquema que representa a fusão de ambas as teorias de visão das cores. (Adaptado de [2])

As teorias são válidas porque abordam etapas diferentes do sistema visual como representado na Figura 1.16 [2].

O sistema visual para realizar a correspondência de cores necessita da informação obtida através dos três cones com picos de sensibilidade diferentes que se encontram no início do processo visual, já o emparelhamento perceptivo entre azul, amarelo, vermelho e verde é realizado por processos oponentes e só no final é que a informação é enviada para o cérebro [2].

1.3 Funções de correspondência de cor

As quantidades relativas necessárias de três primários para reproduzir uma cor, com um dado comprimento de onda, são denominadas de triestímulos. Os triestímulos correspondem à quantidade de cada um dos primários pré-definidos que é necessário adicionar entre si para obter uma determinada cor [19].

As curvas de correspondência de cor ou em inglês, *color matching functions* CMF's, expressam as quantidades de R , G , B necessárias para fazer corresponder a uma cor com um pequeno intervalo de comprimento de onda do espectro e são denominadas por $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$. A função $\bar{r}(\lambda)$ mostra a quantidade necessária do primário R , vermelho, para haver uma correspondência em cada comprimento de onda, por sua vez as funções $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ as quantidades de G , verde, e B , azul, respetivamente.

As CMF's $\bar{r}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$, tem zonas negativas como é possível comprovar na Figura 1.17. Tal indica a necessidade de adicionar primário R ou B à cor de teste, sem a qual não é possível uma correspondência perfeita. Resumidamente, o intervalo de cores com os comprimentos de

onda, onde a CMF $\bar{r}(\lambda)$ é negativa, são obtidos pela mistura de G e B e com uma certa quantidade de R adicionada à cor de teste [4], [22].

O valor negativo advém da sobreposição das curvas de sensibilidades dos cones.

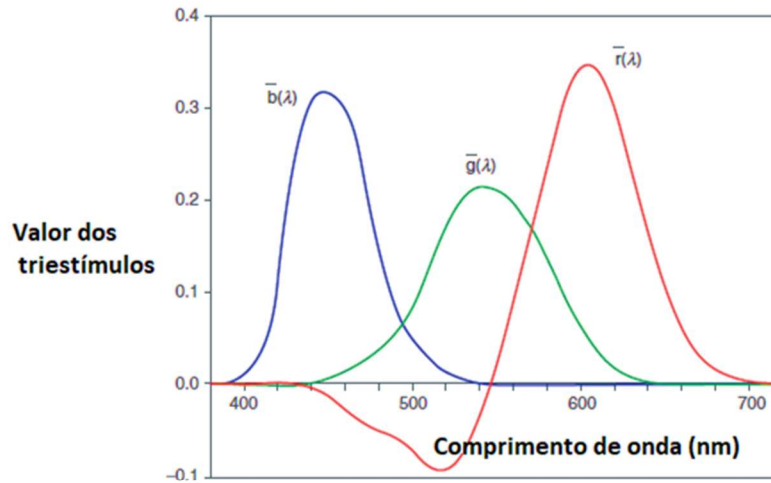


Figura 1.17 Color Matching Functions representando $\bar{r}(\lambda)$ a vermelho, $\bar{g}(\lambda)$ e $\bar{b}(\lambda)$ a verde e azul respectivamente. (Adaptado de [4])

Em 1931 a CIE concluiu que os valores negativos das funções poderiam complicar os cálculos matemáticos. Recomendou, então, uma substituição dos valores triestímulos $[R]$, $[G]$, $[B]$ para um novo conjunto de triestímulos $[X]$, $[Y]$, $[Z]$ através das seguintes equações [4], [22].

$$X = 0,49 \cdot R + 0,31 \cdot G + 0,20 \cdot B \quad (1)$$

$$Y = 0,17697 \cdot R + 0,81240 \cdot G + 0,01063 \cdot B \quad (2)$$

$$Z = 0,00 \cdot R + 0,01 \cdot G + 0,99 \cdot B \quad (3)$$

Com esta mudança substituem-se os primários reais por um conjunto de primários imaginários. Algumas das exigências para a formulação dos primários imaginários foram: os valores dos triestímulos teriam de ser iguais para um estímulo com valores energéticos iguais; um dos valores deve fornecer quantidades fotométricas; o volume do tetraedro criado por eles ser o menor possível [4], [19], [22].

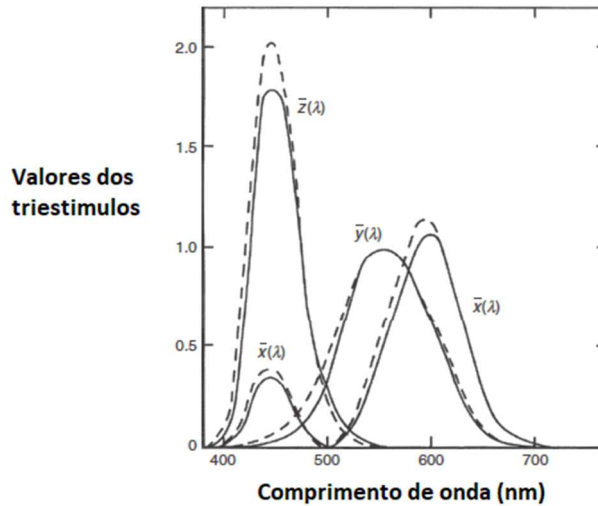


Figura 1.18 Color Matching Functions dos novos primários X, Y e Z de 1931 da CIE (linha preenchida) e color matching functions de 1964 da CIE (linha tracejada) (Adaptado de [4])

Na Figura 1.18 estão representadas as funções $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$, onde se pode observar que não existem valores negativos. As áreas sob as funções são iguais e ainda se confirma a igualdade entre a função $\bar{y}(\lambda)$ com a função que representa a sensibilidade fotópica. Assim, quando em visão fotópica não existe a necessidade de trabalhar com quatro funções espectrais mas sim com três funções [4], [19], [22].

As funções dos primários reais e imaginários relacionam-se através das três seguintes equações [4].

$$\bar{x}(\lambda) = 0.49 \cdot \bar{r}(\lambda) + 0.31 \cdot \bar{g}(\lambda) + 0.20 \cdot \bar{b}(\lambda) \quad (4)$$

$$\bar{y}(\lambda) = 0.17697 \cdot \bar{r}(\lambda) + 0.81240 \cdot \bar{g}(\lambda) + 0.01063 \cdot \bar{b}(\lambda) \quad (5)$$

$$\bar{z}(\lambda) = 0.00 \cdot \bar{r}(\lambda) + 0.01 \cdot \bar{g}(\lambda) + 0.99 \cdot \bar{b}(\lambda) \quad (6)$$

A capacidade de discriminar cores varia consoante o tamanho da área da retina estudada. Se consideramos áreas da retina cada vez mais pequenas a capacidade de discriminar cores também diminui, pelo contrário se considerarmos áreas cada vez maiores a discriminação de cores melhora. Devido a este facto em 1964 a CIE criou CMF's com as mesmas propriedades das

já existentes, mas para áreas retinianas maiores que 4° , denominando-se por $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$ e $\bar{z}_{10}(\lambda)$ [4], [19], [22].

1.4 Iluminantes

A cor não é uma propriedade física do objeto. A cor é percebida pelo observador e esta percepção vai depender das características do próprio observador, do objeto em questão e do iluminante.

O iluminante é um fator de tal forma relevante que pode alterar a percepção das cores. Um observador com a visão das cores normal quando observa uma amostra colorida sobre um iluminante tem uma percepção da cor da amostra, que sobre outro iluminante pode não coincidir [23].

A CIE definiu iluminantes padrões de forma a estes puderem ser utilizados em testes ou em estudos, estes iluminantes estão representados na Figura 1.19. O iluminante que frequentemente é mais utilizado é o D65, devido a ser a melhor representação da média da luz do sol durante o dia. A CIE refere-se a este iluminante como o iluminante de referência para cálculos colorimétricos. O iluminante D65 está representado a preto na Figura 1.19 [23].

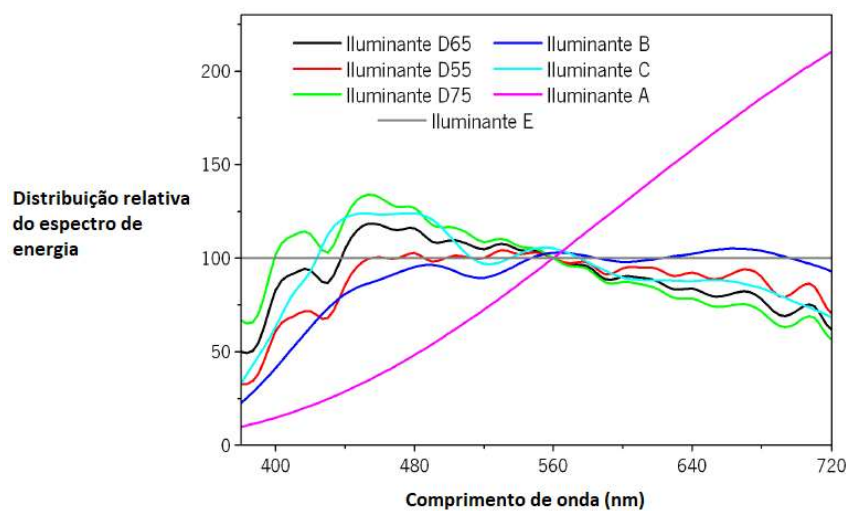


Figura 1.19 Iluminantes padrões propostos pela CIE em 1931 e 1964. (Adaptado de [23])

1.5 Triestímulos

A CIE recomendou que para um observador colorimétrico standard os valores dos triestímulos para uma distribuição espectral fossem obtidos através da integração da multiplicação da função do estímulo de cor pela CMF's correspondente em cada comprimento de onda de todo o espectro. De forma a facilitar o cálculo dos triestímulos para cada comprimento de onda é possível realizar uma soma numérica em intervalos de comprimentos de onda, $\Delta\lambda$ [19], [22].

$$X = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (7)$$

$$Y = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (8)$$

$$Z = k \sum_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (9)$$

Nas equações acima, $\phi_{\lambda}(\lambda)$ é o valor da função do estímulo de cor, k é uma constante, e $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ são as CMF's para um observador standard. Para aumentar a praticidade das equações são geralmente utilizados intervalos de comprimentos de onda, $\Delta\lambda$, de 5nm bem como as CMF's no mesmo intervalo. A constante k está relacionada com o iluminante utilizado e é possível determinar o seu valor a partir da seguinte equação, onde $S(\lambda)$ representa a distribuição da potência espectral relativa do iluminante [19], [22]

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \quad (10)$$

1.6 Cromaticidade

Através dos triestímulos é possível descrever uma cor, mas a descrição através dos triestímulos pode não facilitar a identificação rápida da cor em questão. Foi criada uma estratégia para ultrapassar esse contratempo ao reduzir uma dimensionalidade e garantindo que $x + y + z = 1$. Assim, é admissível definir a cor só com dois valores [24].

Surgiram então as coordenadas cromáticas (x, y) . Ao representar uma cor pelas coordenadas cromáticas não estamos a representar todas as componentes de cor, mas é possível recuperar estas a partir da relação $x + y + z = 1$.

Duas luzes de cor definidas por triestímulos idênticos, mas com diferentes intensidades, vão ter coordenadas cromáticas idênticas, ignorando a luminância. Quando definida uma cor por coordenadas cromáticas deve ser sempre referida a intensidade luminosa, Y [4], [19], [22], [24].

Na Figura 1.20 está ilustrado um o gráfico (x, y) construído a partir das coordenadas cromáticas. A linha reta que une os comprimentos de onda 700nm e 380nm é chamada de limite purpura, não existe uma definição concreta dos seus limites. Na linha curva que une, os comprimentos de onda 380nm e 700nm (no sentido dos ponteiros do relógio), estão localizadas as cores monocromáticas. Em toda a parte interna do diagrama estão representadas as cores resultantes de combinações das cores que estão no seu exterior.

No diagrama x e y é possível prever todos os valores de cromaticidade resultantes de uma mistura de dois estímulos cromáticos, através de uma linha reta que une esses mesmos estímulos em proporções definidas. Traçando uma linha reta que une esses dois estímulos, todas as cores atravessadas por essa reta são possíveis resultados dessa mistura [4], [19].

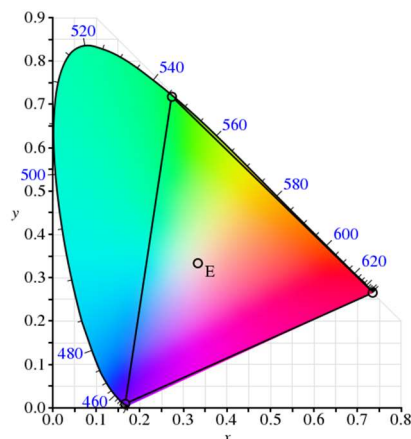


Figura 1.20 Digrama de cromaticidade x, y da CIE 1931. O triângulo representa o espaço cromático obtido com os primários R,G e B. (Adaptado de [25])

A representação dos três estímulos R, G e B nos comprimentos de onda 700nm, 546,1nm e 435,8nm respetivamente, mostra que a partir dos primários reais não é possível obter todas as cores representadas, apenas as que se encontram dentro do triângulo preto da Figura 1.20. Se

forem considerados os primários imaginários, é possível obter, todas as cores do diagrama x, y [4].

No diagrama x, y também está incluído o ponto E que representa a cor branca. Quando há uma combinação entre uma cor com o ponto E, e seguindo a propriedade enunciada anteriormente, todas as possíveis cores que podem resultar dessa mistura são uma escala de saturação da cor, mais pálido quanto mais próximo de E e mais saturado quanto mais próximo da cor escolhida [4], [19].

Existe a representação do diagrama de cromaticidade pelos valores triestímulos X_{10}, Y_{10} e Z_{10} . O diagrama x, y e x_{10}, y_{10} são muito semelhantes em relação à sua forma, mas apresentam diferenças na posição de certos comprimentos de onda [4], [19].

A falta de uniformidade na diferença entre duas cores que perceptualmente se encontram a distâncias equivalentes é uma limitação do diagrama de cromaticidade x, y e pode ser observada na Figura 1.21. No caso deste diagrama as linhas que representam uma pequena diferença de cores têm tamanhos muito variados. Em 1976 foi proposto o diagrama u', v' que, apesar de tentar uniformizar essa diferença, não é perfeito, mas reduz o rácio entre a linha mais longa sobre a mais curta de cerca de 20 por 1 para 4 por 1.

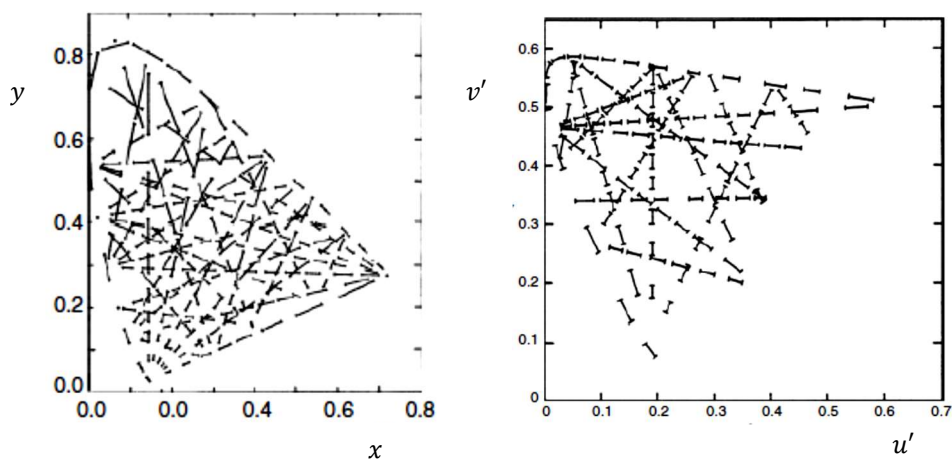


Figura 1.21 Diagrama x, y e o diagrama u', v' , com linhas representativas de uma pequena diferença de cor equivalente em ambos os diagramas. (Adaptado de [4])

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (11)$$

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

O diagrama u', v' relaciona-se com os triestímulos X, Y e Z e com os valores x, y através das Equações 11 e 12 [4], [19], [22].

1.7 Espaço de cor

Quando usamos os diagramas de cor para caracterizar cores não estamos a representar todas as propriedades das cores. Ao usar os diagramas não representamos a informação relativa à luminância. Como o fator luminância pode ser importante na representação da percepção cromática a CIE criou espaços tridimensionais onde este fator já se encontra representado.

1.7.1 Espaço de cor CIELAB

O espaço CIELAB é um dos mais utilizados e possuiu três coordenadas L^*, a^* e b^* , que são obtidas através das seguintes expressões:

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (13)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (14)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (15)$$

$$\text{onde } f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \begin{cases} \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{quando } \left(\frac{X}{X_n}\right) > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{X}{X_n}\right) + \frac{4}{29} & \text{quando } \left(\frac{X}{X_n}\right) \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases} \quad (16)$$

$$e f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{quando } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + \frac{4}{29} & \text{quando } \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases} \quad (17)$$

$$e f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \begin{cases} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{quando } \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + \frac{4}{29} & \text{quando } \left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases} \quad (18)$$

O valor L^* vai representar a luminosidade e os valores a^* e b^* vão representar a cor. Como ilustrado na Figura 1.22 quando o valor de a^* for positivo o estímulo é vermelho e quando for negativo verde. O sinal do parâmetro b^* vai dar a indicação se for positivo que o estímulo é amarelo e se for negativo que o estímulo é azul [4], [19].

Ao contrário do que acontece no diagrama x, y o resultado da mistura de duas cores não vai estar representado numa linha reta que une essas duas cores, devido á transformação cubica dos dados.

Estes valores são obtidos por um conjunto de equações referidas anteriormente onde X, Y, Z são os triestímulos da cor que se pretende testar e X_n, Y_n e Z_n são os valores triestímulos de um branco de referência escolhido [4], [19], [22], [26].

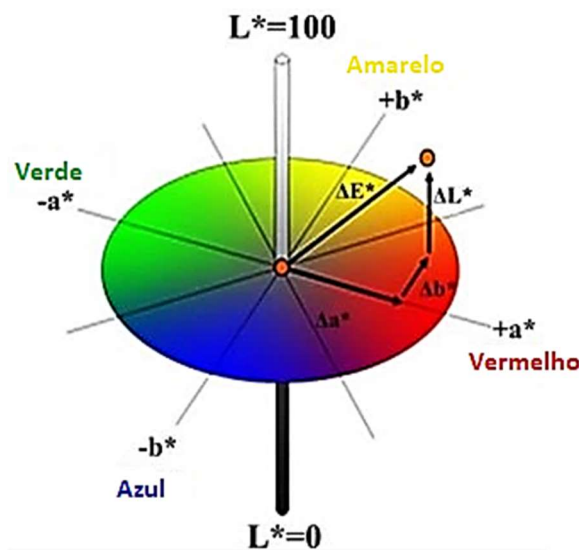


Figura 1.22 Representação do espaço de cor CIELAB. (Adaptado de [27])

1.8 Número de cores perceptíveis

O sistema visual tem um limite de cores que consegue perceber, apesar de na literatura esse número não estar totalmente claro, existem algumas disparidades, entre 10 000 a 4 milhões de cores relatados em Masaoka [28].

Existem diferenças de cor que o sistema visual não consegue perceber devido a estar limitado à informação de três tipos de fotorreceptores. Se fosse possível triplicar o seu número e distribuí-los de uma forma uniforme por todo o espectro, a distinção de cores era amplamente melhorada. Devido a esta limitação foi criado o conceito JND que significa “diferença de cores discerníveis” [29].

O JND representa a diferença mínima necessária entre duas cores para que um observador padrão, com visão das cores normal, em condições de observação standard e com iluminação normal, consiga perceber a diferença entre essas duas cores. O JND começou por ser representado por uma esfera com a cor referência no centro dessa esfera. A distância entre duas esferas representaria a diferença entre si.

O gamut ou em português gama de cores, representa todas as cores distinguíveis entre si que podem ser encontradas numa imagem. Ao representar todas as esferas JND de uma determinada imagem num espaço de cor, o gamut é a estrutura fictícia que engloba o conjunto de todas essas esferas.

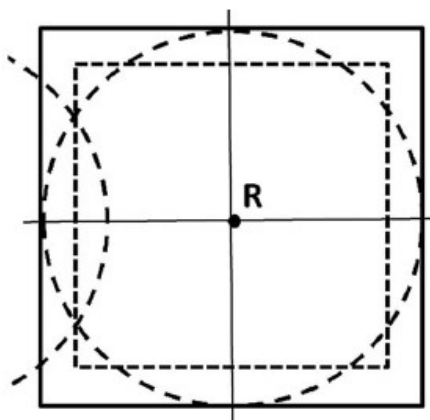


Figura 1.23 Corte de um círculo JND referente ao estímulo R (Adaptado de [29]).

O melhor objeto sólido para representar um conjunto de cores indistinguíveis da central pode variar a sua forma e tamanho com o iluminante [29].

Representar o JND por círculos torna o cálculo do número de esferas que preenchem um gamut muito complexo e demorado. Facilita, então, representar o JND por um cubo com um volume aproximadamente igual ao da esfera. Como representado na Figura 1.24 o cubo vai ter 8 cantos que vão representar 8 cores distinguíveis entre si e entre cantos dos cubos vizinhos, mas indistinguíveis da cor central (A). Realizando esta transformação obtém-se um número de cores aproximado e não real [29].

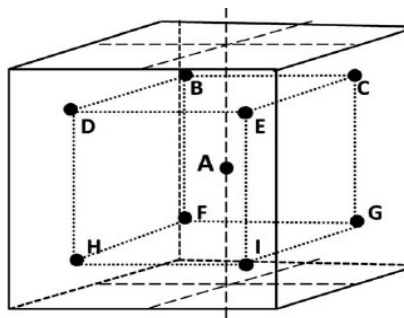


Figura 1.24 Imagem 3D representativa do cubo que estaria dentro de uma esfera JND centrada em A. Os 8 cantos distinguíveis entre si, mas indistinguíveis de A (Adaptado de [29])

1.9 Remoção do verniz

A forma como a luz incidente se comporta quando interage com uma pintura difere muito caso a pintura tem ou não uma camada protetora. A colocação da camada protetora tem como principais funções a proteção da pintura e a função estética, de melhorar a sua aparência. O efeito da camada protetora faz escurecer a camada pictórica, diminuiu a luz transmitida, e assim aumenta a perspectiva de profundidade. Por outro lado, aumenta o contraste de cor devido às inúmeras reflexões dentro da camada. Como podemos observar na Figura 1.25, a pintura tem uma superfície com micro rugosidades que após a aplicação da camada protetora adquire uma uniformidade [30]–[33].



Figura 1.25 Diagrama representativo da pintura (substrato do pigmento mais aglutinante) coberto por uma camada protetora envelhecida à esquerda, transparente fresco à direita e sem camada protetora no centro. (Adaptado de [25])

Numa pintura com a aplicação da camada protetora existem dois materiais em contacto ótico: a camada de protetora e a pintura. Estes dois materiais vão estabelecer duas interfaces: a interface ar-camada protetora e a interface camada protetora-pintura. Como esquematizado na Figura 1.26 e denotado por A, da luz que incide na camada protetora parte vai ser refletida e outra parte transmitida. Da luz que é transmitida parte sofre uma nova reflexão na interface camada protetora-pintura e outra é transmitida para a pintura. O processo de reflexão entre as duas interfaces ar-camada protetora e camada protetora -pintura, ocorre um número infinito de vezes [31], [32].

A luz que é transmitida para a pintura após atravessar a camada protetora, pode ser absorvida pela pintura ou refletida de forma difusa. A luz que é refletida nos componentes da pintura pode ser novamente refletida na interface camada protetora-pintura, dando origem a um número infinito de inter-refleções representado na Figura 1.26 por B [31], [32].

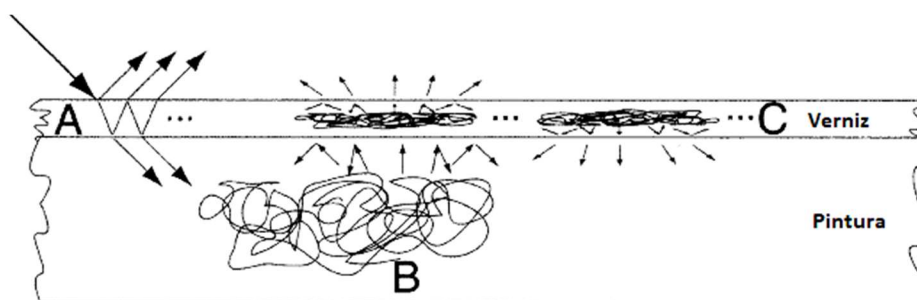


Figura 1.26 Diagrama representativo das várias interações da luz com a pintura e a camada protetora (Adaptado de [27])

A luz transmitida para a camada protetora pode novamente sofrer múltiplas inter-refleções, pode ser transmitida para a pintura ou pode ser transmitida para o ar. Estes processos estão representados na Figura 1.26 por C [31], [32].

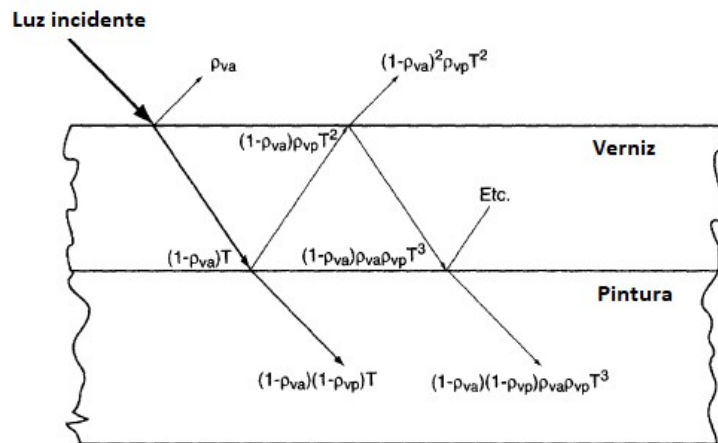


Figura 1.27 Diagrama representativo da interação da luz com a camada protetora e pintura com as fórmulas associadas a cada fenómeno (Adaptado de [27])

A Figura 1.27 não representa todos os fenómenos descritos anteriormente, mas apresenta já uma descrição formal de grande complexidade em termos matemáticos, que, para os objetivos propostos neste trabalho, seriam demasiado complexos. Neste trabalho não serão consideradas as diferentes camadas individuais e a alteração que cada uma provoca à informação luminosa. Todas as camadas serão consideradas como uma única camada que provoca uma alteração luminosa agregada. Como relatado na literatura, para a análise de mudanças cromáticas a metodologia aqui descrita é a mais rápida com melhores indicativos, que podem sobretudo ser importantes na impossibilidade de não ter o acesso físico à pintura para obter uma amostra da camada protetora, ou quando não existem dados sobre a camada protetora [31], [32].

Neste trabalho utilizamos imagens híperespectrais recolhidas pelo sistema descrito na secção dos métodos. Existem outros sistemas híperespectrais equivalentes ou que aumentam a gama espectral em análise [34]–[36], mas neste trabalho não será realizada uma análise comparativa entre os diferentes sistemas híperespectrais, sendo apenas utilizadas as imagens adquiridas previamente

2. HIPÓTESE E OBJETIVO DE ESTUDO

2.1 Formulação do Problema

É conhecido que a passagem do tempo numa pintura conduz a fenómenos de deterioração nos seus materiais constituintes, podendo levar a alterações na sua visualização. Uma das alterações que mais facilmente se pode verificar é o depósito de sujidade e o envelhecimento da camada protetora. Se forem colocadas perante um observador duas pinturas, sendo que uma das pinturas tem uma camada protetora mais oxidada e por isso mais amarelecida do que a outra, um observador consegue discriminar, com alguma facilidade, qual das camadas protetoras é a mais recente e qual a mais antiga, dadas as alterações visuais inerentes ao passar do tempo. Esta conclusão pode assentar sobre o facto de a oxidação da camada protetora alterar a perceção cromática da pintura e assim a perceção visual do observador. No entanto, as fórmulas de determinação existentes são complexas e ainda está por determinar se com modelos simplificados de análise cromática é possível obter o mesmo resultado. Em suma, desconhece-se se é possível utilizar modelos simplificados que permitam perceber como o decorrer do tempo interfere na perceção cromática que um observador tem quando aprecia uma pintura, em relação à que teria antes desse mesmo tempo.

No presente estudo foram estimadas as alterações cromáticas provocadas pela oxidação da camada protetora e pela deposição de sujidade de superfície em pinturas. Para tal foi estimado espectralmente o efeito da camada protetora sobre a pintura, ao comparar as pinturas antes e depois da remoção da camada protetora. Esta estimativa permite simular como é que seria a pintura antes da oxidação da camada protetora ou após um processo de limpeza da camada protetora. Este estudo vem então permitir que a partir de uma pintura pré intervenção se possa simular como o seu aspeto cromático vai ficar após um processo de remoção da camada protetora.

2.2 Hipóteses

Com a elaboração deste trabalho propõe-se testar as seguintes hipóteses:

1. A estimativa da influência média da camada protetora oxidada permitirá inferir alterações cromáticas em pinturas individuais antes da sua intervenção.

2. O efeito cromático é estimado com menor precisão quando se usa a estimativa média do efeito da camada protetora oxidada, comparado com o uso dos valores de medidas específicas e individuais da camada protetora de cada pintura.
3. O processo de oxidação da camada protetora induz uma diminuição da saturação de todas as cores, mas em particular das cores azuis e vermelhas.

2.3 Objetivo

O principal objetivo do estudo é determinar as alterações cromáticas provocadas pela oxidação da camada protetora e sujidade de superfície e, assim, aferir o resultado da remoção dessa mesma camada protetora.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A recolha de dados foi realizada na Faculdade de Belas-Artes da Universidade de Lisboa (FBAUL, Lisboa, Portugal) e a análise dos mesmos foi feita no Colour Science Lab (CSL) do Centro de Física da Universidade do Minho (Braga, Portugal).

3.1 Tipo de estudo

O presente estudo consistiu em avaliar as diferenças colorimétricas de uma pintura antes e após a limpeza da camada protetora envelhecida e da sujidade de superfície. A intervenção de uma pintura de cavalete pode consistir, consoante a gravidade da situação, em tratamentos de suporte e em tratamento da camada pictórica, podendo esta ser composta por vários estratos. A limpeza da superfície cromática (poeiras e/ou sujidades) e a remoção de repintes (adições de cores posteriores à execução da obra) e de camadas protetoras são procedimentos frequentes. Uma intervenção de conservação e restauro consiste, assim, na execução de um conjunto de tratamentos que têm como fim a salvaguarda e preservação da pintura, minimizando os efeitos da deterioração. Como a limpeza de superfície e a remoção da camada protetora faz parte do processo de restauro podemos incluir os resultados deste trabalho como parte do restauro

Durante todo o procedimento foi tido em conta as características de cada pintura, de forma a definir os métodos e o protocolo de execução para que nenhuma técnica pudesse deteriorar ou comprometer a integridade da pintura. Trata-se de um estudo com o objetivo de perceber a influência da remoção da camada protetora e da sujidade de superfície, na perceção da diversidade cromática em pinturas.

3.2 Pinturas

Neste estudo foram utilizadas seis pinturas representadas na Figura 3.1, do acervo da Faculdade de Belas-Artes de Lisboa intituladas de: (adaptado de [37]):

- *Nuno Álvares Pereira em Valverde (A)* datada de 1903 – 1904;
- *Cerco de Lisboa 1384 (B)* (1906);
- *Senhora de Chapéu (C)* (1906);
- *Tronco nu masculino sentado (D)* (1904);
- A cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra de Van Dyck (E)* (1906);

- Cópia de *Infanta (F)* (1906).

Importa referir que a cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* foi adquirida em 6 imagens devido ao seu tamanho, mas só foram considerados os dados obtidos da zona do rosto e tronco.

As telas escolhidas referentes a Adriano de Sousa Lopes e ilustradas na Figura 3.1 representam diferentes fases da vida do pintor. Todas as pinturas foram pintadas num contexto académico.

A Reserva de pintura da FBAUL possui dez pinturas atribuídas a Adriano de Sousa Lopes. Destas, apresentam-se aqui cinco obras atribuídas a este autor. É possível encontrar uma cópia, uma pintura académica, dois retratos e um tema histórico. Este conjunto data do período de Paris (1903-1906) passado na École des Beaux-Arts.



A- *Nuno Álvares em Valverde*



B- *Cerco de Lisboa 1384*



C- *Senhora de Chapéu*



D- *Tronco nu masculino sentado.*



E- Cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*



F- Cópia de *Infanta*

Figura 3.1 Telas da autoria de Adriano Sousa Lopes e a Cópia de *Infanta* (Adaptado de [37])

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Estado de Conservação

As pinturas apresentavam uma cor amarelecida resultante da degradação acentuada da camada protetora, sensível aos agentes externos como os raios ultravioleta, as oscilações da humidade relativa e da temperatura, além da deposição de poeiras e outros contaminantes. A degradação da camada mais externa leva a uma perda de flexibilidade, perda das propriedades químicas e físicas, a um escurecimento, assim como a um amarelecimento com alterações óticas bem perceptíveis. A degradação da camada protetora dá origem ainda a fissuras que criam uma superfície com rugosidades, que prejudica bastante a visualização da pintura.

Durante a observação à vista desarmada foi possível constatar que a aplicação da camada protetora não teve uma distribuição homogénea por toda a pintura e, desta falta de homogeneidade, vão resultar zonas com maior espessura dessa mesma camada. Inclusive, após a remoção da camada protetora constatou-se que já existia uma camada enegrecida, constituída por poeiras e outras sujidades, antes da aplicação da primeira camada protetora. Assim, desta desigualdade vão resultar zonas com maior escurecimento ou mais amarelas, comparativamente com as restantes, o que vai comprometer a leitura da composição pictórica [37].

3.3.2 Processo de Limpeza

O processo de limpeza pelo qual as pinturas foram submetidas foi estruturado para satisfazer as necessidades de cada tela individualmente e respeitar os critérios éticos de conservação e restauro.

Para realizar este tratamento foram testados dois sistemas de limpeza húmida: o sistema com base numa mistura de solventes orgânicos apolares e polares e um outro sistema com solventes orgânicos polares gelificados, de forma a avaliar qual seria o mais indicado para remover a camada protetora oxidada [37].

Para garantir a integridade da pintura, foram testadas diferentes soluções com diversos graus de polaridade, em várias áreas coloridas, de forma a determinar a solubilidade da camada protetora sem deteriorar a pintura. A natureza da camada protetora era desconhecida. Os testes de solubilidade foram realizados com base no triângulo de solubilidade TriSolv® do Instituto Superior de Restauro de Roma. Foram selecionados três solventes: isoctano, álcool etílico e acetona, e com eles foram formadas seis combinações possíveis. Na escolha dos solventes foi tida em conta a sua baixa toxicidade, de forma a não colocar em risco o conservador-restaurador e o meio ambiente.

Para a pintura do *Cerco de Lisboa*, por exemplo, verificou-se que a camada protetora só se dissolvia com uma mistura de etanol (18 ml), isoctano (40 ml) e acetona (42 ml) que corresponde à solução do TriSolv® 4. De acordo com o solvente utilizado e com os parâmetros de solubilidade é, por vezes, possível determinar o tipo de camada protetora. No caso da pintura *Cerco de Lisboa*, pelo fato da solução ser bastante polar deixa em aberto três hipóteses: um óleo, uma resina natural ou uma resina sintética [37].

Não existindo nenhuma referência sobre a camada protetora utilizada nas restantes pinturas, o processo de limpeza teve de se ajustar a cada caso. Um exemplo dessa especificidade foi que a solução usada para limpar a pintura *Cerco de Lisboa* mostrou-se ineficaz para limpar *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, por duas razões principais: a rápida evaporação e a baixa polaridade.



Figura 3.2 Testes de limpeza realizadas numa pintura com 6 TriSolv® ((Adaptado de [37])

Após o processo de remoção da camada da camada protetora, como acima mencionado, verificou-se a existência de uma camada escura sobre a camada de tinta, que foi determinado ser sujidade.

Esta camada de sujidade veio indicar a possibilidade de as pinturas não terem sido revestidas com a camada protetora logo após a secagem. A remoção desta camada foi realizada com uma solução de água desmineralizada com uma gota de surfactante Brij® 35 de pH neutro. Na Figura 3.3 está representado o processo de limpeza completo.

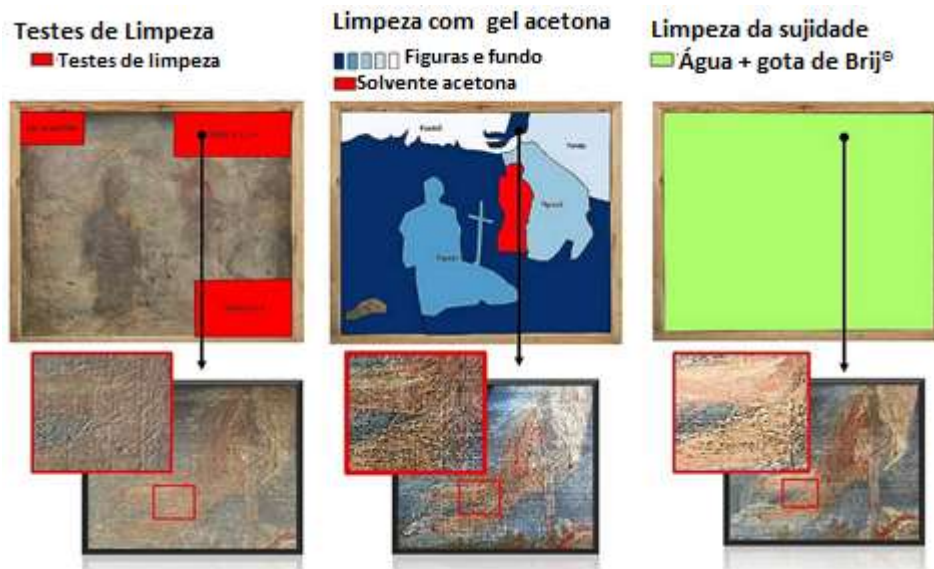


Figura 3.3 Processo de limpeza de uma pintura. Teste das soluções de limpeza na imagem mais à esquerda. Limpeza com acetona gelificada na imagem central. Limpeza da sujidade com água e surfactante na imagem mais à direita. (Adaptado de [37])

A limpeza permitiu retirar a camada protetora oxidada, assim como a camada de sujidade sobre a tinta. A literatura descreve que esta remoção devolve uma imagem da pintura com tons mais saturados, apesar de em casos concretos tal não acontecer se a camada protetora não se encontrar degradada o suficiente para ocultar a pintura [31], [32], [37].

Após a recolha das imagens hiperespectrais sem a camada protetora envelhecida, as pinturas foram revestidas com uma camada protetora de resina de resina aléido (Laropal® A-81). A escolha deste material em específico foi baseada na sua estabilidade à luz e agentes externos, na sua baixa toxicidade e em ser solúvel em solventes pouco tóxicos e biodegradáveis. As pinturas com a aplicação da camada protetora, tiveram, após inspeção visual, um aumento da saturação das cores, um aumento da capacidade de ver detalhes em áreas escuras, assim como o brilho ficou mais uniforme [31], [32].

3.3.3 Imagens Hiperespectrais de Pinturas

A análise colorimétrica de uma pintura pode ser realizada de várias formas, existindo atualmente diferentes métodos de fazer essa mesma avaliação. A análise com um espectrorradiómetro, bem como a análise através de sistemas hiperespectrais são dois exemplos desses métodos [38]. No presente estudo foram utilizados os dados recolhidos com um sistema hiperespectral. O sistema hiperespectral tem a vantagem de obter dados que possibilitam a realização de uma análise colorimétrica e espacial (com a imagem do objeto analisado), pixel a pixel.

Estudos anteriores concluíram que o sistema hiperespectral fornece mais informações gerais, que facilitam a representatividade dos resultados em relação à obra de arte, comparando com a espectroscopia ponto a ponto [39].

Todas as pinturas foram digitalizadas com o sistema hiperespectral na Faculdade de Belas-Artes da Universidade de Lisboa. O sistema hiperespectral com o qual se realizou a recolha dos dados de cada pintura é baseado numa câmara digital monocromática refrigerada a Peltier e de baixo ruído, fornecendo uma resolução espacial de 1344x1024 pixels no eixo horizontal e vertical, respetivamente, com uma saída de 12 bits (Hamamatsu, modelo C4742-80-12AG, Hamamatsu Photonics K.K., Japão). Acoplada à câmara encontrava-se uma lente zoom trabalhando a 75mm (possível entre 12mm a 75mm) e com uma razão entre a distância focal e

a abertura do diafragma de $f/11$, com um filtro de cristais líquidos de ajuste rápido (VariSpec, modelo VS-VIS2-10HC-35- SQ, Cambridge Research & Instrumentation, Inc., Massachusetts) na sua frente, para além de um filtro de infravermelhos para impedir que o sistema fosse contaminado por radiação infravermelha quando sintonizado para comprimentos de onda curtos.

Durante este processo as pinturas foram iluminadas uniformemente por uma lâmpada de descarga (OSRAM HQI 150W RX7s). Os dados foram obtidos no intervalo de comprimentos de onda, de 400nm a 720nm em intervalos de 10nm. Para compensar as irregularidades da iluminação espacial foram usadas medidas de uma superfície uniforme analisada no mesmo local que a pintura e com igual iluminação [40]–[42]. A calibração do sistema foi realizada usando o espectro de reflexão conhecido de uma superfície de referência colocada na cena durante o período de aquisição.

A informação obtida a partir dos dados recolhidos pelo sistema hiperespectral são os valores de reflectância, após descontar o efeito do iluminante utilizado durante o processo de aquisição. Para a análise deste trabalho, foram estimadas as coordenadas cromáticas em CIELAB de cada pixel de cada imagem de cada pintura. Para tal, foi assumido o observador padrão CIE 1931 e o iluminante CIE D65 para o cálculo dos valores triestímulos para cor e para o iluminante, sendo posteriormente estimado o valor em CIELAB, como descrito anteriormente pelas Equações (13) a (18)[22], [43]–[46].

O espaço de cor utilizado para a análise colorimétrica foi o CIELAB. Para além de ser um espaço de cor onde é possível representar as cores pelas suas coordenadas cromáticas, tem associado características visuais de percepção das cores. No CIELAB duas cores são distinguidas de acordo com a distância entre as suas coordenadas cromáticas, isto quando nos referimos a um observador padrão, observando diferentes amostras com o mesmo tamanho e sobre as mesmas condições de visualização.

3.3.4 Métodos de tratamento de imagem

A recolha de dados com o sistema hiperespectral antes e após a remoção da camada protetora não ocorreu exatamente nas mesmas condições de aquisição, devido às assimetrias na montagem do sistema hiperespectral. Assim, não é possível garantir que existe uma correspondência entre os pixels das bases de dados para as duas aquisições, ou seja, o pixel de

coordenada x_1, y_1 da aquisição antes da intervenção pode não corresponder ao pixel x_1, y_1 da aquisição após a intervenção. Apesar dos dados terem sido adquiridos com processos similares, não são iguais, faltando correspondência geométrica para permitir comparações diretas entre áreas correspondentes na pintura antes e depois da intervenção de restauro. De forma a ultrapassar esta limitação, foi realizado um alinhamento espacial das imagens das pinturas antes e após a remoção da camada protetora utilizando o Matlab (MatWorks, Natick, MA, EUA).

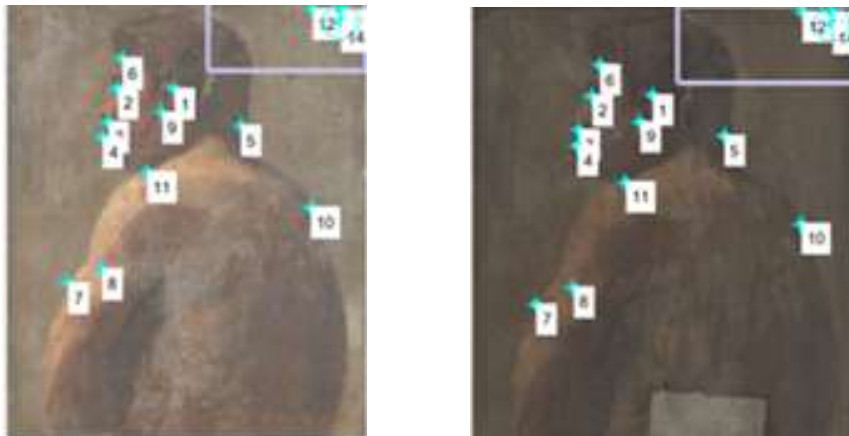


Figura 3.4 Processo de alinhamento de imagem com Matlab para a tela *Tronco nu masculino sentado*. Fase do processo onde manualmente se identifica detalhes comuns na imagem da pintura antes e após a remoção da camada protetora.

O processo de alinhamento de imagem passou por manualmente indicar os pontos em comum entre as imagens antes e depois da intervenção de restauro, como representado na Figura 3.4. Após indicar os pontos o programa calcula a transformação espacial necessária para as imagens coincidirem espacialmente.

O programa contém formas de manualmente confirmar a validade dos resultados obtidos. Um desses pontos de controlo, consiste em comparar a imagem antes do restauro com a imagem após o restauro ajustada pelo processamento de imagem, como ilustrado na Figura 3.5. Sobrepondo as duas imagens uma com a cor verde outra com a cor magenta, o resultado que pretendemos obter é uma imagem de cor cinza de forma a não sobressair nem o verde, nem a magenta, representantes das imagens individuais, identificando assim um bom alinhamento de imagem. Como se verifica na Figura 3.5 a falta de coincidência das imagens referentes a antes e depois do restauro, antes do alinhamento de imagem é grande, uma vez que se visualizam independentemente as cores verde e magenta.



Figura 3.5 Processo de registro de imagem com Matlab para *Tronco nu masculino sentado*. Ponto de verificação onde é avaliado o ajuste entre a imagem antes do restauro (a verde) e após o restauro (a magenta).

Outra forma de validar os resultados é o “*checkerboard*” ou mosaico de quadrados. O “*checkerboard*” consiste em verificar a existência de uma continuidade da imagem através dos diferentes quadrados. Na Figura 3.6 estão representados nos quadrados ímpares (1,3) a imagem após o restauro e nos quadrados pares (2,4) a imagem antes do restauro. Verificasse que não existe uma continuidade da imagem dos quadrados pares para ímpares. Esta descontinuidade existe devido a terem tamanhos diferentes, uma consequência da distância de aquisição não ter sido a mesma.



Figura 3.6 Processo de alinhamento de imagem com Matlab para *Tronco nu masculino sentado*. “*Checkerboard*”, processo no qual verificamos a continuidade da imagem através dos diferentes quadrados. Quadrados ímpares e pares representam a imagem antes e depois do restauro.

Após a verificação da validade do alinhamento de imagem com os métodos anteriormente enunciados, os dados das duas imagens transformadas são gravados.

No final do alinhamento de imagem são obtidas duas imagens que coincidem espacialmente, mas que podem diferenciar em tamanho devido às transformações espaciais que foi necessário realizar para garantir o alinhamento. Desta forma, procede-se à seleção de uma zona de corte comum onde as imagens fiquem com o mesmo tamanho e com a mesma área de análise.

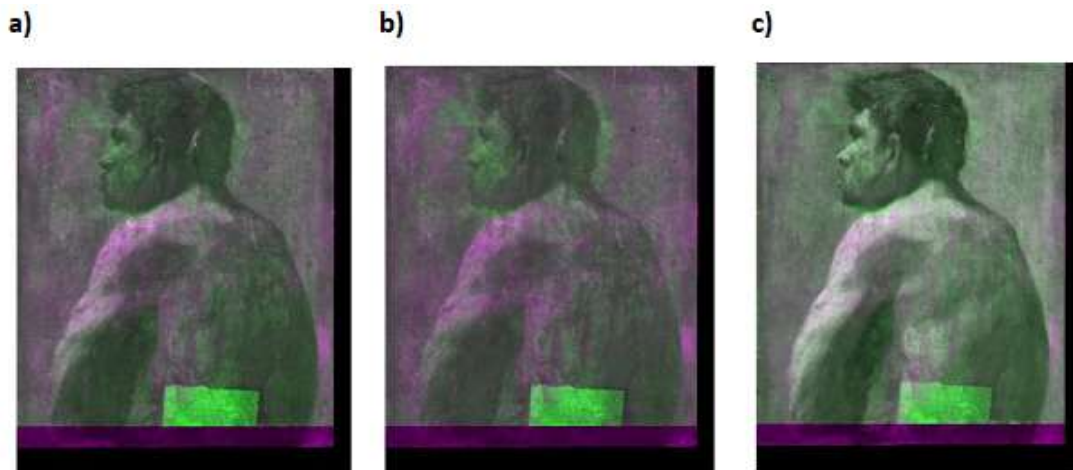


Figura 3.7 Verificação em três comprimentos de onda de forma a verificar a independência das aberrações provocadas pelo sistema. Em a) verificação no comprimento de onda 550nm em b) e c) 430nm e 700nm respetivamente.

O registo de imagem foi realizado utilizando uma construção RGB realizada a partir dos dados de reflectância. Para garantir que o registo se mantinha correto para os diferentes comprimentos de onda foram realizadas verificações em três comprimentos de onda distintos de forma a validar a independência por comprimento de onda do registo, como esquematizado na O alinhamento de imagem foi realizado utilizando uma construção RGB realizada a partir dos dados de reflectância. Para garantir que o alinhamento se mantinha correto para os diferentes comprimentos de onda foram realizadas verificações em três comprimentos de onda distintos de forma a validar a independência por comprimento de onda do alinhamento de imagem, como esquematizado na Figura 3.7. Assim, fica garantido que as imagens têm um bom ajuste por todo o seu componente espectral e que a zona de corte onde as duas pinturas coincidem espacialmente será a melhor independente do comprimento de onda, como ilustrado na Figura 3.8.

Com todos os procedimentos do alinhamento de imagem realizados passa a ser possível comparar as imagens diretamente.

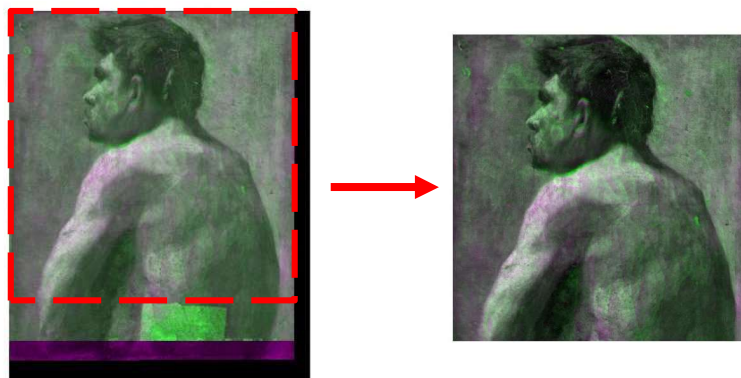


Figura 3.8 Ilustração da área de corte comum de uma pintura de forma a ajustar o tamanho das duas imagens, antes de depois do restauro.

Uma das dificuldades a salientar ao longo do processo do alinhamento de imagem foi o estado avançado de degradação, em que muitas pinturas se encontravam. Uma pintura com uma camada protetora muito oxidada, em que a camada protetora esteja estalada ou exista sujidade agregada à superfície, tem uma diminuição da visibilidade dos detalhes da pintura, o que pode dificultar a localização de pontos em comum entre as imagens.

Numa primeira fase optou-se por basear a escolha dos pontos correspondentes em zonas da pintura onde houvesse um maior contraste. Foram seleccionados vários pontos só tendo em consideração que fossem correspondentes e estivessem em zonas de contraste. Os resultados obtidos não eram satisfatórios. Com recurso à literatura existente do Matlab sobre os comandos de transformação de imagem, concluiu-se que o número de pontos correspondentes aconselhado para este estudo em específico seria de doze pontos ou próximo.

Limitado o número de pontos correspondentes no alinhamento de imagem e distribuindo esses pontos por toda a pintura, os resultados melhoraram substancialmente, como representado na Figura 3.9. O alinhamento verifica-se bem-sucedido, uma vez que a transição entre os quadrados é suave e fluída. Tal com já descrito, os quadrados ímpares representam a imagem antes restauro e os pares depois do restauro. A continuidade entre eles demonstra a efetividade do alinhamento.

O alinhamento de imagem baseia-se na capacidade do programa em definir linhas matriz com os pontos que o utilizador fornece. Dessa forma o programa assume uma continuidade das linhas e realiza ainda uma triangulação da distância entre essas linhas e outros pontos. Foram

então selecionados pontos correspondentes sobre linhas que tinham continuidade na pintura, melhorando desta forma os resultados substancialmente.

Para maximizar os resultados do alinhamento de imagem, optou-se por fazer uma pré-seleção dos pontos correspondentes como enunciado anteriormente. Após avaliar esse alinhamento, foram substituídos pontos que provavelmente forneciam menos informação e colocados novos pontos, de forma a que o programa conseguisse obter o máximo de informação possível, uma tentativa exemplo deste processo está representada na Figura 3.9.

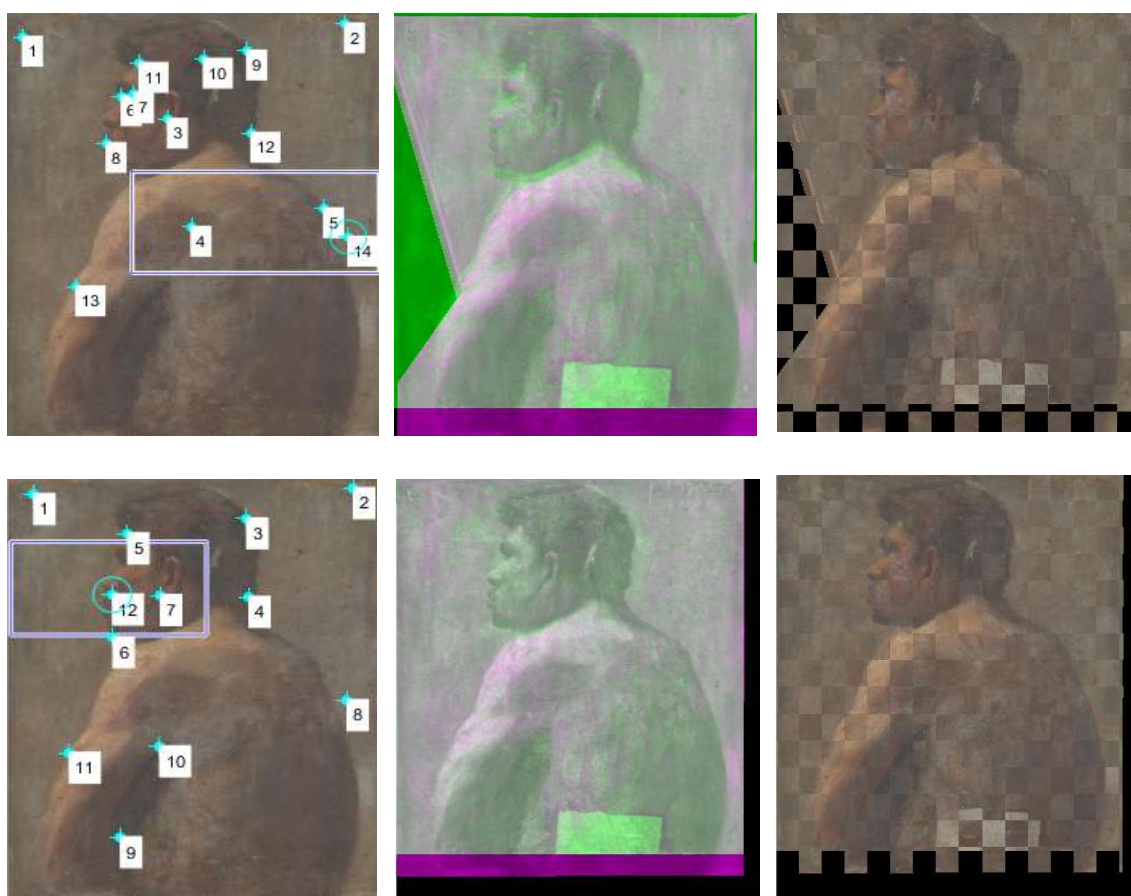


Figura 3.9 Imagem representativa do desenvolvimento do processo de alinhamento de imagem. As imagens superiores representam uma primeira tentativa e os maus resultados obtidos nas verificações. As imagens inferiores representam as mudanças de critérios e os melhores resultados obtidos.

3.3.5 Métricas utilizadas para avaliar a diversidade cromática

Para avaliar a diversidade cromática em cada pintura antes e após o restauro, utilizaram-se várias métricas. As métricas utilizadas no presente estudo foram: o volume do sólido capaz de englobar todas as cores, a área criada por essas cores e o número de cores discerníveis.

Avaliar a diversidade cromática através do volume, baseia-se no cálculo do volume do sólido que envolve todas as coordenadas cromáticas representadas em CIELAB (rotina convexHull, MatLab, MatWorks, Natick, MA, EUA). Na Figura 3.10 está representado o involucro que engloba todas as cores da pintura representada na Figura 3.9. O volume foi estimado calculando o volume ocupado por esse involucro.

Se o valor do volume de cores for elevado indica uma maior dispersão das cores e a existência de cores mais saturadas. Se o valor for mais reduzido significa uma maior condensação das cores junto do ponto neutro (a coordenada central do CIELAB). As diferenças do volume em termos perceptuais vão indicar diferenças na saturação com que o observador vê as cores e a sua luminosidade.

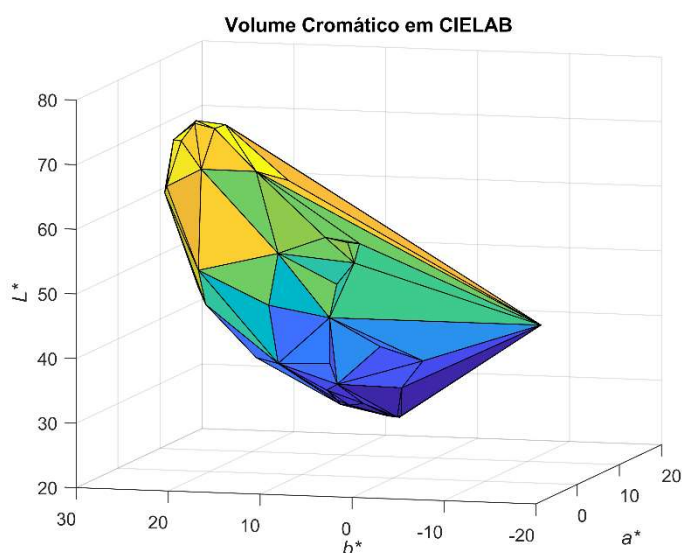


Figura 3.10 Volume cromático no espaço de cor CIELAB da pintura *Tronco nu masculino sentado*.

Para calcular a área ocupada pelas cores discerníveis, foram consideradas só duas dimensões dos dados, descartando a informação da luminosidade, L^* . Na Figura 3.11 está representado o diagrama cromático CIE(a^*, b^*), que não contém a informação de L^* . De forma a obter a área foi traçada uma figura geométrica que engloba todas as cores e de seguida calculada a área dessa mesma figura geométrica. Quando existem diferenças na área traduz-se numa percepção mais ou menos saturada das cores.

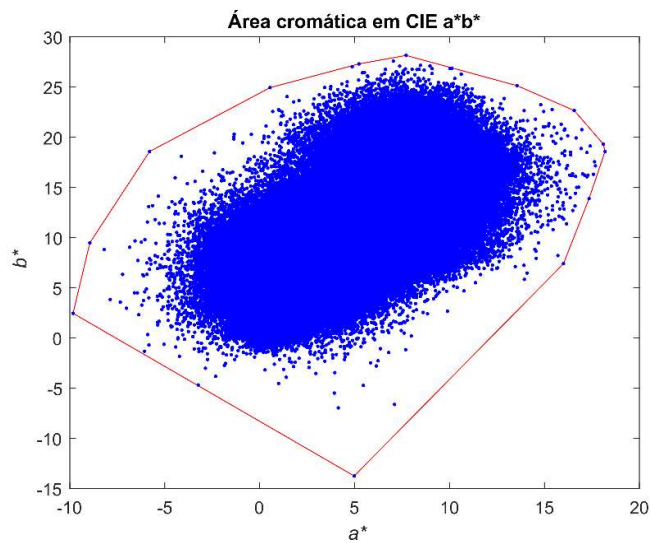


Figura 3.11 Área Cromática no espaço CIE(a^* , b^*) da pintura *Tronco nu masculino sentado*.

Através do número de cores discerníveis foram recolhidas informações sobre a diversidade cromática que um observador padrão, poderia distinguir ao observar a pintura. O número de cores discerníveis é obtido através da divisão do volume de cores CIELAB em inúmeros cubos com volume igual a um, ou seja, cubos unitários com vértice equivalente a 1 JND, como podemos observar na Figura 3.12, assumindo apenas a projeção do volume num plano bidimensional do CIELAB. Todas as coordenadas cromáticas que se encontrarem dentro de um cubo são tidas como a mesma cor, ou seja, indistinguíveis entre si, mas distinguíveis das pertencentes aos cubos vizinhos [28]. Contar o número de cubos não vazios fornecerá uma estimativa do valor do número de cores discerníveis. Um maior número de cores discerníveis representa um aumento do conteúdo cromático. Este valor vai fornecer informações sem considerar zonas vazias que influenciam outros parâmetros como é o caso do volume e área, que facilmente se podem observar na Figura 3.10 e Figura 3.11.

Quando se divide o gamut de cores de uma pintura em cubos com volume igual a um JND, admite-se incorrer no erro de colocar cores que distam mais do que uma unidade no mesmo cubo e, assim, assumir duas cores diferentes como sendo iguais. A metodologia que levaria a ultrapassar esta limitação seria dividir a nuvem de cores em esferas, em vez de cubos, assim as cores distariam sempre no máximo uma unidade.

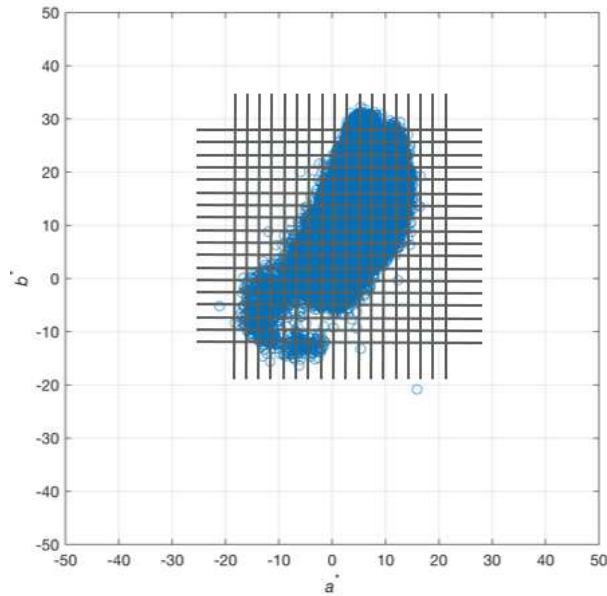


Figura 3.12 Representação em CIE(a^* , b^*) da divisão do gamut de cores em quadrados para contabilizar o número de cores discerníveis. O processo para CIELAB é idêntico, mas considerando a terceira dimensão e a divisão feita em cubos.

Como presente na literatura, a complexidade de contabilizar o número de cores discerníveis através de esferas é muito superior. Devido ao presente trabalho se propor a usar uma metodologia mais simples e abordar as alterações como variações, obtidas através de razões entre dois parâmetros estimados utilizando a mesma metodologia (neste caso o cálculo do número de cores), esse erro sistemático não afetará os resultados finais.

3.3.6 Determinação da influência da remoção da camada protetora

Neste trabalho foram utilizadas as imagens hiperespectrais adquiridas antes e após o restauro, em todas as pinturas. A partir das imagens hiperespectrais foram determinados os espectros de reflectância, pelo processo descrito anteriormente. Utilizando os espectros de reflectância médios de cada tela, com e sem a camada protetora, foi estimado o efeito global médio da camada protetora. Assumindo que R_a representa o espectro de reflectância médio da pintura após o restauro e que R_b representa o espectro de reflectância da pintura antes do restauro, é possível estimar a influência global da camada protetora, designada por V_L .

$$V_L(\lambda) \cdot R_a(\lambda) = R_b(\lambda) \Leftrightarrow V_L(\lambda) = \frac{R_b(\lambda)}{R_a(\lambda)} \quad (19)$$

Em suma a influência da camada protetora é a divisão do espectro de reflectância antes do restauro sobre o espectro de reflectância depois do restauro.

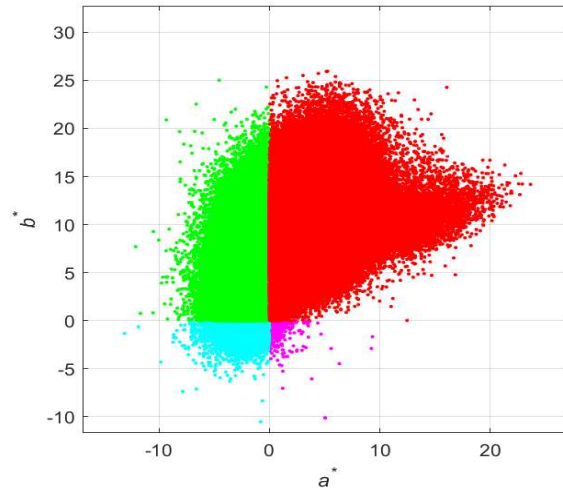


Figura 3.13 Cores discerníveis de uma pintura representadas no espaço de cores CIE(a*,b*) com diferentes cores representando os diferentes quadrantes assumidos neste estudo.

De forma a realizar uma análise mais detalhada, realizou-se a divisão por quadrantes das cores de cada pintura. O quadrante 1 representa todas as cores que se inserem no quadrante onde $a^* \geq 0$ e $b^* \geq 0$, o quadrante 2, 3 e 4 que se inserem no quadrante $a^* > 0$ e $b^* < 0$, $a^* \leq 0$ e $b^* \leq 0$, $a^* < 0$ e $b^* > 0$, respetivamente. Na Figura 3.13 os quadrantes 1,2,3 e 4 são representados com as cores vermelho, magenta, ciano e verde, respetivamente.

Com a análise das cores da pintura no espaço de cor CIELAB, considerando os quadrantes anteriormente descritos, é possível concluir o efeito da camada protetora em cada um desses quadrantes. Desta forma é possível comparar o efeito da camada protetora para a totalidade da área da pintura em simultâneo, ou considerando cada quadrante de forma individual.

Determinada a influência da camada protetora nas reflectâncias de cada quadrante e no global da pintura, foi utilizada essa mesma informação para remover digitalmente a camada protetora à reflectância antes do restauro R_b , de modo a obter a reflectância R_a simulada ou R_{aS} depois do restauro.

$$R_{aS}(\lambda) = \frac{R_b(\lambda)}{V_L(\lambda)} \quad (20)$$

Representando as novas reflectâncias simuladas em coordenadas cromáticas no espaço de cor CIELAB, bem como as reflectâncias da pintura depois da remoção da camada protetora é possível comparar visualmente a distribuição das mesmas.

Para aferir a capacidade desta metodologia de prever o resultado após o restauro da pintura e comparar a previsão elaborada a partir do efeito da camada protetora no global da pintura e por quadrante, foram calculadas as diferenças cromáticas entre as reflectâncias após a remoção, R_a , e as reflectâncias após a remoção digital da camada protetora, R_{aS} . A diferença cromática foi calculada através da estimativa da distância euclidiana, ΔE , entre as coordenadas cromáticas representadas em CIELAB antes e depois do restauro, para cada pixel, através da fórmula[44]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_a - L^*_{aS})^2 + (a^*_a - a^*_{aS})^2 + (b^*_a - b^*_{aS})^2} \quad (21)$$

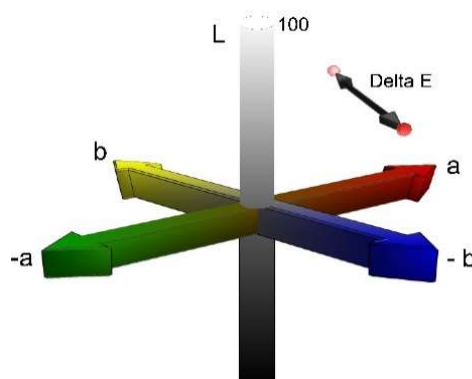


Figura 3.14 Esquema representativo da diferença ΔE no espaço de cor CIELAB (Adaptado de [47])

Deste modo é possível não só analisar quantitativamente a capacidade do método de avaliar a influência da camada protetora após o restauro, como também averiguar se este efeito quando determinado pela totalidade das cores é mais eficaz do que o determinado por quadrantes ou vice-versa.

O volume de cores foi dividido em cubos que vão representar os vários JND, todas as cores que se situarem dentro de um cubo vão ser assumidas como indistinguíveis

O limiar de detecção ou JND vai depender do tipo de imagem e iluminação ambiente. As cores que se encontram dentro do JND vão ser assumidas como indistinguíveis entre si. Enquanto que em impressões profissionais ou eletrônicas o ΔE é de várias unidades, para comparações entre cores de carros ou têxteis o limiar é muito baixo. Como presente na literatura, para serem perceptíveis diferenças entre imagens complexas o limiar de diferença de cor deve ser de 2.2 JND [44], [45].

Através das reflectâncias simuladas por quadrante ou pela totalidade das cores é possível obter uma visualização de como ficaria a pintura com um restauro virtual e avaliar a sua aproximação ao restauro físico.

Com os dados correspondentes à imagem antes e após o restauro e por último da imagem com um restauro virtual, observamos as diferenças entre o restauro físico e o restauro virtual, baseado numa única camada protetora uniforme envelhecida

4. RESULTADOS

4.1 Distribuição de cores em CIELAB antes e após o restauro

A partir dos dados hiperespectrais foram obtidas as coordenadas cromáticas de cada pixel de cada pintura antes e após o restauro e em seguida representadas no espaço de cores CIELAB. Para cada caso foi representada a distribuição de cores em CIELAB e em $CIE(a^*, b^*)$. O conjunto global das coordenadas em CIELAB representa o conjunto de cores disponíveis, sendo que há uma cor por pixel da imagem. As coordenadas cromáticas foram também segmentadas em quadrantes Q1, Q2, Q3 e Q4 e representadas pelas cores vermelho, magenta, ciano e verde, respetivamente, tal como já descrito. Cada uma das figuras seguintes representa uma pintura e o correspondente volume de cor e área de cor antes (a) e c)) e depois da intervenção de restauro (b) e d)). Um aumento no volume e na área corresponde a um aumento de saturação das cores analisadas.

Pintura A- *Nuno Álvares Pereira em Valverde*

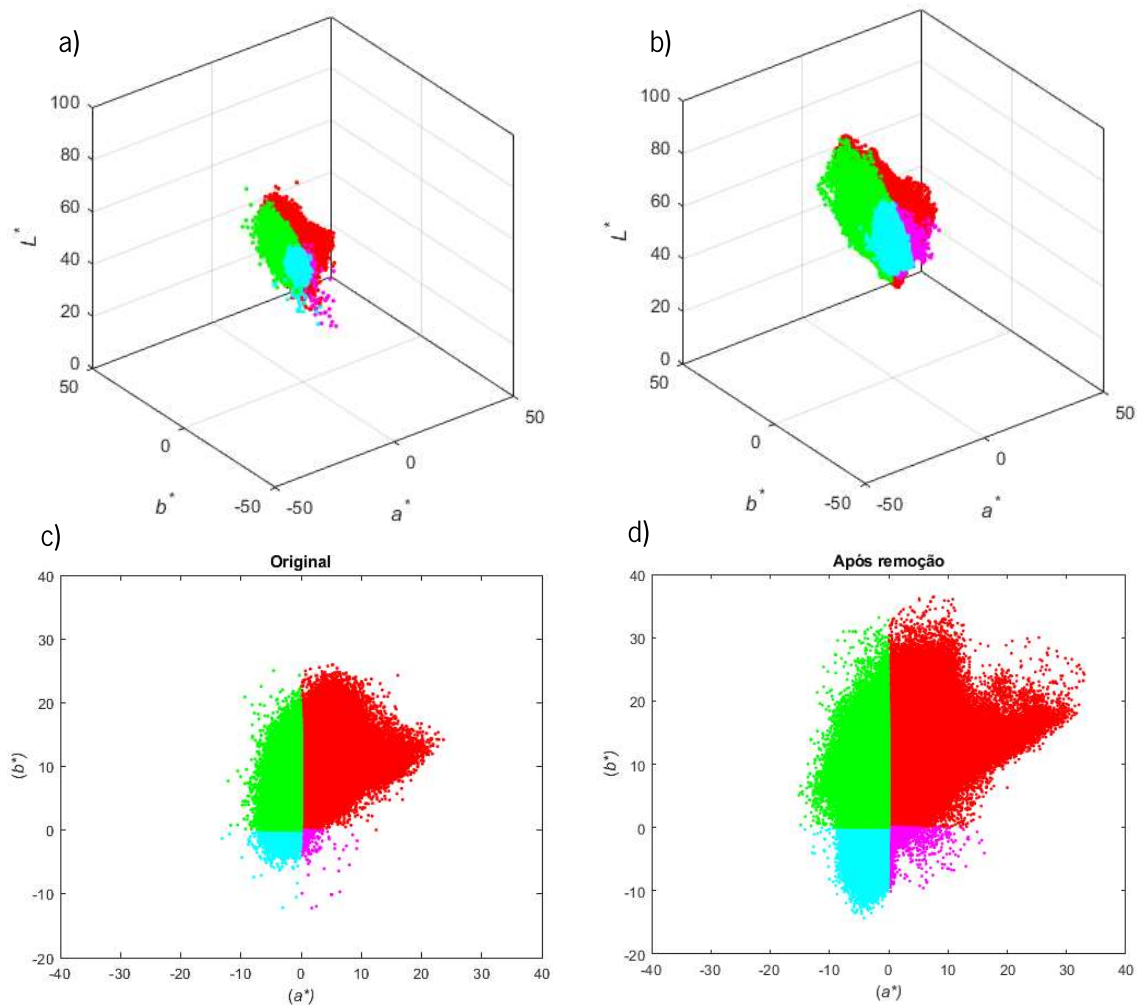


Figura 4.1 Representação em CIELAB e em $CIE(a^*, b^*)$ das cores distinguíveis da pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*.

Pintura B- *Cerco de Lisboa*

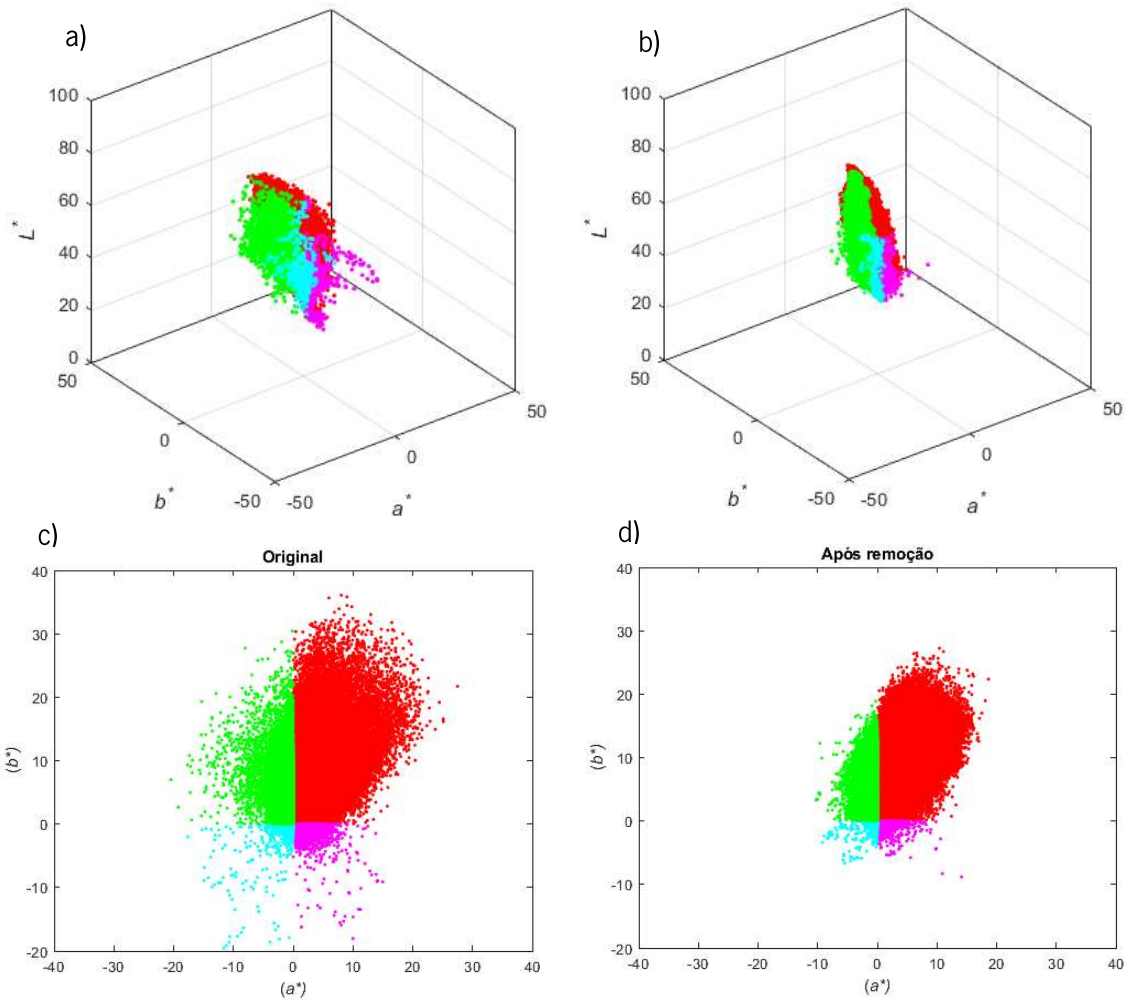
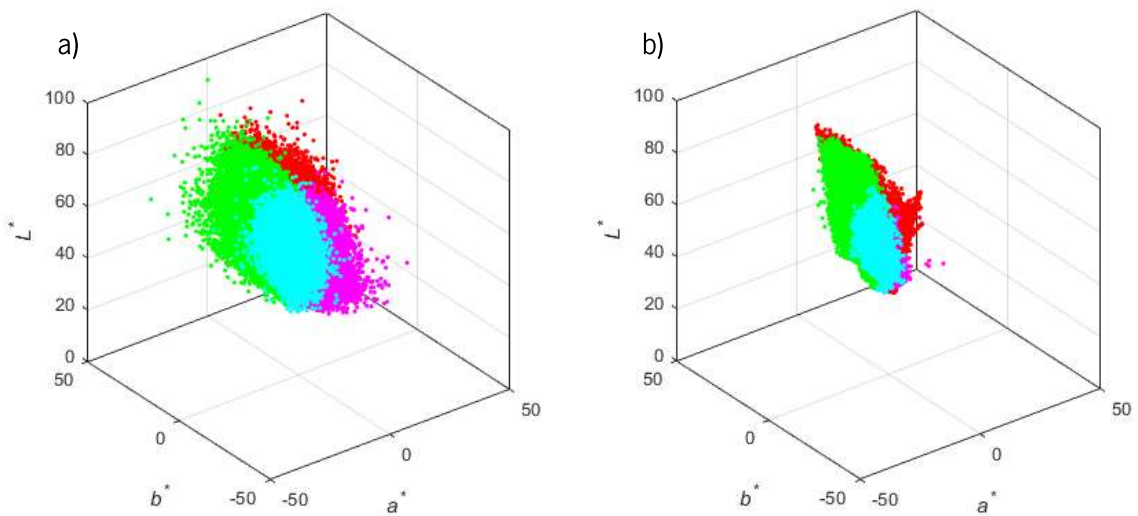


Figura 4.2 Representação em CIELAB e em CIE(a^*, b^*) das cores distinguíveis da pintura *Cerco de Lisboa*.

Pintura C- *Senhora de Chapéu*



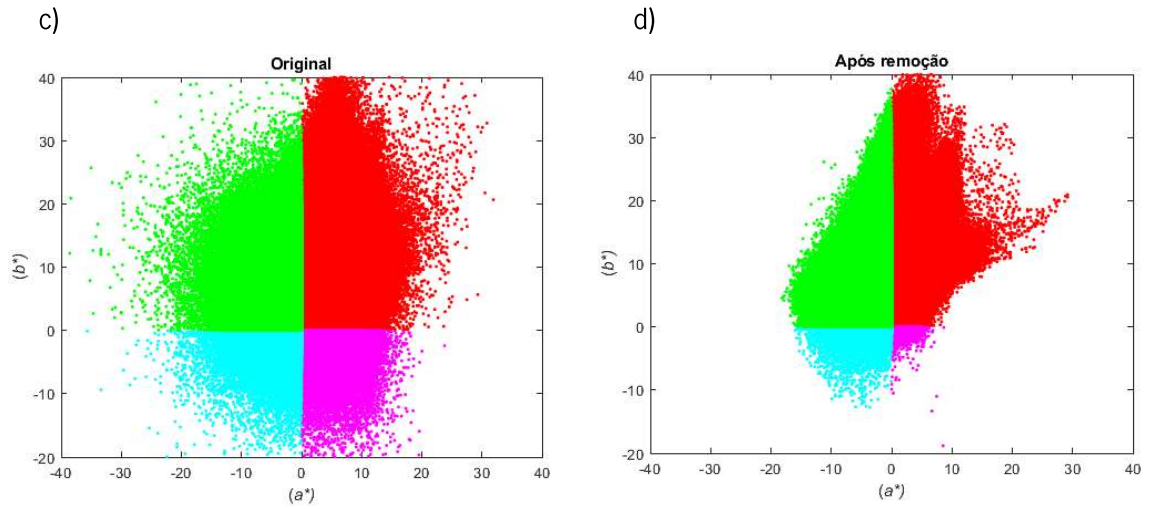


Figura 4.3 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura *Senhora de Chapéu*

Pintura D- *Tronco nu masculino sentado*

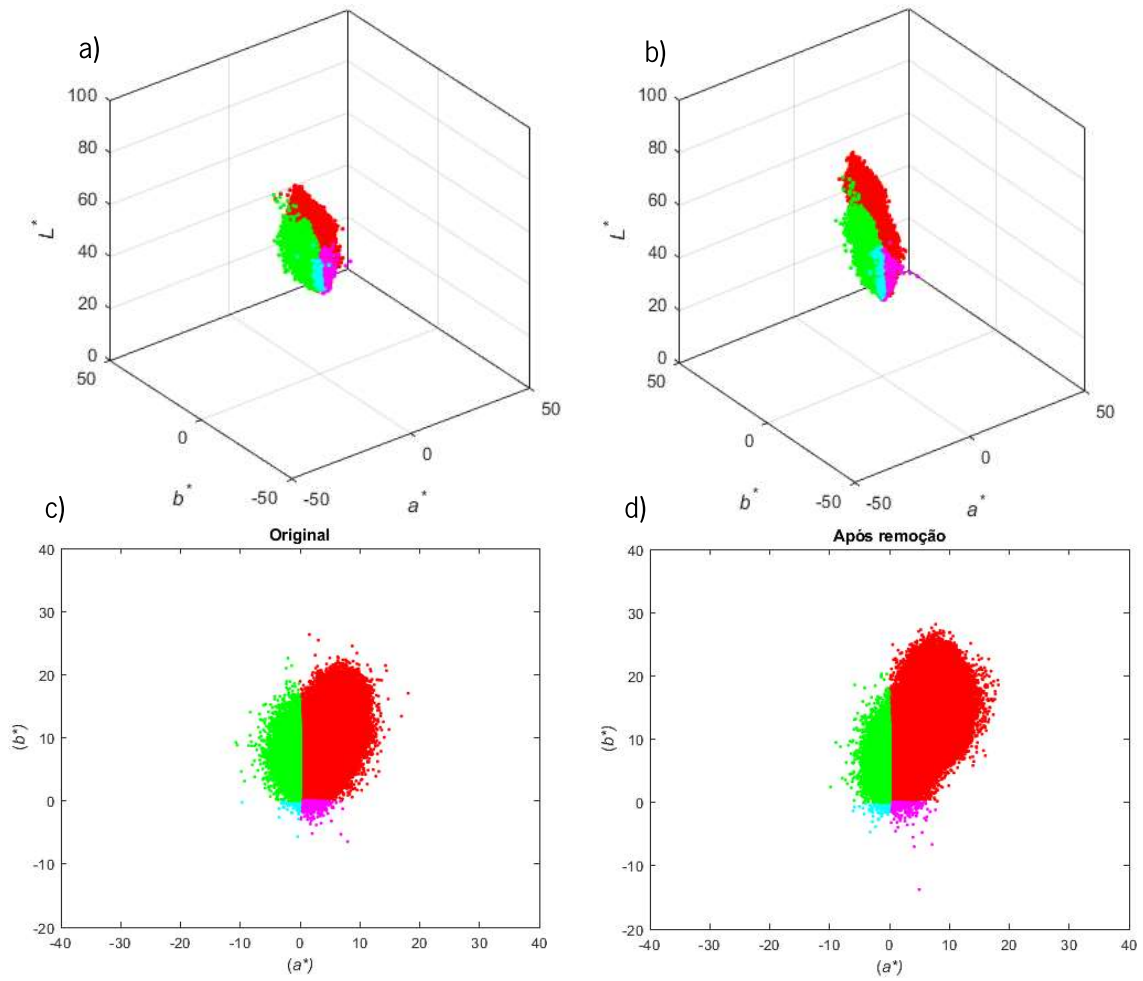


Figura 4.4 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura *Tronco nu masculino sentado*.

Pintura E- Cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*

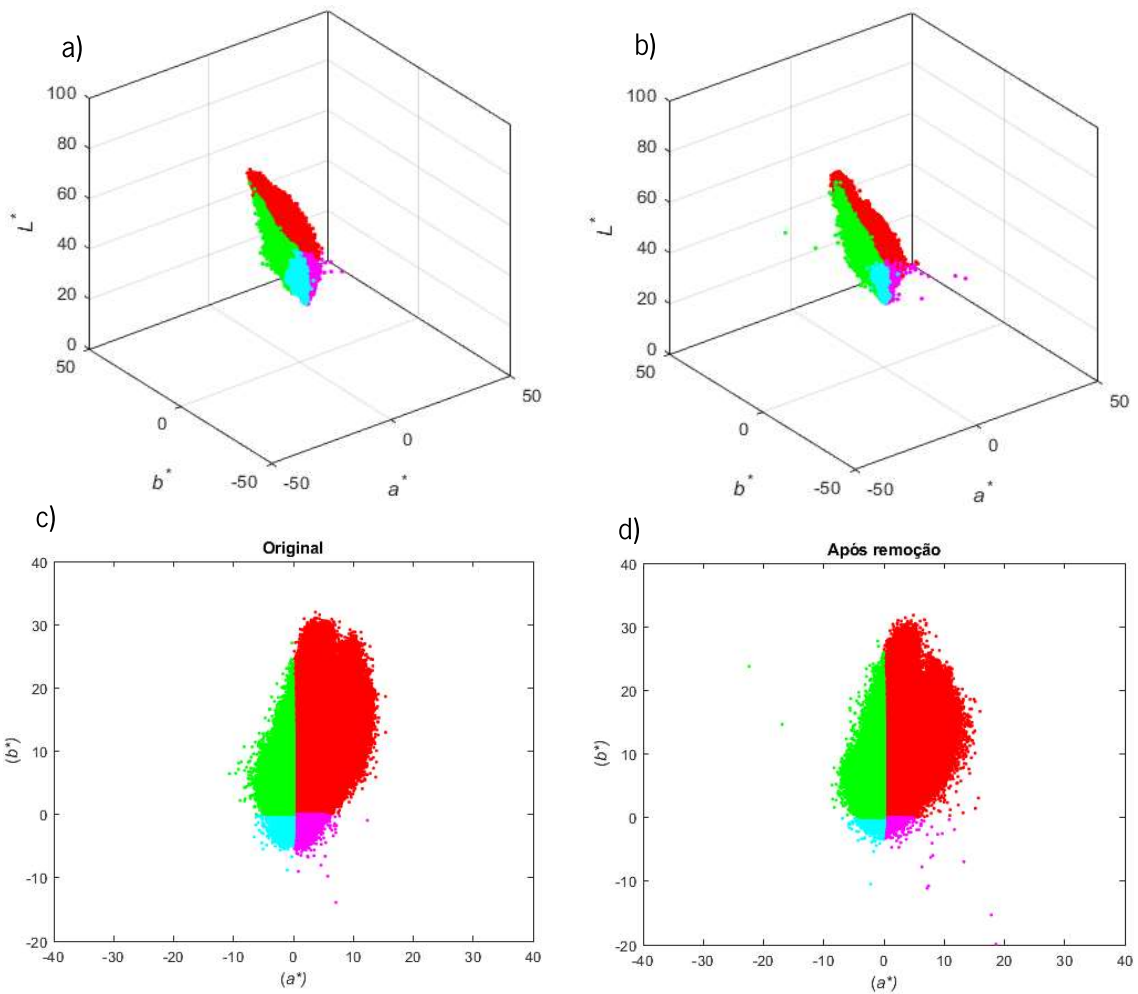
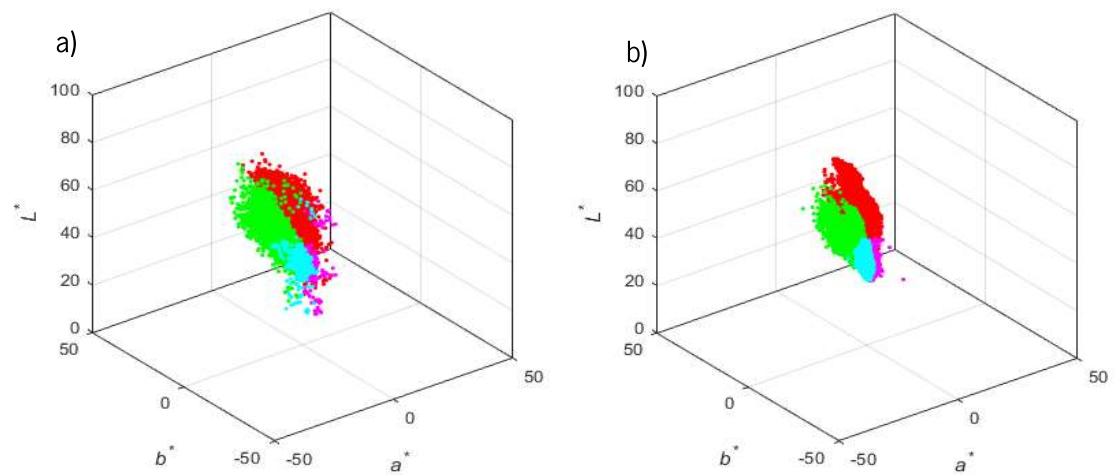


Figura 4.5 Representação em CIELAB e em CIE(a^*, b^*) das cores distinguíveis da pintura cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*

Pintura F- Cópia de *Infanta*



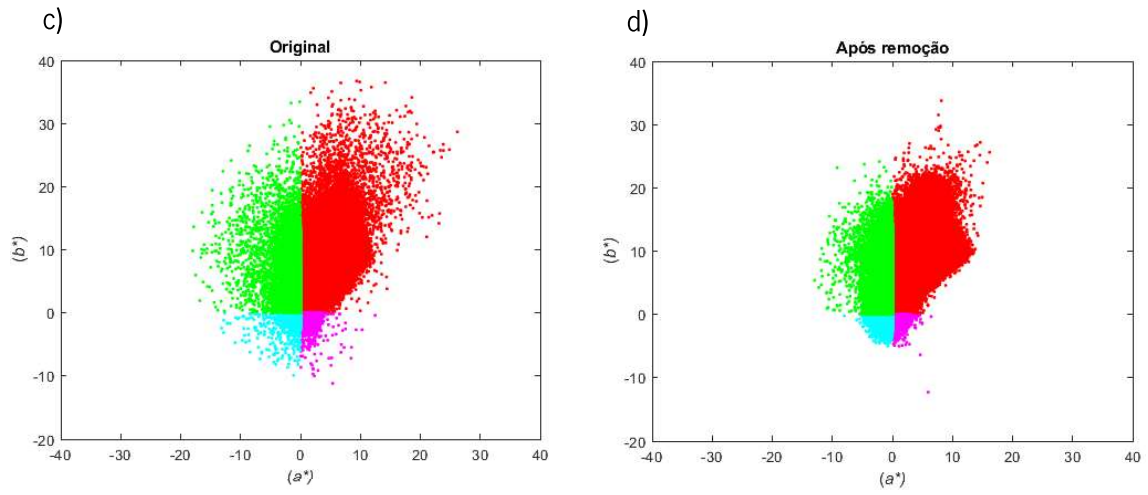


Figura 4.6 Representação em CIELAB e em CIE(a^* , b^*) das cores distinguíveis da pintura cópia de *Infanta*.

4.2 Alterações provocadas pela camada protetora nas métricas avaliadas

O valor das métricas enunciadas anteriormente foi calculado com o auxílio do Matlab. Após aferir o valor dos parâmetros propostos foi calculada a variação existente em relação ao valor antes da intervenção, ou seja, a variação representa a alteração que houve no respetivo parâmetro em relação à pintura antes de remover a camada protetora.

As variações apresentadas no gráfico da Figura 4.7 e nas tabelas seguintes são obtidas pela fórmula:

$$Var(\%) = - \frac{\text{Antes da intervenção} - \text{Depois da intervenção}}{\text{Antes da intervenção}} * 100 \quad (22)$$

Valores negativos obtidos a partir da fórmula indicam uma diminuição, enquanto que valores positivos indicam um aumento da quantidade em análise.

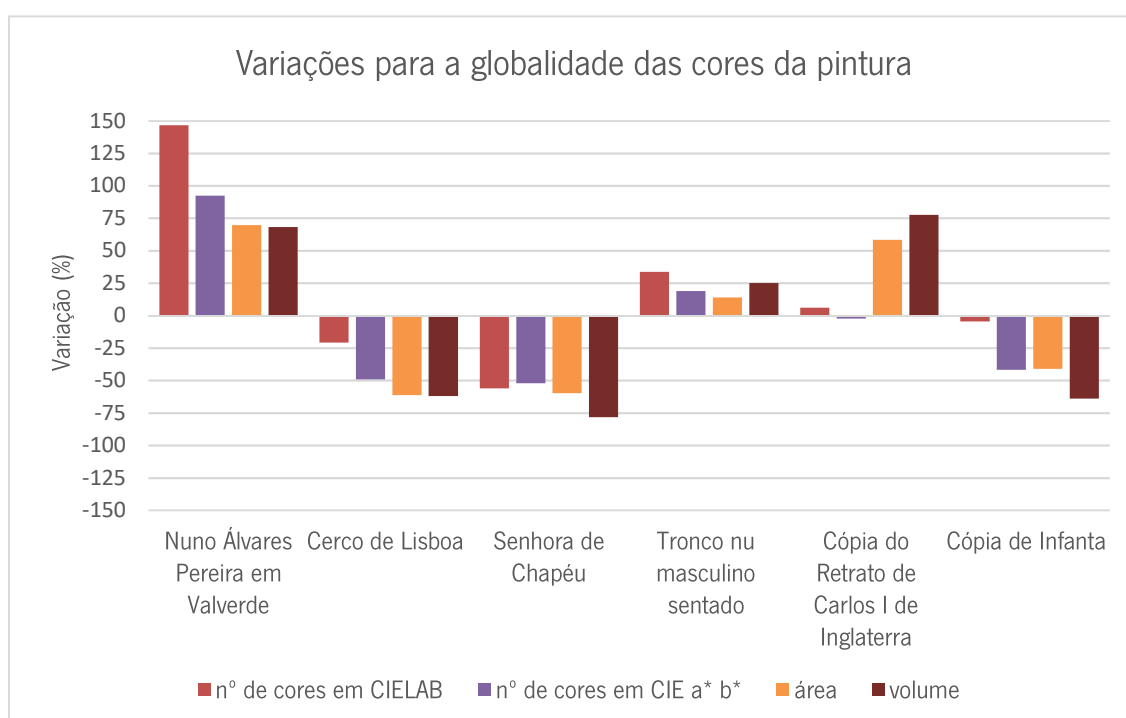


Figura 4.7 Resultado das variações correspondentes de cada parâmetro para cada pintura. Valores abaixo de zero representam uma diminuição, valores acima de zero representam um aumento.

Tabela 4.1 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*, b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com *Var* representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela de *Nuno Álvares Pereira em Valverde*.

Nuno Álvares Pereira em Valverde

Nº de cores em CIELAB		Antes	Depois	Var. (%)	Volume		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	7320	18052	146,61		Total	19818,43	33314,00	68,10
Q1	4736	11001	132,28	Q1	12381,07	26472,14	113,81		
Q2	137	609	344,53	Q2	2284,55	3231,20	41,44		
Q3	463	1728	273,22	Q3	2247,73	3518,81	56,55		
Q4	2342	5502	134,93	Q4	5987,84	12943,06	116,16		

Nº de cores em $CIE(a^*, b^*)$		Antes	Depois	Var. (%)	Área		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	698	1343	92,41		Total	961,65	1632,59	69,77
Q1	417	755	81,06	Q1	475,20	883,29	85,88		
Q2	38	104	173,68	Q2	85,22	125,90	47,73		
Q3	68	150	120,59	Q3	97,80	143,13	46,36		
Q4	210	383	82,38	Q4	258,01	404,69	56,85		

Tabela 4.2 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*, b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com *Var* representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela *Cerco de Lisboa*.

Cerco de Lisboa

Nº de cores em CIELAB		Antes	Depois	Var. (%)	Volume		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	10213	8100	-20,69		Total	43171,31	16358,66	-62,11
Q1	7055	6114	-13,34	Q1	18667,06	11195,81	-40,02		
Q2	588	248	-57,82	Q2	7246,98	1718,69	-76,28		
Q3	300	180	-40,00	Q3	7362,84	1009,35	-86,29		
Q4	2566	1943	-24,28	Q4	11655,29	4573,12	-60,76		

Nº de cores em $CIE(a^*, b^*)$		Antes	Depois	Var. (%)	Área		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	1129	575	-49,07		Total	1988,82	769,26	-61,32
Q1	616	372	-39,61	Q1	711,91	402,02	-43,53		
Q2	116	47	-59,48	Q2	289,66	78,56	-72,88		
Q3	111	47	-57,66	Q3	293,62	45,30	-84,57		
Q4	326	131	-59,82	Q4	460,45	149,15	-67,61		

Tabela 4.3 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*, b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com *Var* representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela *Senhora de Chapéu*.

Senhora de Chapéu

N° de cores em CIELAB		Antes	Depois	Var. (%)	Volume		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	43150	19007	-55,95			Total	192785,17	41715,49
Q1	18391	8549	-53,52		Q1	50998,34	22516,73	-55,85	
Q2	5782	342	-94,09		Q2	27831,09	3748,91	-86,53	
Q3	5166	1675	-67,58		Q3	30605,84	4970,08	-83,76	
Q4	15133	9170	-39,40		Q4	69996,85	16176,10	-76,89	

N° de cores em $CIE(a^*, b^*)$		Antes	Depois	Var. (%)	Área		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	2694	1290	-52,12			Total	4579,83	1838,14
Q1	1021	680	-33,40		Q1	1290,13	821,15	-36,35	
Q2	419	56	-86,63		Q2	717,45	161,93	-77,43	
Q3	453	161	-64,46		Q3	802,77	158,45	-80,26	
Q4	889	443	-50,17		Q4	1499,22	464,61	-69,01	

Tabela 4.4 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*, b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com *Var* representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a *Tronco nu masculino sentado*.

Tronco nu masculino sentado

N° de cores em CIELAB		Antes	Depois	Var. (%)	Volume		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	5395	7213	33,70			Total	11103,33	13898,54
Q1	4003	5691	42,17		Q1	9040,01	10591,99	17,17	
Q2	171	153	-10,53		Q2	685,58	1142,64	66,67	
Q3	50	80	60,00		Q3	455,76	336,87	-26,09	
Q4	1291	1397	8,21		Q4	3964,05	3945,69	-0,46	

N° de cores em $CIE(a^*, b^*)$		Antes	Depois	Var. (%)	Área		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	468	557	19,02			Total	641,20	730,86
Q1	291	393	35,05		Q1	355,75	405,14	13,88	
Q2	31	34	9,68		Q2	38,75	63,32	63,41	
Q3	14	21	50,00		Q3	27,81	17,64	-36,59	
Q4	144	123	-14,58		Q4	167,46	156,82	-6,35	

Tabela 4.5 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*, b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com *Var* representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela Cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*

Cópia do *Retrato Carlos I de Inglaterra*

Nº de cores em CIELAB		Antes	Depois	Var. (%)	Volume		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	5531	5864	6,02		Total	9334,63	16582,80	77,65
Q1	3692	3970	7,53	Q1	7826,02	7940,70	1,47		
Q2	448	202	-54,91	Q2	1776,85	2416,40	35,99		
Q3	323	193	-40,25	Q3	716,74	608,07	-15,16		
Q4	1274	1808	41,92	Q4	2987,60	7299,79	144,34		

Nº de cores em CIE $a^* b^*$		Antes	Depois	Var. (%)	Área		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	631	616	-2,38		Total	767,45	1216,07	58,46
Q1	404	395	-2,23	Q1	407,57	421,73	3,47		
Q2	54	44	-18,52	Q2	113,03	160,39	41,90		
Q3	40	32	-20,00	Q3	41,89	39,49	-5,73		
Q4	157	179	14,01	Q4	170,57	399,21	134,04		

Tabela 4.6 Tabela representativa com os valores do número de cores em CIELAB, em $CIE(a^*, b^*)$, do volume e da área antes e após o restauro, para a totalidade das cores da pintura e por quadrante. A coluna assinalada com *Var* representa a variação em percentagem em relação ao valor inicial, para a tela Cópia de *Infanta*.

Cópia de *Infanta*

Nº de cores em CIELAB		Antes	Depois	Var. (%)	Volume		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	5573	5325	-4,45		Total	35047,79	12657,62	-63,88
Q1	3324	3457	4,00	Q1	20767,78	9293,81	-55,25		
Q2	275	236	-14,18	Q2	3293,69	938,33	-71,51		
Q3	359	264	-26,46	Q3	2888,08	440,98	-84,73		
Q4	1719	1513	-11,98	Q4	10717,45	5922,70	-44,74		

Nº de cores em CIE (a^*, b^*)		Antes	Depois	Var. (%)	Área		Antes	Depois	Var. (%)
	Total	1008	587	-41,77		Total	1424,55	840,24	-41,02
Q1	531	323	-39,17	Q1	745,23	387,57	-47,99		
Q2	63	29	-53,97	Q2	95,27	52,21	-45,20		
Q3	90	34	-62,22	Q3	90,17	24,60	-72,72		
Q4	345	220	-36,23	Q4	448,93	259,54	-42,19		

4.3 Reflectância por quadrantes antes e após o restauro

Com base na divisão das cores de uma pintura em quadrantes, foi determinada a reflectância média antes e depois da intervenção para cada comprimento de onda.

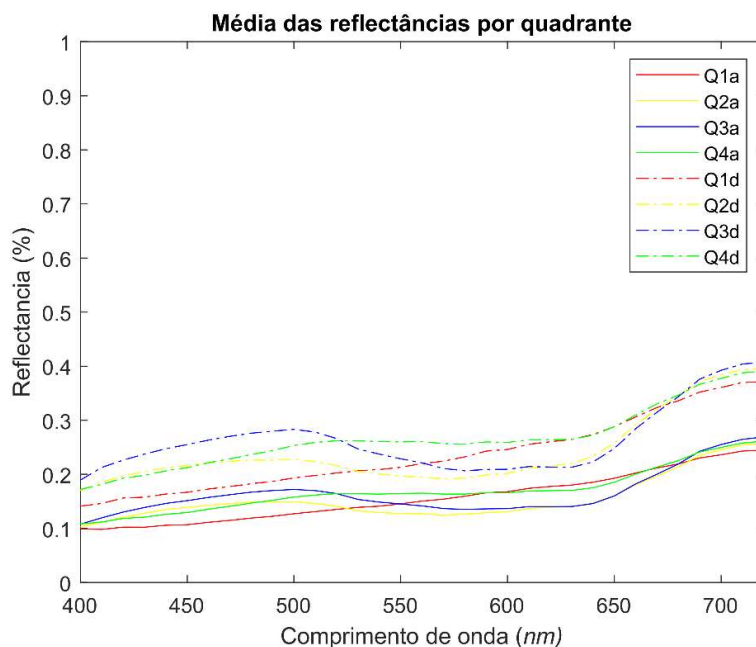


Figura 4.8 Média da reflectância por quadrante para a pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*. Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.

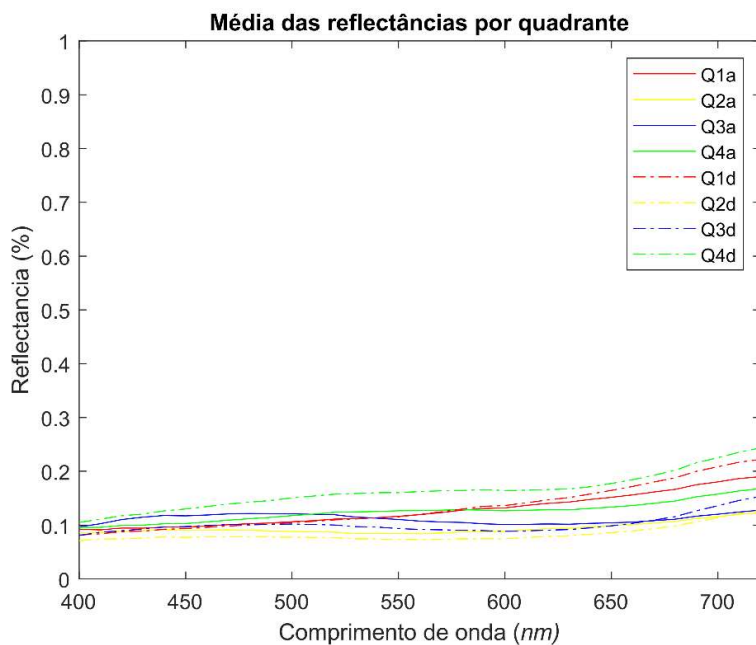


Figura 4.9 Média da reflectância por quadrante para a pintura *Cerco de Lisboa*. Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente.

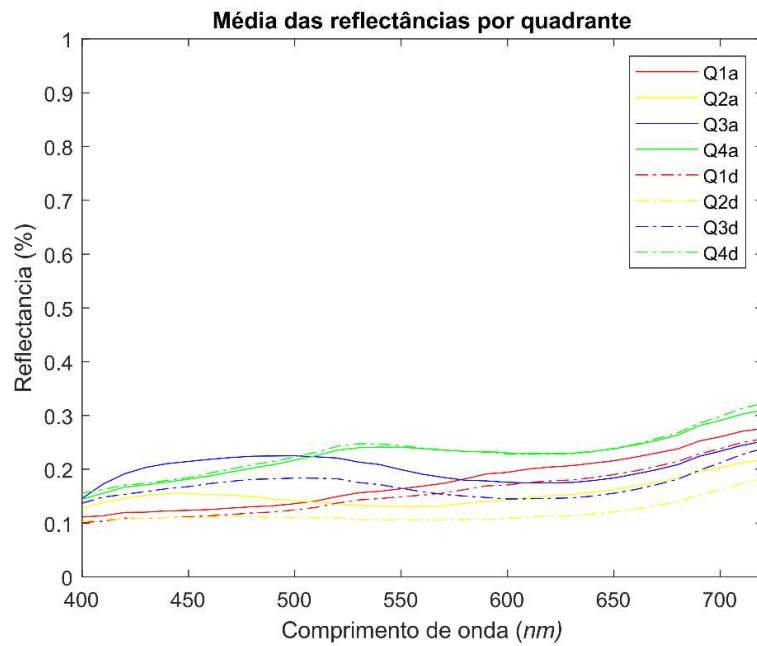


Figura 4.10 Média da reflectância por quadrante para a pintura *Senhora de Chapéu*. Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente

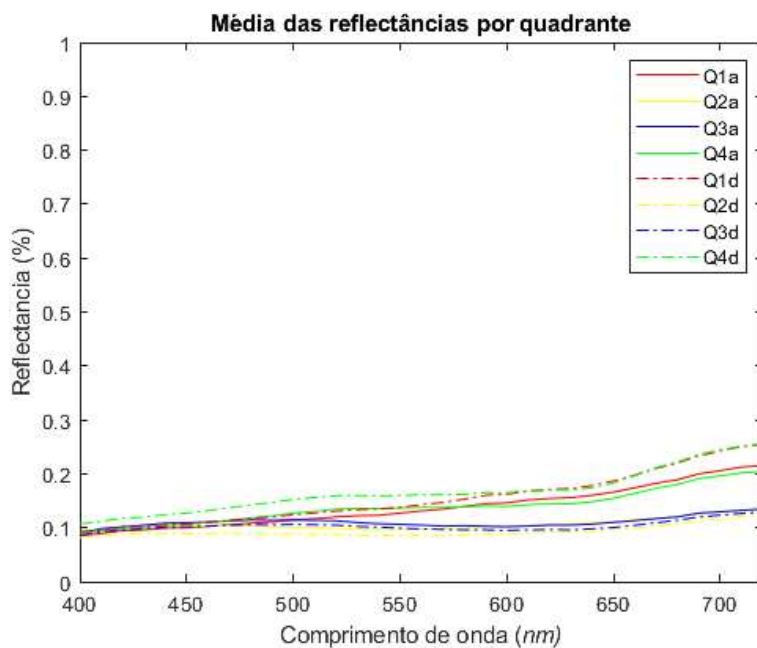


Figura 4.11 Média da reflectância por quadrante para a pintura *Tronco nu masculino sentado*. Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente

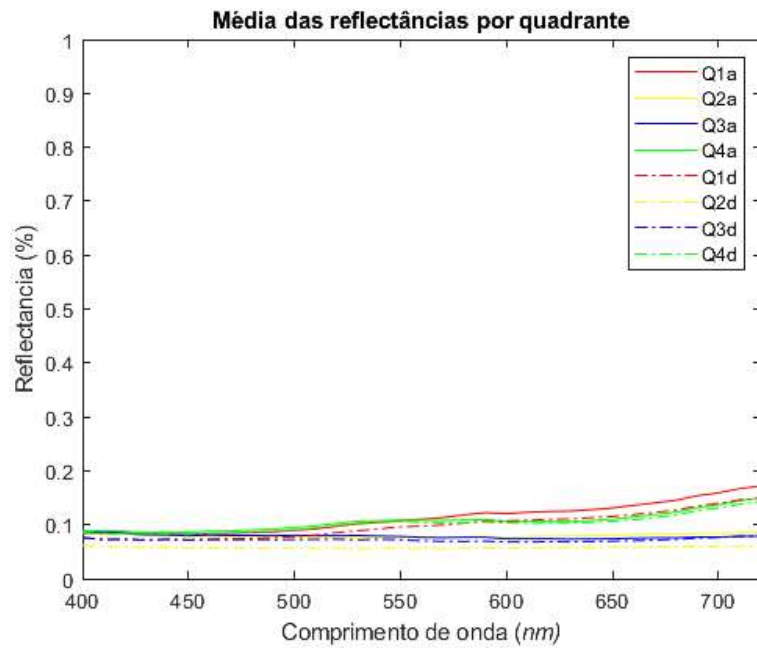


Figura 4.12 Média da reflectância por quadrante para a pintura cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*. Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente

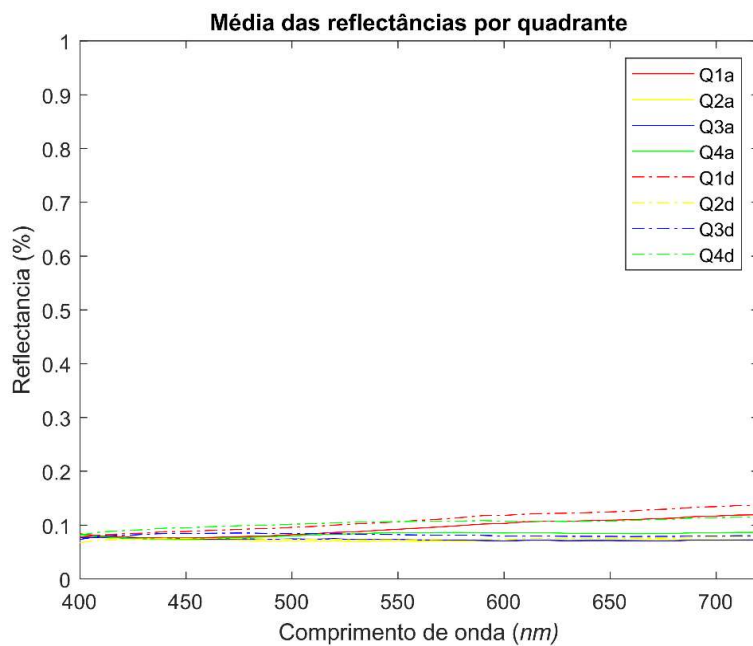


Figura 4.13 Média da reflectância por quadrante para a pintura cópia de *Infanta*. Q1a, Q2a, Q3a e Q4a e os valores Q1d, Q2d, Q3d e Q4d referem-se às pinturas antes e depois do restauro, respetivamente

4.4 Efeito da camada protetora

A influência da camada protetora em cada quadrante e na totalidade das cores de uma pintura, foi calculada através das reflectâncias antes e depois do restauro. Tal como descrito anteriormente, procurou-se estimar o efeito global da remoção da camada protetora utilizando a média global das reflectâncias da pintura e o efeito em classes de cores utilizando as reflectâncias dos quadrantes Q1, Q2, Q3 e Q4. Desta forma é possível verificar em que cores tem a camada protetora um efeito maior.

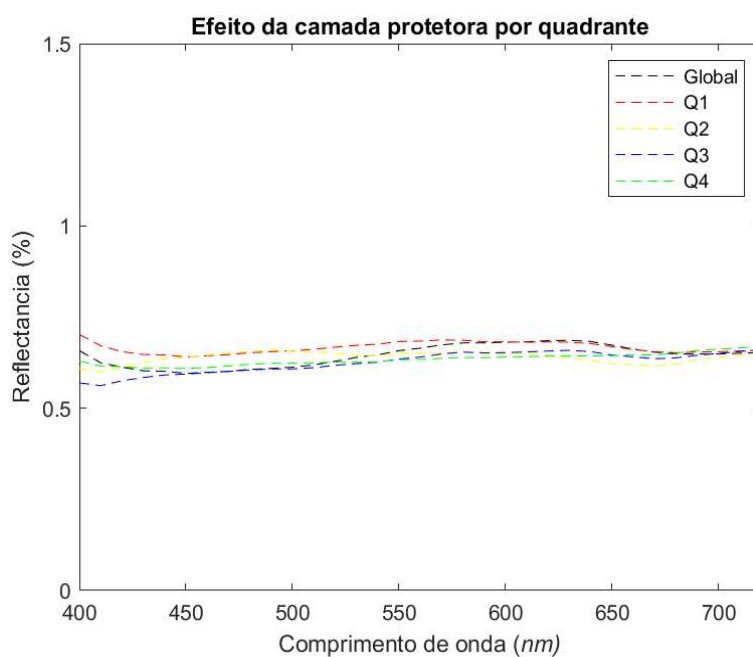


Figura 4.14 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*.

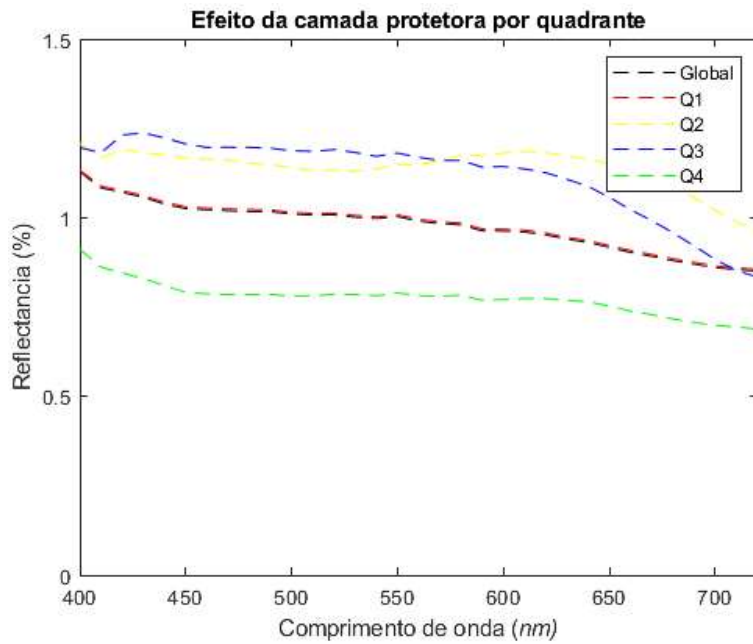


Figura 4.15 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura *Cercos de Lisboa*

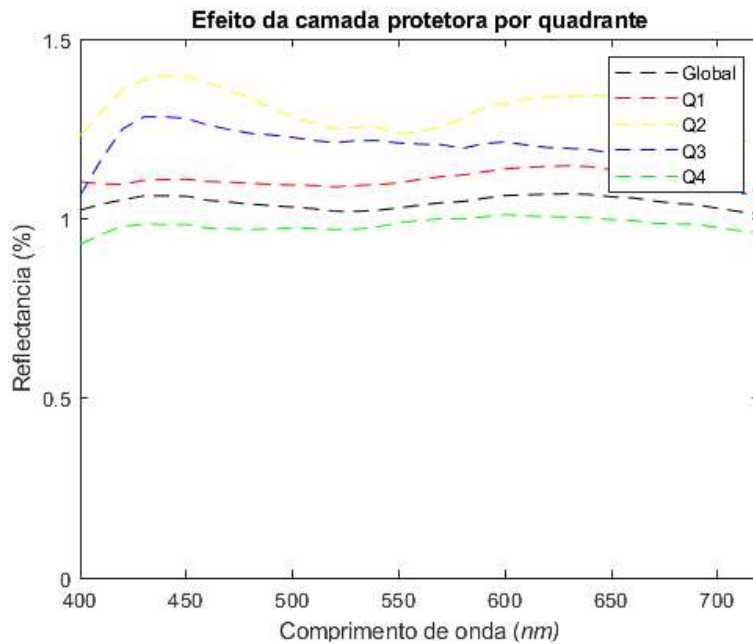


Figura 4.16 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura *Senhora de Chapéu*.

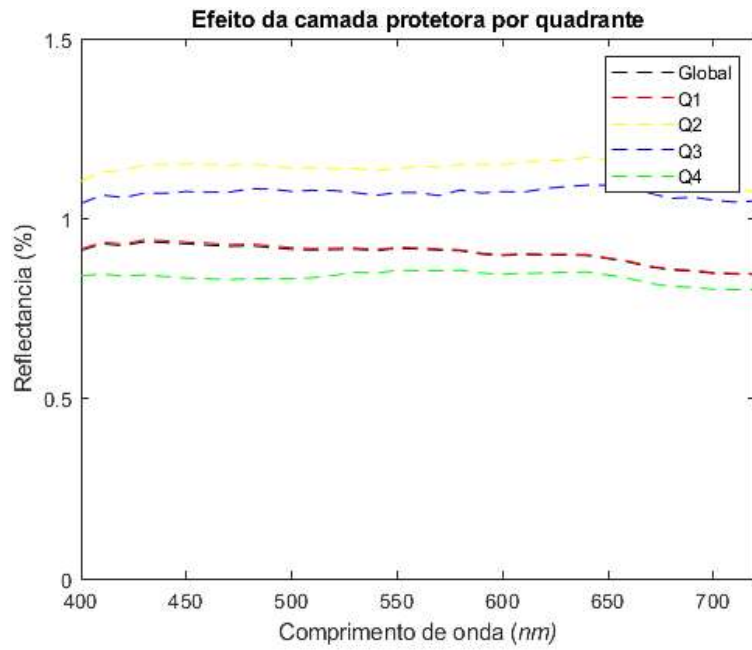


Figura 4.17 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura *Tronco nu masculino sentado*.

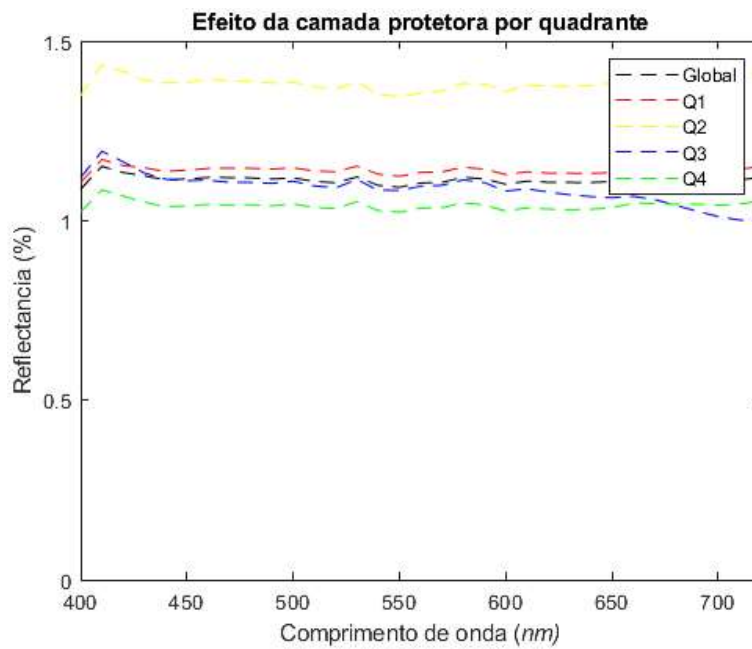


Figura 4.18 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura *Cópia do Retrato de Carlos I de Inglaterra*.

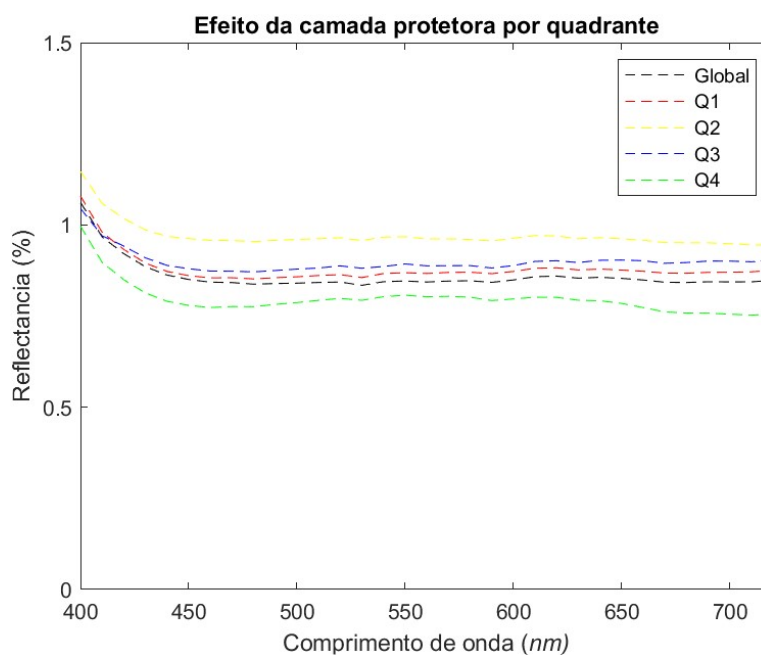


Figura 4.19 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante. Dados referentes à pintura cópia de *Infanta*.

4.5 Reflectâncias simuladas através do efeito da camada protetora

Após a estimativa do efeito da camada protetora na diversidade cromática das pinturas analisadas, é possível tentar simular a aparência de cada uma das pinturas retirando digitalmente a camada protetora. Nas figuras a seguir apresentadas, representa-se em CIELAB o volume de cores para a pintura após o restauro, o volume de cores para a pintura assumindo o efeito da camada protetora global e o volume de cores assumindo o efeito da camada protetora por quadrante, considerando nestes dois últimos casos a simulação partindo da pintura antes do restauro.

Quanto mais próximo forem os volumes, melhor será a eficácia da simulação. Para cada imagem foi utilizada a informação da camada protetora correspondente.

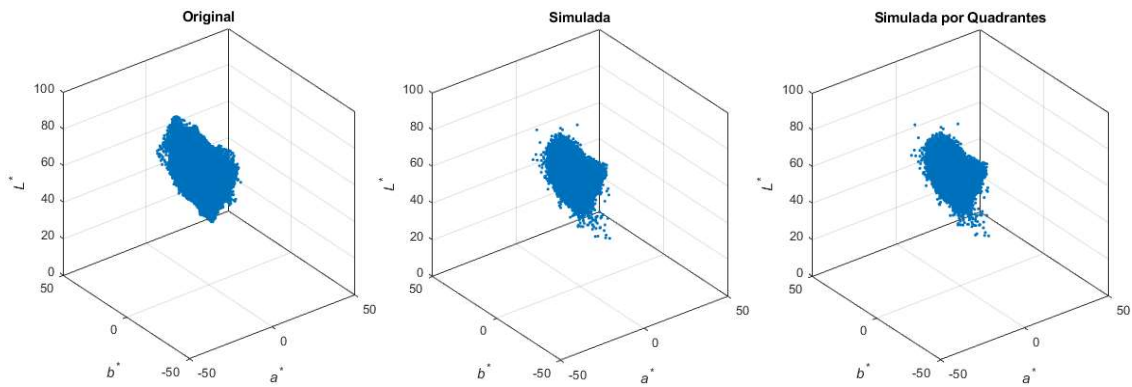


Figura 4.20 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*.

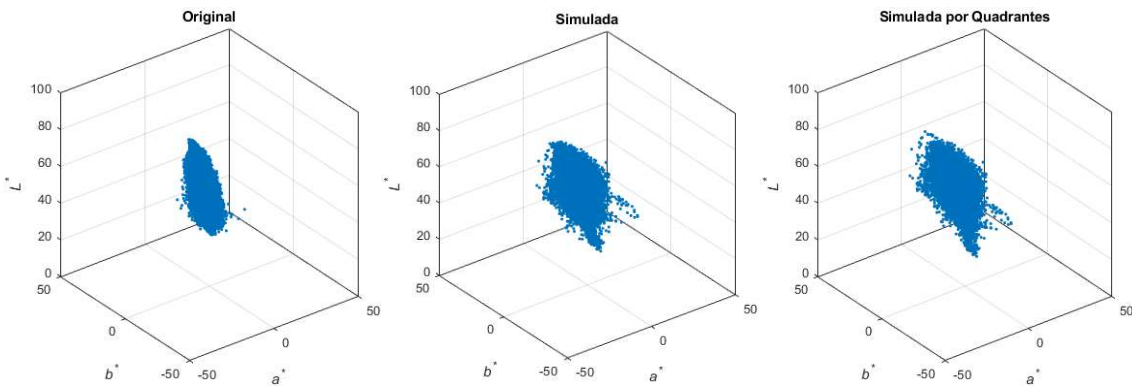


Figura 4.21 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura *Cercos de Lisboa*.

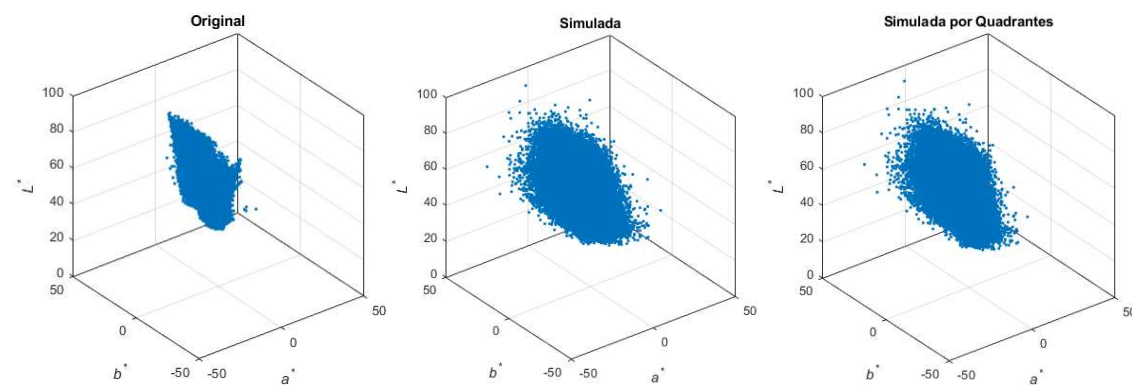


Figura 4.22 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura *Senhora de Chapéu*.

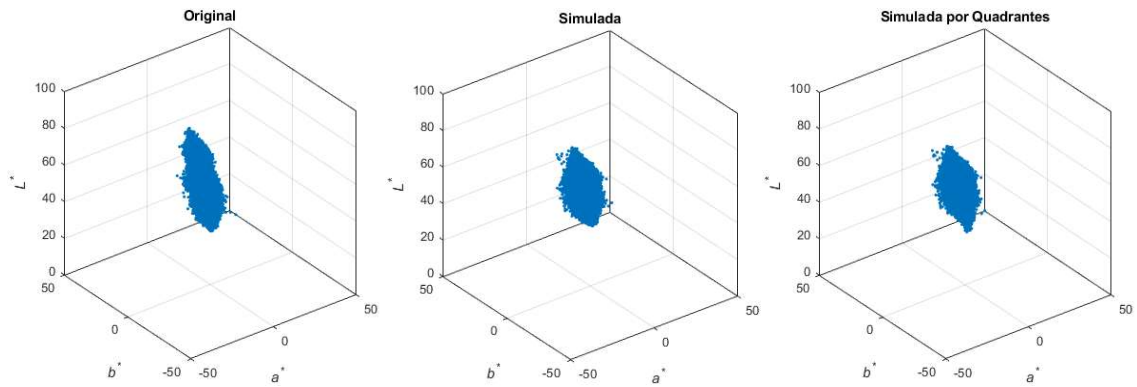


Figura 4.23 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura *Tronco nu masculino sentado*.

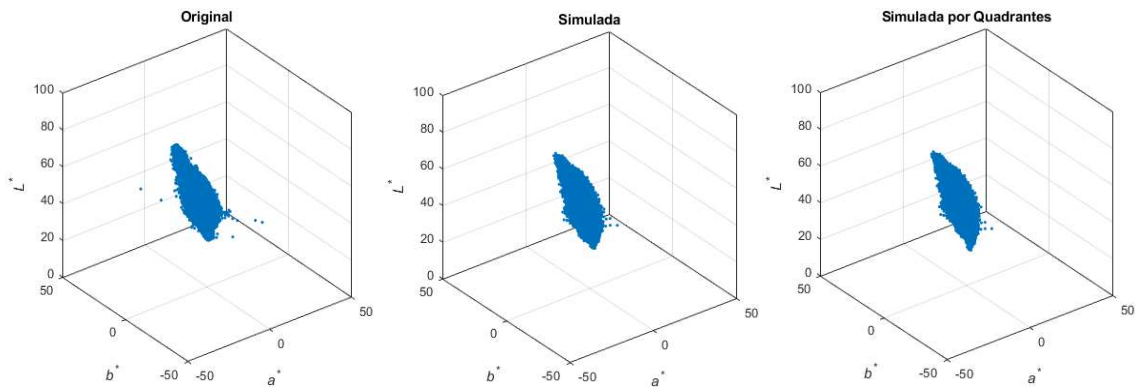


Figura 4.24 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*.

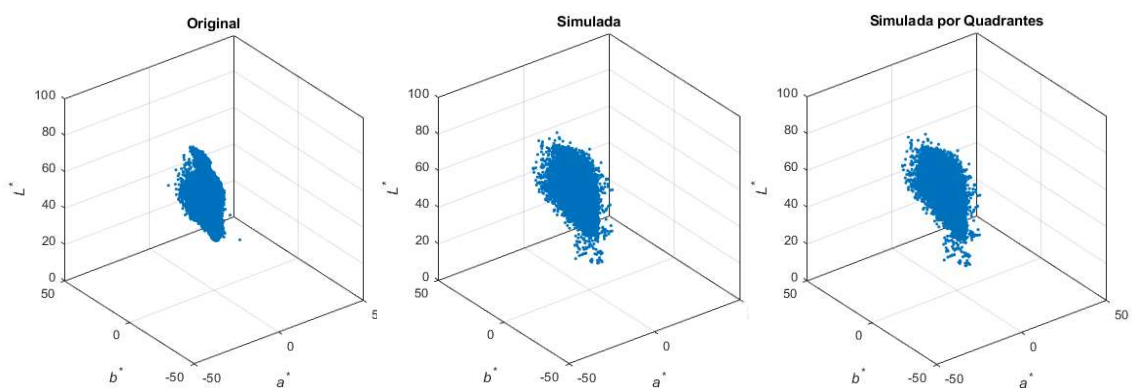


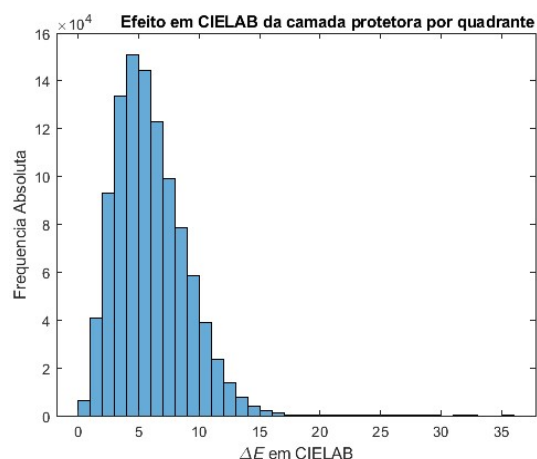
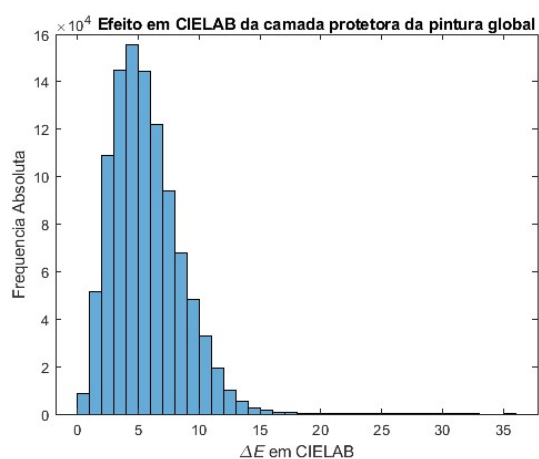
Figura 4.25 Representação em CIELAB das coordenadas cromáticas referentes à pintura após o restauro e das possíveis coordenadas cromáticas simuladas através da influência da camada protetora obtida a partir da análise por quadrantes e global, da pintura cópia de *Infanta*.

4.6 Estimativa da Diferença de cor a partir da distância Euclidiana

Dado que a comparação entre volumes é dificultada pela quantidade de coordenadas cromáticas disponíveis, procurou-se outra forma de estimar, quantitativamente, as diferenças entre as imagens simuladas a partir da camada protetora estimada globalmente e por quadrantes e a imagem efetivamente obtida após o restauro físico. Para tal comparou-se, pixel a pixel, a diferença de cor a partir do cálculo da distância Euclidiana no espaço de cor CIELAB. Uma vez que cada imagem possui muitos pixels e correspondentes coordenadas cromáticas, foi necessário determinar a frequência com que as diferenças de cor ocorriam. Se as imagens fossem iguais, a curva de frequências teria uma única coluna junto do $\Delta E=0$. Uma curva com distribuição de frequências para vários ΔE será tanto melhor quanto o seu pico esteja mais próximo de $\Delta E=0$. Esta distribuição de frequências foi estimada para o volume CIELAB e ignorando a coordenada de luminosidade para perceber se as diferenças cromáticas seriam menores que as diferenças considerando a luminosidade.

Um observador standard consegue distinguir diferenças de cor na ordem de $\Delta E=2.2$ JND em imagens complexas, ou seja, todas as cores que distarem mais de 2.2 unidades JND em CIELAB vão ser percebidas como cores diferentes.

Pintura A - *Nuno Álvares Pereira em Valverde*



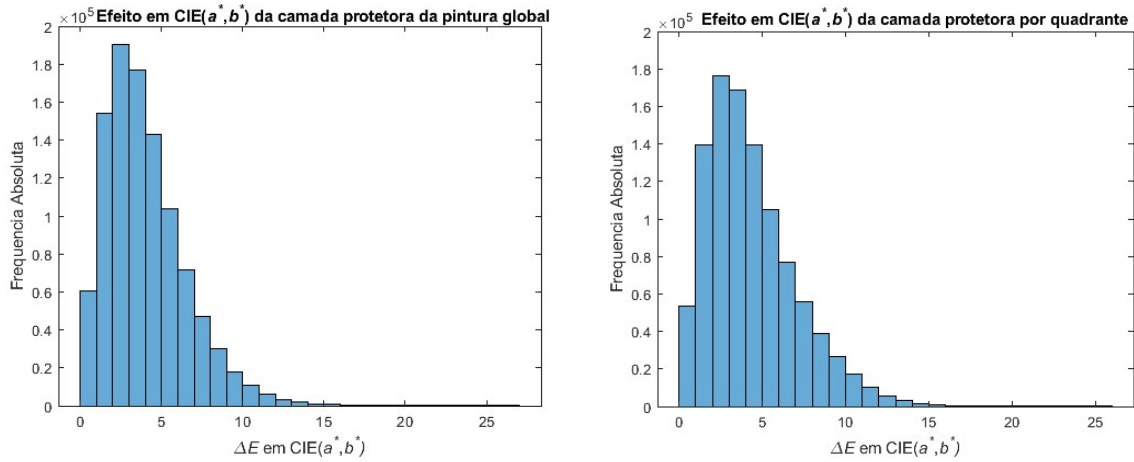


Figura 4.26 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde* entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a*,b*).

Pintura B – *Cerco de Lisboa*

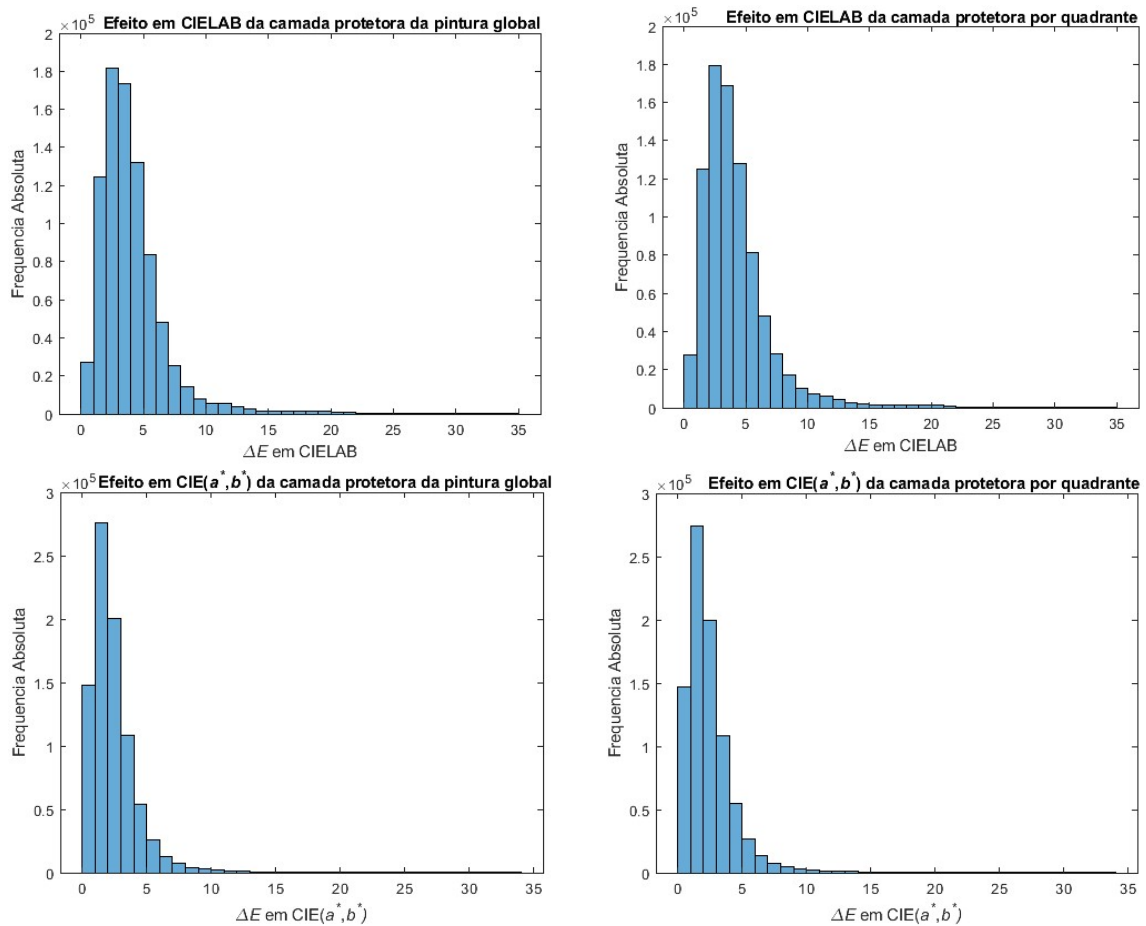


Figura 4.27 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura *Cerco de Lisboa* entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a*,b*).

Pintura C – *Senhora de Chapéu*

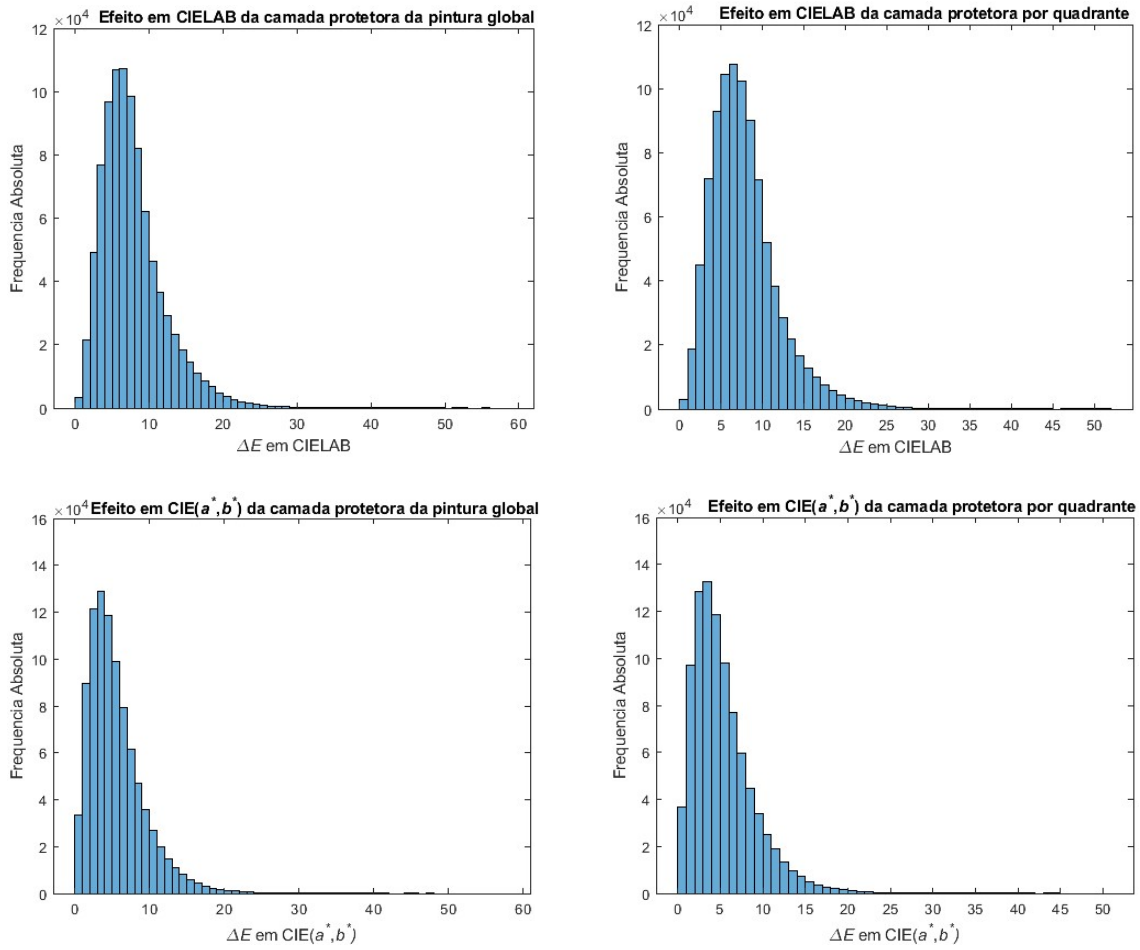
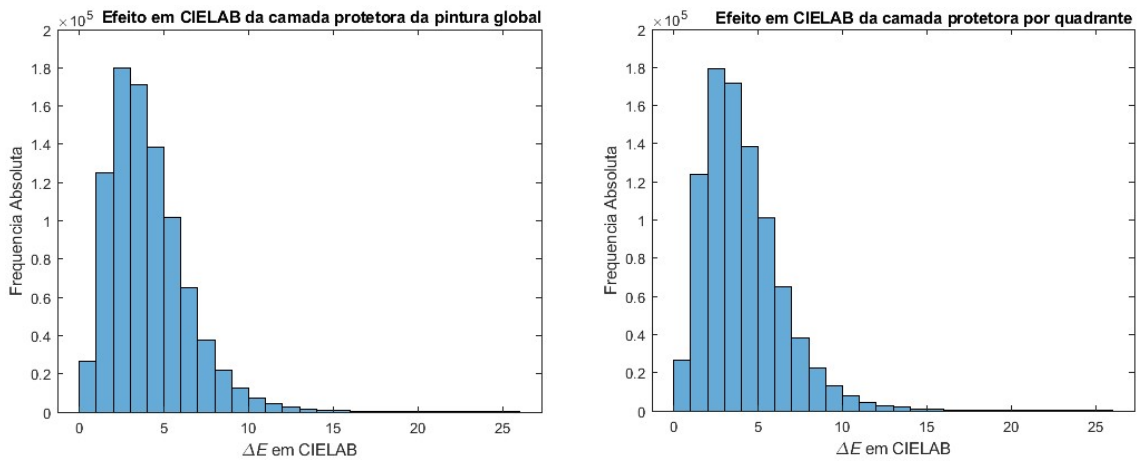


Figura 4.28 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura *Senhora de Chapéu* entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^* , b^*).

Pintura D – *Tronco nu masculino sentado*



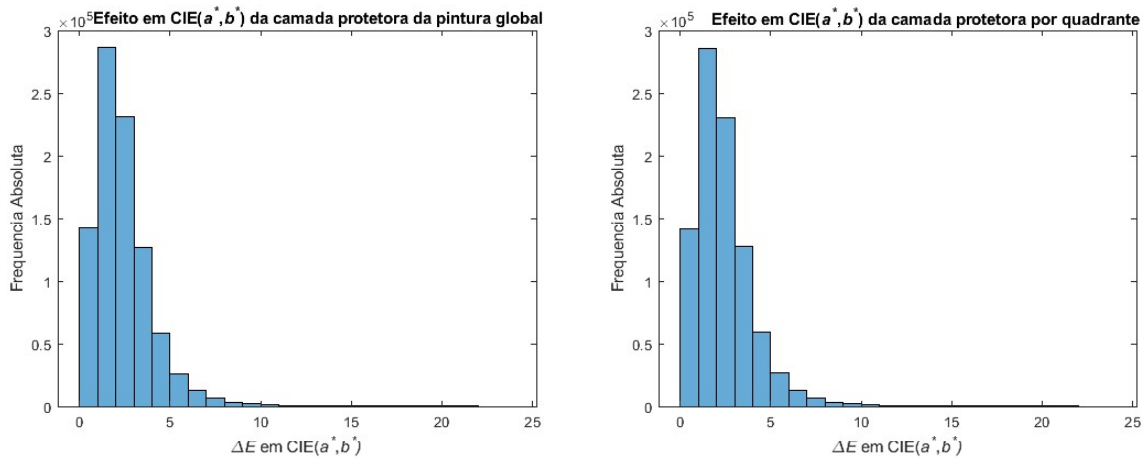


Figura 4.29 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura *Tronco nu masculino sentado* entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em $CIE(a^*, b^*)$.

Pintura E - Cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*

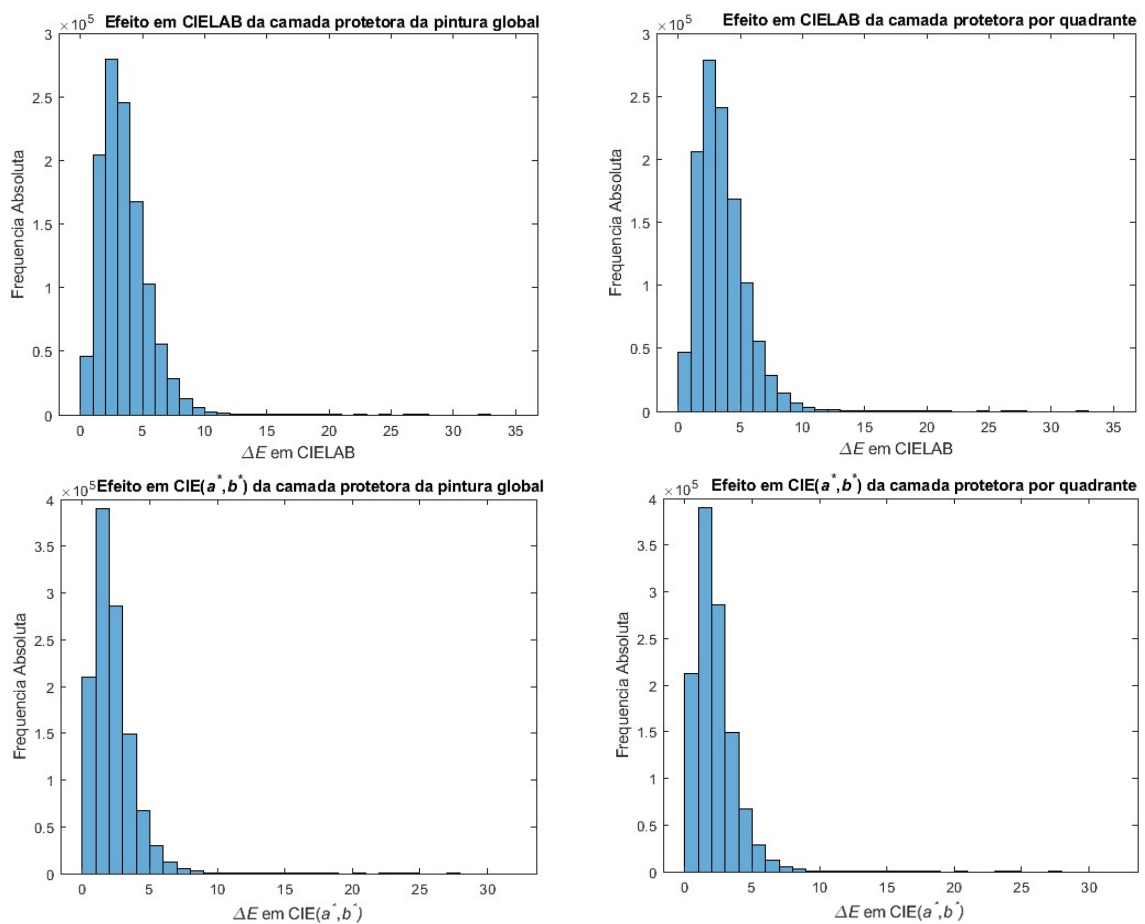


Figura 4.30 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em $CIE(a^*, b^*)$.

Pintura F – Cópia de *Infanta*

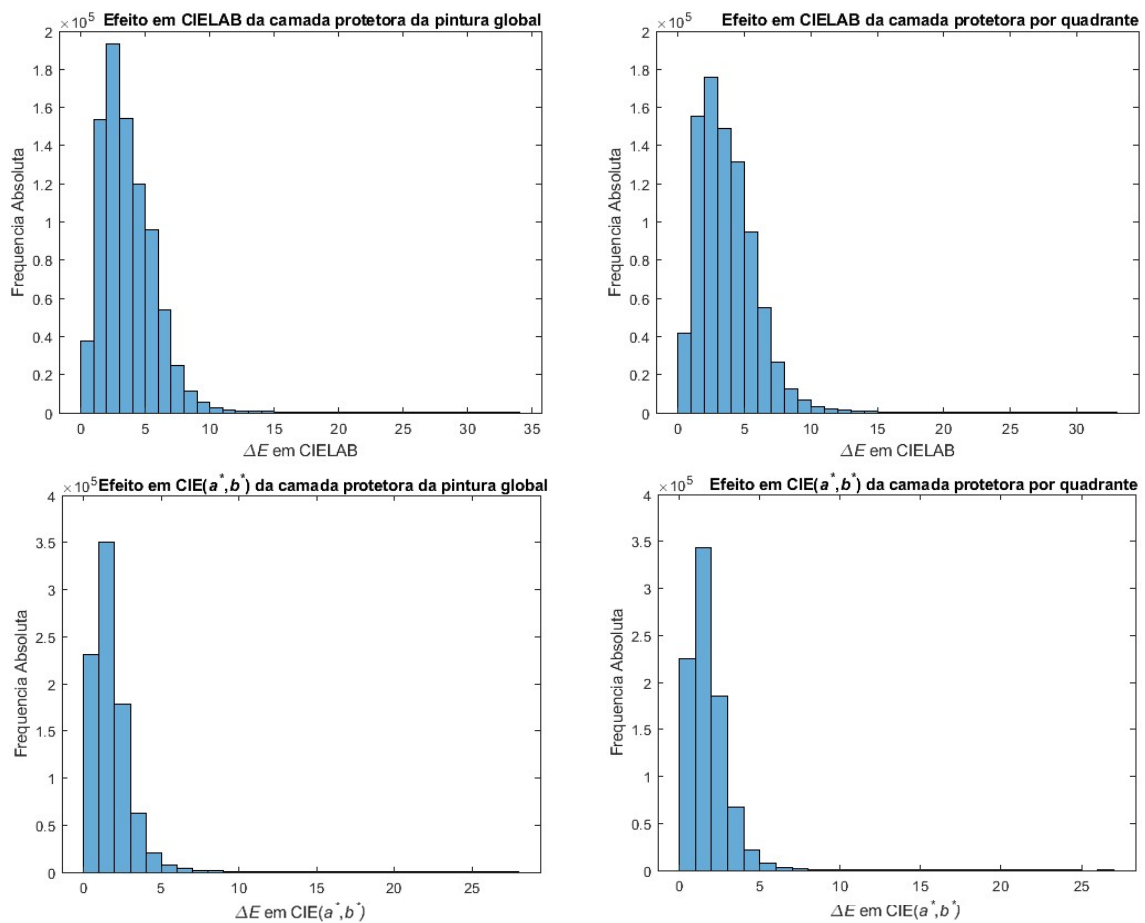


Figura 4.31 Gráfico das frequências absolutas de ΔE para a pintura cópia de *Infanta* entre a imagem com restauro virtual a partir da camada protetora obtida pela globalidade das cores e por quadrante e a imagem do restauro físico em CIELAB em CIE(a^* , b^*).

4.7 Simulação da remoção virtual da camada protetora

Após a estimativa do efeito da camada protetora por quadrante, simularam-se as imagens utilizando a informação obtida para cada pintura, individualmente. A partir das funções de distribuição espectral obtidas antes do restauro foi aplicado o efeito da camada protetora obtido a partir da Equação 20, o iluminante D65, o observador padrão CIE 1931 e os triestímulos estimados. De seguida foram estimadas as coordenadas RGB assumindo o espaço de cor sRGB. Uma simulação perfeita faria coincidir visualmente as imagens sem camada protetora após intervenção e a simulação sem camada protetora após intervenção.



Figura 4.32 Representação da pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde* antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.



Figura 4.33 Representação da pintura *Senhora de Chapéu* antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.

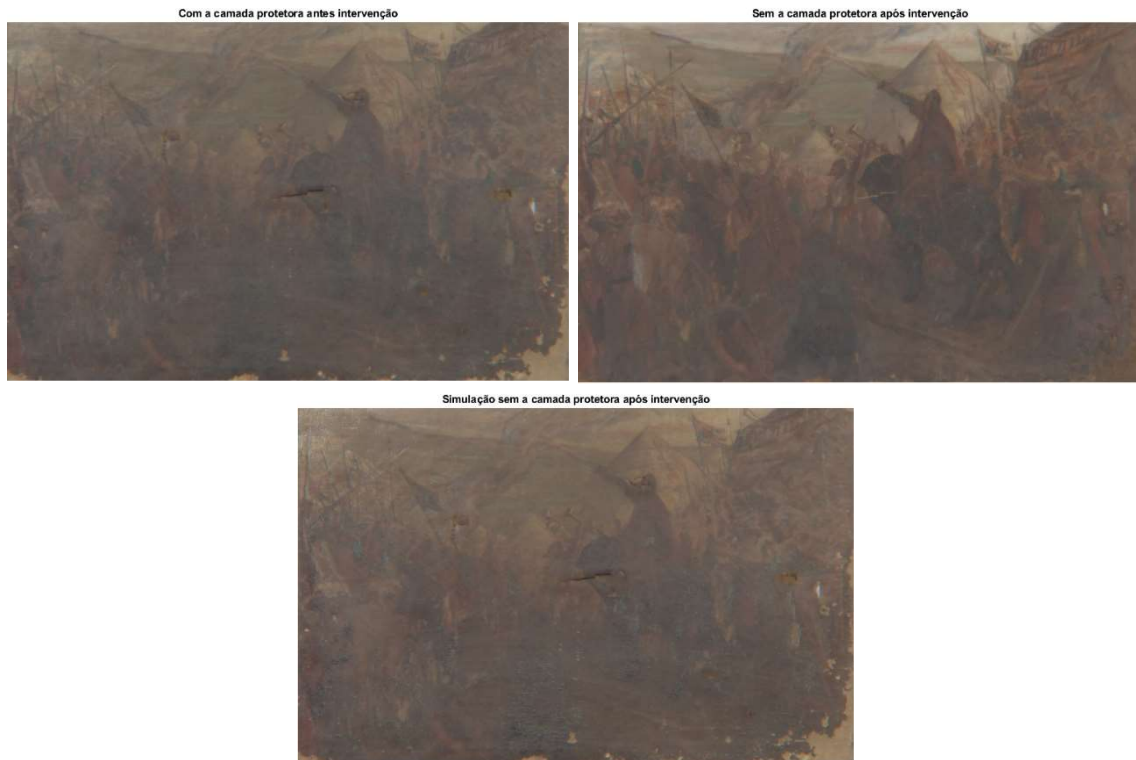


Figura 4.34 Representação da pintura *Cerco de Lisboa* antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.



Figura 4.35 Representação da pintura *Tronco nu masculino sentado* antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.

Com a camada protetora antes intervenção



Sem a camada protetora após intervenção



Simulação sem a camada protetora após intervenção



Figura 4.36 Representação da pintura cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.

Com a camada protetora antes intervenção



Sem a camada protetora após intervenção



Simulação sem a camada protetora após intervenção



Figura 4.37 Representação da pintura cópia de *Infanta* antes de qualquer intervenção, após a intervenção de restauro e a simulação de remoção virtual da camada protetora.

5. Discussão de resultados

O presente estudo visa descrever as alterações cromáticas provocadas pela existência de uma camada protetora escurecida sobre a pintura. A remoção física da camada protetora só pode ser realizada por especialistas em conservação e além de ser um processo demorado, pode não coincidir com as expectativas. Obter informações sobre como a pintura vai ser percebida após a remoção da camada protetora, sem fisicamente recorrer a qualquer intervenção, ou recorrer a intervenções de pequena escala, pode ser considerada uma ferramenta importante para o processo de restauro e assim para a própria conservação de obras de arte.

A oxidação da camada protetora ocorre devido à passagem do tempo em conjunto com uma exposição aos fatores de degradação externos. A camada protetora tem um valor de oxidação por unidade de tempo característico, mas esta oxidação pode ser acelerada pelos fatores externos. Como não há um registo completo de todo o percurso das pinturas desde o momento em que foram pintadas até ao momento em que foram selecionadas para serem amostra deste estudo, não existe forma de garantir que as telas estiveram sempre nas mesmas condições de conservação.

A camada de sujidade presente em algumas pinturas, entre o estrato de pigmento e a camada protetora, indica que as pinturas após terem sido pintadas estiveram expostas por um período de tempo sem a camada protetora. Quando aplicada a camada protetora não houve uma limpeza prévia das pinturas de forma que a sujidade acumulada vai influenciar os dados obtidos pelo sistema hiperespectral e os resultados do presente estudo.

No caso da pintura *Tronco nu masculino sentado*, quando realizado o corte da imagem para proceder ao ajuste de tamanho, recortamos um quadrado de cor mais clara presente na imagem após a remoção. Esse quadrado correspondia a uma zona de repintura. Nas restantes imagens foi realizado um corte o mais conservador possível de forma a obter o máximo de imagem e consequentemente o máximo de informação cromática. Assim, neste caso optou-se por descartar parte da pintura com o benefício de se poder comparar apenas áreas correspondentes com equivalente cromático e não utilizar áreas sem qualquer valor cromático.

Quando representadas em RGB algumas pinturas apresentam fissuras na camada protetora, que dificultam o processo de alinhamento de imagem. Este fenómeno advém do envelhecimento da camada protetora, que a torna mais rija e por esse facto parte, criando as

fissuras que vão prejudicar a aquisição de imagens e os resultados do presente trabalho, uma tela onde facilmente são verificadas essas rachaduras é na tela *Senhora de Chapéu*. Existe na literatura trabalhos que consideram estas fissuras e descrevem métodos de como preencher estas fissuras virtualmente [46], mas que não entram em consideração no presente trabalho devido a propormos o método mais acessível para registar alterações cromáticas.

5.1 Análise das métricas propostas

Quando analisada a representação das coordenadas cromáticas no espaço de cor CIELAB, antes e depois da remoção da camada protetora, é possível analisar visualmente e de grosso modo o volume da gama de cores, a sua localização em CIELAB e a existência de artefactos como por exemplo, cores não representativas da pintura. Se os dados referentes à imagem após remoção da camada protetora, sofrerem uma deslocação no eixo L^* , as imagens vão diferenciar em termos de luminosidade. Uma diminuição ou deslocação dos valores no sentido de luminosidades inferiores representa a percepção de cores mais escuras, enquanto que um aumento ou deslocação para valores de luminosidade superiores representa a percepção de cores mais claras. Se o volume da gama de cores aumenta nos dois sentidos da luminosidade, então o observador vai ter a percepção que na imagem as cores mais claras ficam ainda mais claras e as mais escuras ainda mais escuras, ou seja, aumenta o contraste. O volume também pode variar nos eixos a^* e b^* onde se verifica uma alteração da saturação das cores.

Com a análise do espaço de cor CIELAB verificamos que em *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, *Tronco nu masculino sentado* e na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* existe um aumento visível do volume da nuvem de cores, depois da remoção da camada protetora. Na pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde* é onde se verifica um maior aumento do volume da nuvem de cores. Nas pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde* e *Tronco nu masculino sentado* é possível prever que o observador após a remoção da camada protetora tenha a percepção de uma pintura, com cores mais saturadas e cores mais intensas, devido ao aumento visível do volume, e devido a uma deslocação para valores de luminância superiores. Já na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* há um aumento do volume que não é tão notório, se não considerarmos os pontos mais distantes, desta forma temos a indicação que a percepção de diferenças em termos de luminosidade e saturação não serão tão perceptíveis.

Nas pinturas *Cerco de Lisboa*, *Senhora de Chapéu* e na Cópia de *Infanta* é visível uma condensação da gama de cores após a remoção do efeito da camada protetora. Na pintura *Senhora de Chapéu* é onde se observa a maior condensação. Com esta informação podemos prever que o observador standard vai ter a percepção que a imagem após a remoção da camada protetora perde saturação e intensidade.

Na análise dos gráficos CIELAB é visível a existência de pontos que distam do restante gamut, esses pontos representam cores não representativas da pintura e vão influenciar quantitativamente o volume e a área, apesar da influência sobre a área ser menor, devido a se tratar de um espaço bidimensional, facto que não encontra eco na estimativa do número de cores discerníveis, uma vez que este último cálculo não entra em conta com os espaços vazios que a estimativa do cálculo de volume contempla.

A representação das coordenadas cromáticas de uma pintura no espaço $CIE(a^*, b^*)$ não tem em consideração a componente L^* , desta forma duas cores que difiram só em termos de luminosidade, no espaço de duas dimensões $CIE(a^*, b^*)$ vão coincidir na mesma coordenada a^* e b^* .

Em termos percetuais se houver uma maior dispersão de cores no espaço $CIE(a^*, b^*)$, o observador vai ter a percepção da existência de cores mais saturadas, enquanto que se a dispersão for mais pequena o observador vai ter a percepção de cores menos saturadas. Assim é possível extrapolar quais vão ser as diferenças na percepção do observador, a partir da representação do gamut de cores em $CIE(a^*, b^*)$.

Analisados os espaços de cor $CIE(a^*, b^*)$ das pinturas antes e após a remoção da camada protetora é possível verificar que as pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, *Tronco nu masculino sentado* e a cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* tiveram um aumento da área após a remoção. Podemos prever que o observador vai ter a percepção que quando removida a camada protetora, as pinturas ficam com cores mais saturadas do que anteriormente. Pelo contrário nas pinturas *Cerco de Lisboa*, *Senhora de Chapéu* e na cópia de *Infanta* verificasse uma diminuição da área após a intervenção. Desta forma o observador tem a percepção que quando removida a camada protetora, as cores tendem a ficar menos saturadas.

A análise destes gráficos com a distinção dos quadrantes, permite perceber quais as cores mais utilizadas por Adriano Sousa Lopes em cada pintura individualmente. Esta conclusão advém

da análise dos dados recolhidos da imagem após a remoção da camada protetora, devido a estes representarem a composição pictórica mais próxima da utilizada por Adriano Sousa Lopes, aquando da pintura.

É possível observar que em todas as pinturas os dois quadrantes com maior representação são o 1º e 4º quadrante respetivamente. Desta forma podemos concluir que o pintor utilizou uma gama de cores mais focada entre o vermelho e o verde incluindo assim as cores como o laranja e o amarelo, em menor representação estão o 2º e o 3º quadrante que compreendem as cores como o violeta, rosa e azul.

Tabela 5.1 Percentagens relativas do 1º e 4º quadrante em relação à totalidade da pintura.

	Após a intervenção		
	% de cores do 1º Q	% de cores do 4º Q	% de cores do 1ºQ + 4º Q
<i>Nuno Álvares Pereira em Valverde</i>	60,94	30,48	91,42
<i>Cerco de Lisboa</i>	75,48	23,99	99,47
<i>Senhora de Chapéu</i>	44,98	48,25	93,22
<i>Tronco nu masculino sentado</i>	78,90	19,37	98,27
<i>Cópia do Retrato de Carlos I de Inglaterra</i>	67,70	30,83	98,53
<i>Cópia de Infanta</i>	64,92	28,41	93,33

A Tabela 5.1 vem reforçar as conclusões retiradas da análise gráfica dos espaços de cor CIE(a^* , b^*), demonstrando que a percentagem mais baixa da soma dos dois quadrantes com maior peso relativo é de 91,42% na tela *Nuno Álvares Pereira em Valverde*. Comprova-se que Adriano de Sousa Lopes nas pinturas estudadas no presente trabalho utilizou essencialmente cores do 1º e 4º quadrante, em detrimento das cores do 2º e 3º quadrante, a mesma preferência de cores já foi relatada em trabalhos anteriores que analisavam pinturas de diferentes autores [41].

Da Tabela 4.1 à Tabela 4.6, estão representados os dados quantitativos de cada pintura antes e depois da remoção da camada protetora, são ainda apresentados os dados com a separação por quadrantes. As tabelas vêm validar em termos quantitativos a análise realizada visualmente à gama de cores em CIELAB e CIE(a^* , b^*). Os valores apresentados vieram assim reforçar que nas pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, *Tronco nu masculino sentado* e na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* houve um aumento do volume e da área do gamut de

cores, em contrapartida nas pinturas *Cerco de Lisboa*, *Senhora de Chapéu* e cópia de *Infanta* houve uma diminuição do volume e da área.

Da Tabela 4.1 à Tabela 4.6 também é possível observar os valores do número de cores discerníveis em CIELAB e CIE(a^* , b^*). Nas telas *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, *Tronco nu masculino sentado* e na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* é verificado um aumento do número de cores após a remoção da camada protetora em CIELAB. No espaço de cor CIE (a^* , b^*) é obtido esse mesmo aumento do número de cores excetuando na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* em que se verifica uma diminuição do número de cores, apesar da mesma ser pouco relevante, esta diminuição pode ser justificada por uma menor diversidade cromática da pintura, assumindo assim a existência de um maior número de cores que só se distinguem em termos de intensidade, quando estudada a gama de cores no espaço de duas dimensões, ao compactar os dados, a probabilidade de mais cores serem assumidas como uma só é maior. A tela *Nuno Álvares Pereira em Valverde* é onde se regista o maior aumento do número de cores em CIELAB: o número de cores aumentou de 7320 cores antes da remoção da camada protetora para 18052 cores após a remoção da camada protetora, um aumento de 146%. Considerando as obras de arte *Cerco de Lisboa*, *Senhora de Chapéu* e a cópia de *Infanta* há uma diminuição do número de cores discerníveis após a remoção da camada protetora, tanto no espaço de cor CIELAB como no espaço de cor CIE(a^* , b^*). A maior diminuição acontece na pintura *Senhora de Chapéu* de 43150 cores antes da remoção para 19007 representando assim uma variação de 55,95%.

No gráfico presente na Figura 4.7 é possível visualizar as variações de cada parâmetro em relação às pinturas antes de serem sujeitas a qualquer intervenção. As pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, *Tronco nu masculino sentado* e a cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* tiveram variações positivas em todos os parâmetros. A exceção é a cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* onde se verificou uma diminuição no número de cores em CIE(a^* , b^*), mas pouco representativa. Dentro deste primeiro grupo é de destacar a pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde* que teve variações superiores a 50 % em todos os parâmetros. Contrariamente, as pinturas *Cerco de Lisboa*, *Senhora de Chapéu* e a cópia de *Infanta* tiveram variações negativas em todos os parâmetros, o que significa que houve uma diminuição em relação à pintura antes da intervenção. Deste segundo grupo é de salientar que na tela *Senhora de Chapéu* foi onde se verificou as maiores variações negativas.

Representação da seleção dos pontos não representativos da pintura no espaço de cor CIELAB

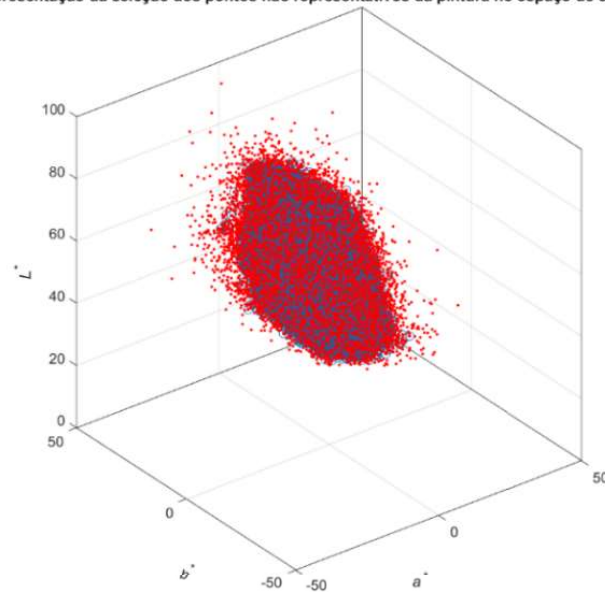


Figura 5.1 Representação da seleção dos pontos não representativos da pintura no espaço de cor CIELAB. Pontos vermelhos representam todas as coordenadas da pintura, os círculos azuis rodeiam todas as coordenadas que representam um número maior ou igual a dois pixéis.

Representação da seleção dos pontos não representativos da pintura no espaço de cor CIE (a^*, b^*)

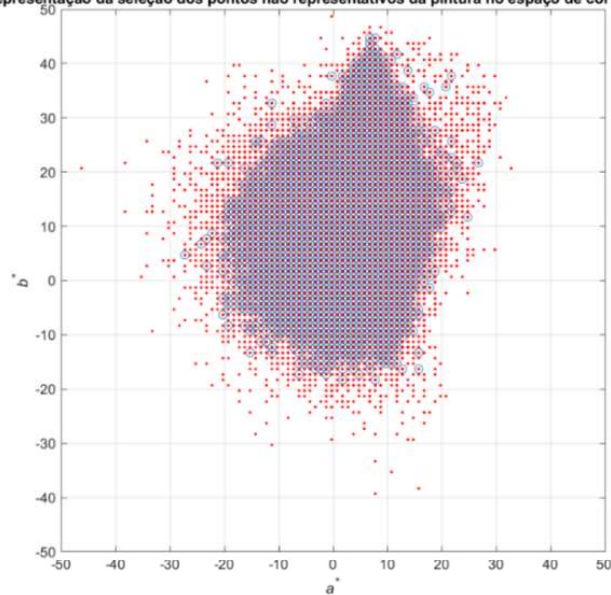


Figura 5.2 Representação da seleção dos pontos não representativos da pintura no espaço de cor CIE (a^*, b^*). Pontos vermelhos representam todas as coordenadas da pintura, os círculos azuis rodeiam todas as coordenadas que representam um número maior ou igual a dois pixéis.

Devido à existência de cores não representativas das pinturas que foram identificadas nos espaços de cor e de forma a determinar a influência destes artefactos na análise dos parâmetros, recorreremos ao Matlab como ferramenta para retirar e avaliar a sua influência no volume e na área. A primeira rotina dividia a gama de cores da pintura em cubos e contabilizava o número de cubos

não vazios que iriam representar as cores discerníveis da pintura, na área o processo era semelhante, mas com a divisão em quadrados ao contrário de cubos. De forma a retirar as coordenadas referentes a cores não representativas da pintura, foi elaborada uma nova rotina que desta vez retira todos os cubos que não tenham nenhum pixel ou que tenham um único pixel.

Na Figura 5.1 e Figura 5.2 está ilustrada a seleção de coordenadas em CIELAB e $CIE(a^*, b^*)$, que representem dois ou mais pixéis, respetivamente. É possível observar que a maior percentagem dos pontos que não cumprem essa condição estão em zonas mais periféricas. O limite de 2 pixéis foi estabelecido de forma a não ignorar um número muito elevado de cores.

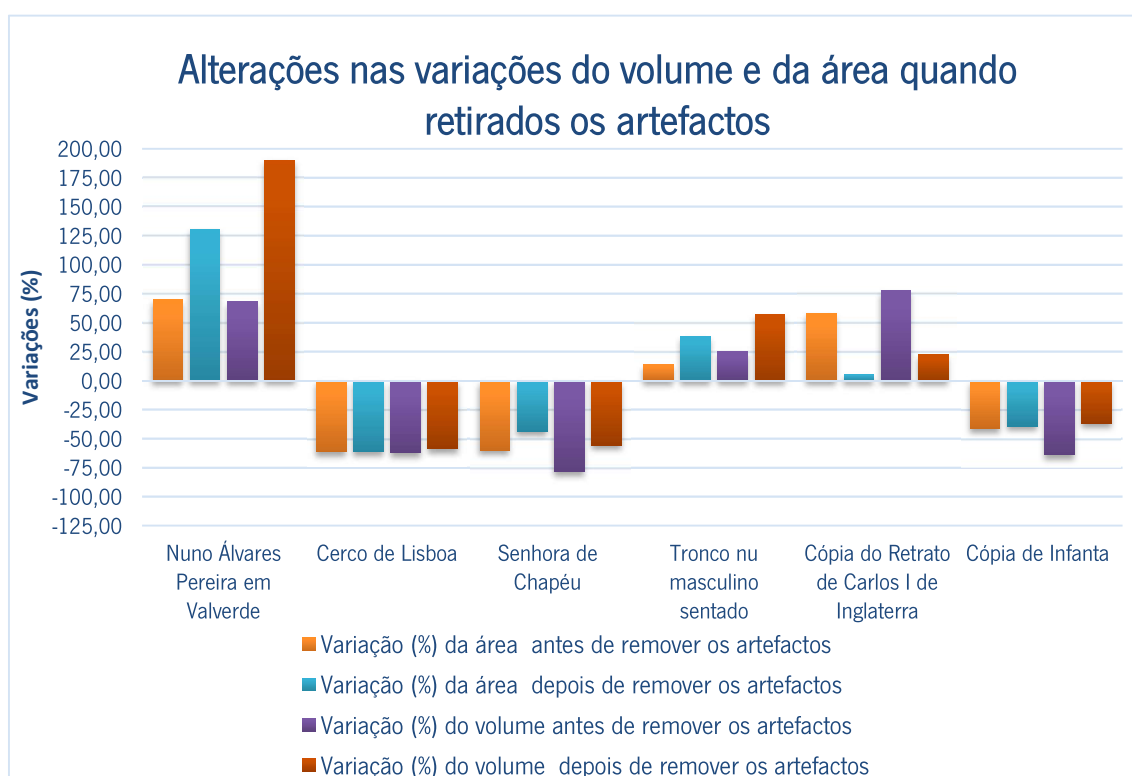


Figura 5.3 Alterações das variações da área e do volume quando retirados os artefactos

Através do gráfico da Figura 5.3 e da Tabela 5.2 é possível constatar que as variações com a nova transformação dos dados tendem para valores mais positivos, ou seja, as pinturas que tinham variações negativas ficam com variações menos negativas e as que tinham variações positivas mais positivas, exceto na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* que existe uma diminuição das variações.

No caso particular da tela cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* os artefactos estariam a influenciar o volume e a área. Após a remoção desses pontos os valores das variações do volume e da área diminuíram acentuadamente.

Tabela 5.2 Tabela com o valor da área e do volume antes e depois da remoção da camada protetora e com e sem os artefactos, e as correspondentes variações em percentagem.

Nuno Álvares Pereira em Valverde

Área		Antes	Depois	Var%	Volume	Antes	Depois	Var%
	Com artefactos	961,65	1632,59	69,77		19818,43	33314,00	68,10
Sem artefactos	616,00	1419,00	130,36	9322,67	27022,00	189,85		

Cerco de Lisboa

Área		Antes	Depois	Var%	Volume	Antes	Depois	Var%
	Com artefactos	1988,82	769,26	-61,32		43171,31	16358,66	-62,11
Sem artefactos	1402,50	546,50	-61,03	27532,17	11406,67	-58,57		

Senhora de Chapéu

Área		Antes	Depois	Var%	Volume	Antes	Depois	Var%
	Com artefactos	4579,83	1838,14	-59,86		192785,17	41715,49	-78,36
Sem artefactos	2391,00	1351,50	-43,48	68358,67	30384,00	-55,55		

Tronco nu masculino sentado

Área		Antes	Depois	Var%	Volume	Antes	Depois	Var%
	Com artefactos	641,20	730,86	13,98		11103,33	13898,54	25,17
Sem artefactos	349,50	483,00	38,20	5418,17	8516,00	57,17		

Cópia do Retrato de Carlos I de Inglaterra

Área		Antes	Depois	Var%	Volume	Antes	Depois	Var%
	Com artefactos	767,45	1216,07	58,46		9334,63	16582,80	77,65
Sem artefactos	535,00	565,50	5,70	6053,17	7416,83	22,53		

Cópia de Infanta

Área		Antes	Depois	Var%	Volume	Antes	Depois	Var%
	Com artefactos	1424,55	840,24	-41,02		35047,79	12657,62	-63,88
Sem artefactos	857,00	523,00	-38,97	12689,67	8055,33	-36,52		

Após avaliar as métricas propostas é possível concluir que as pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde* e *Tronco nu masculino sentado* tem variações positivas relevantes em todos os parâmetros, já a cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* tem variações positivas menos expressivas tendo mesmo uma variação negativa no número de cores discerníveis em CIE(a^* , b^*).

Desta forma podemos concluir que a remoção da camada protetora favorece a percepção cromática das duas primeiras pinturas de forma mais expressiva, enquanto que na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* o benefício não é tão expressivo.

Pelo contrário nas pinturas *Cerco de Lisboa*, *Senhora de Chapéu* e na cópia de *Infanta* são verificadas variações negativas, que indicam que quando retirada a camada protetora a percepção cromática das pinturas piora.

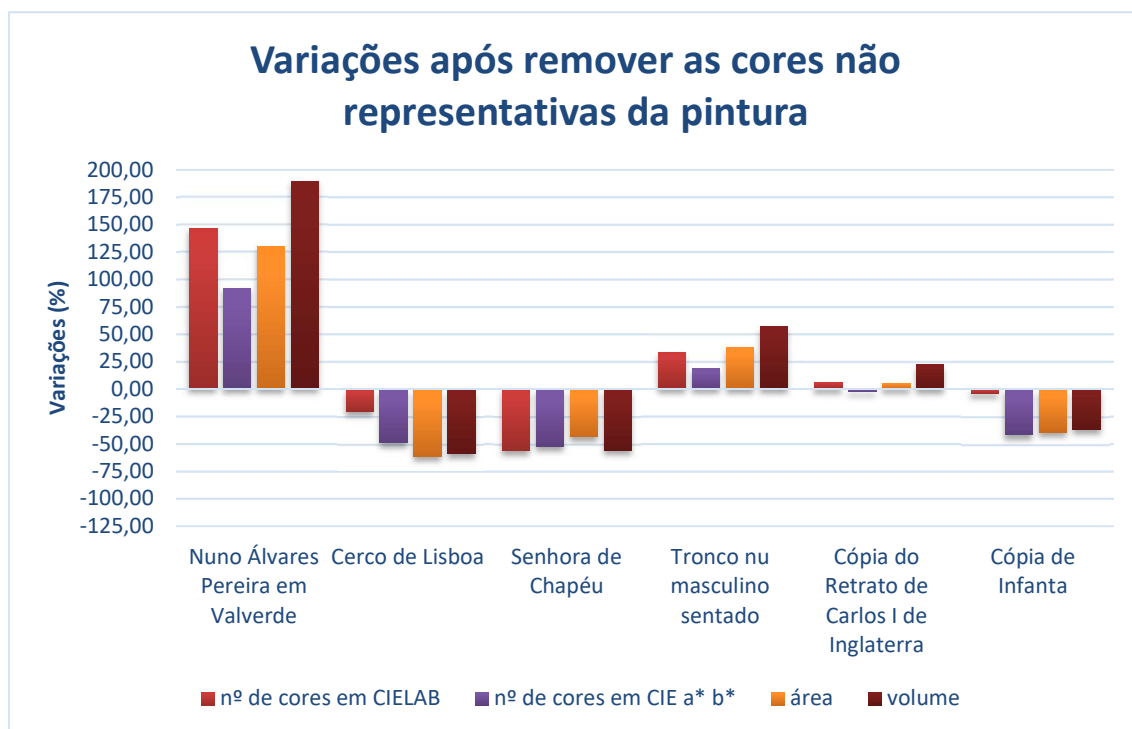


Figura 5.4 Variações dos parâmetros analisados com a remoção das cores não representativas das pinturas. Valores abaixo de zero representam uma diminuição, valores acima de zero representam um aumento.

5.2 Reflectância antes e após a remoção da camada protetora

Após a divisão do volume de cores CIELAB por quadrantes é possível fazer uma análise mais detalhada antes e após o restauro, com o intuito de determinar como as reflectâncias de cada quadrante se comportam com a remoção da camada protetora. A reflectância é a razão entre o fluxo de radiação eletromagnética refletido e o fluxo de radiação eletromagnética incidente. Se o valor da reflectância for zero não há reflexão, em contrapartida se for um, toda a radiação é refletida.

Na Figura 4.8 referente a *Nuno Álvares Pereira em Valverde* a reflectância dos quadrantes antes da remoção é inferior à reflectância depois da remoção, com esta variação é possível concluir que a remoção da camada protetora levou a um aumento da reflectância de todos os quadrantes. Na Figura 4.9 onde estão representadas as reflectâncias da tela *Cerco de Lisboa*, e na Figura 4.11 referente a *Tronco nu masculino sentado* é possível constatar que a reflectância do 1º e 4º quadrante aumentou, já no 2º e 3º quadrante diminuiu com a remoção da camada protetora. No caso da *Senhora de Chapéu* com as reflectâncias representadas na Figura 4.10 o 1º, 2º e 3º quadrante tem a reflectância diminuída com a intervenção, o 4º quadrante não sofre nenhuma alteração significativa. A Figura 4.12 representa as reflectâncias da cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* que apresentam uma diminuição no 1º e 2º quadrante, sendo que no 3º e 4º quadrante as variações são pouco acentuadas. Na Cópia de *Infanta* com as suas reflectâncias expressas na Figura 4.13, é possível observar que no 1º, 3º e 4º quadrante a reflectância antes da remoção da camada protetora era inferior, já no 2º quadrante não há variações significativas.

Se houver um aumento das reflectâncias após o processo de remoção da camada protetora, podemos concluir que a camada protetora estava a prejudicar a passagem de informação cromática. Em contrapartida se houver uma diminuição da reflectância quando removida a camada protetora, significa que a camada protetora ainda estava a potencializar a informação cromática. Como em algumas pinturas as variações dos quadrantes não são consensuais, temos de ter em consideração que 90% das cores de todas as pinturas são representadas pelo 1º e 4º quadrante. Desta forma nas pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, *Cerco de Lisboa*, *Tronco nu masculino sentado* e na Cópia de *Infanta* houve um favorecimento das reflectâncias quando retirada a camada protetora, pelo contrário na tela *Senhora de Chapéu* e na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* houve uma diminuição da reflectância quando removida a camada protetora.

As reflectâncias por quadrante de todas as pinturas são inferiores a 0.4, no caso particular da cópia de *Infanta* este valor diminui para cerca de 0.1. Estes valores indicam uma forte absorção, por parte dos pigmentos. Pinturas com cores mais escuras, têm maior absorção, como é o caso da cópia de *Infanta* que se trata de um retrato dentro de uma oval de cor preta, ou da cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* que foi pintado para ter aspeto envelhecido, daí se terem verificado valores de reflectâncias mais reduzidos.

É visível à vista desarmada que a tela *Senhora de Chapéu* tem na sua composição pictórica vários tons de azul, este facto aparece representado na média das reflectâncias, com uma maior reflectância na zona do espectro correspondente. Quando analisadas as reflectâncias é possível verificar que com a remoção da camada protetora essa zona do espectro tem uma perda acentuada de reflectância.

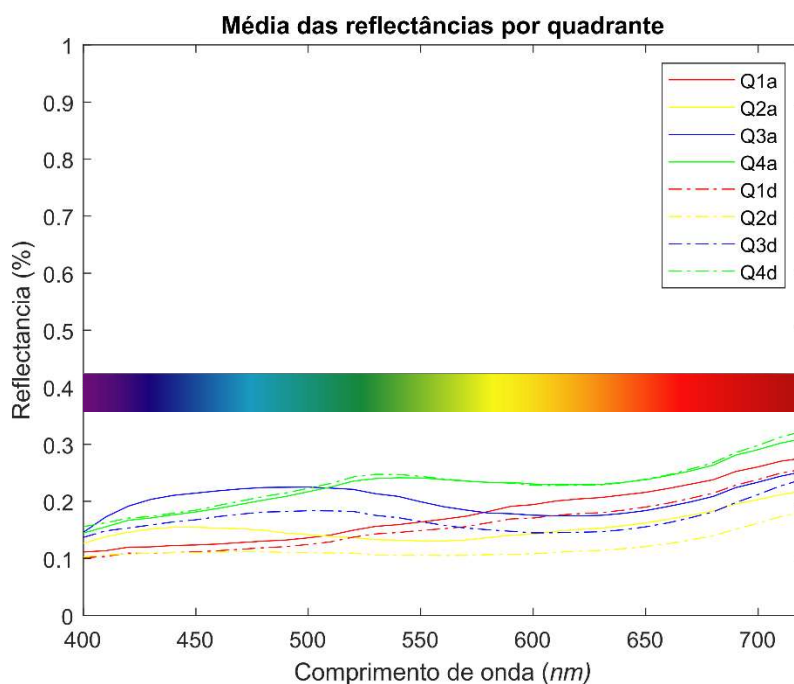


Figura 5.5 Média das reflectâncias por quadrante da tela *Senhora do Chapéu* com a representação das cores para visualização associada aos comprimentos de onda (cores aproximadas).

5.3 Influência da camada protetora

A influência da camada protetora é calculada pela Equação 19. Ao fazer o cálculo estamos a assumir que a diferença entre a recolha de dados antes e após a remoção da camada protetora é a existência de uma única camada onde todos os efeitos estão englobados, sem a perceção da contribuição de cada componente para o resultado final.

Com os gráficos apresentados na Figura 4.14 à Figura 4.19 é possível analisar o efeito da camada protetora em cada quadrante e na globalidade da pintura. Valores de reflectância superiores a um vão indicar que a reflectância antes da remoção da camada protetora era superior à reflectância após a remoção da camada protetora. Por outro lado, se os valores forem inferiores a um significa que a reflectância antes da intervenção era menor. A Figura 5.6 ilustra esta divisão no gráfico com os dados da pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*.

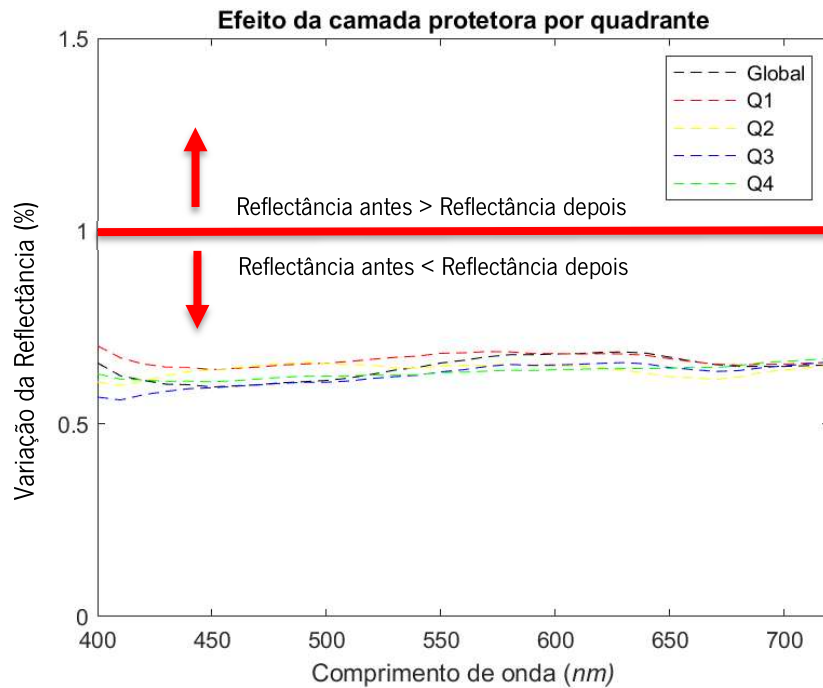


Figura 5.6 Influência da camada protetora na globalidade das cores e por quadrante, da pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*, com a divisão dos valores no valor de reflectância 1 e a sua explicação.

Através da análise dos gráficos é possível verificar que nas pinturas *Nuno Álvares Pereira em Valverde* e na cópia de *Infanta* as reflectâncias são inferiores a um em todos os quadrantes. Nos gráficos referentes à cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* e à *Senhora de Chapéu* os valores de reflectância para cada quadrante são todos superiores a um, exceto no 4º quadrante da tela *Senhora de Chapéu* que assume valores inferiores, mas próximos de um. A tela *Tronco nu masculino sentado* apresenta o 1º e 4º quadrante com valores de reflectância inferiores a um e o 2º e o 3º quadrante com valores superiores a um. A tela *Cerco de Lisboa* apresenta em todos os quadrantes um decréscimo das reflectâncias com o aumento do comprimento de onda, mas com o 4º quadrante inferior a um na totalidade do espectro, o 2º e 3º quadrante com reflectâncias superiores a um em praticamente todo o espectro exceto nos comprimentos de onda maiores e o 1º quadrante superior a um até cerca dos 550nm e inferior a um até aos 720nm.

Em todas as pinturas os valores da variação da reflectância do 4º quadrante tendem a ser inferiores aos dos restantes quadrantes, podemos assim concluir que a influência da camada protetora é mais acentuada nas cores pertencentes ao 4º quadrante. No caso específico do 2º quadrante, este apresenta em quatro das seis telas analisadas, valores de reflectância superiores,

ou seja, a influência da camada protetora tende a ser menor nas cores pertencentes ao 2º quadrante.

Em *Nuno Álvares Pereira em Valverde, Tronco nu masculino sentado* e na Cópia de *Infanta* a influência da camada protetora global apresenta valores inferiores a um, salientando que em *Nuno Álvares Pereira em Valverde* apresenta-se pouco superior a 0.5, nestas pinturas podemos concluir que com a remoção da camada protetora há um aumento do valor das reflectâncias. Nas pinturas *Senhora de Chapéu* e na cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* a influência da camada protetora global é superior a um, ou seja, com a remoção da camada protetora há uma diminuição do valor das reflectâncias

No caso específico da tela *Cerco de Lisboa* a reflectância global é superior a um até cerca dos 550nm e inferior nos comprimentos de onda seguintes.

Em todas as pinturas a influência da camada protetora global assemelha-se à influência do 1º quadrante, chegando mesmo a coincidirem, como por exemplo no gráfico referente à pintura *Tronco nu masculino sentado* e *Cerco de Lisboa*, isto deve-se ao peso relativo do primeiro quadrante ser consideravelmente superior aos restantes.

5.4 Restauro Virtual

A partir da influência da camada protetora foi realizado um restauro virtual com o intuito de comprovar se com uma metodologia simples, era possível realizar um restauro virtual. O valor da influência da camada protetora por quadrante ou global foi subtraído à reflectância antes da intervenção, de forma a obter uma reflectância da pintura com a remoção da camada protetora virtualmente. Com este processo estaríamos a retirar a camada protetora envelhecida à imagem da pintura antes da intervenção, de forma a obter a pintura sem a camada protetora virtualmente.

Da Figura 4.20 à Figura 4.25 é possível observar a representação dos gamuts de cores no espaço CIELAB de três situações distintas, a primeira nuvem de cores é referente à imagem após a intervenção física da pintura, enquanto que as duas seguintes são referentes à imagem simulada, a partir do uso da influência da camada protetora média de toda a pintura e a partir da influência por quadrante, respetivamente.

À vista desarmada é de fácil verificação que nenhuma das imagens simuladas tem uma distribuição de coordenadas cromáticas exatamente igual à imagem após a remoção física da

camada protetora, é ainda possível constatar que, apesar de pouco visíveis, existem diferenças entre a simulação partindo da influência da camada protetora média global ou da influência da camada protetora por quadrante.

Os histogramas presentes da Figura 4.26 à Figura 4.31 apresentam as distâncias euclidianas entre pares de cores correspondentes e a sua frequência absoluta ao longo da pintura. As distâncias entre todas as coordenadas são contabilizadas e agrupadas por intervalo. Através dos histogramas podemos prever se as imagens diferenciam entre si ou se um observador standard assume as imagens como semelhantes. Neste trabalho era pretendido que a maioria das frequências se situassem entre 0 e 2.2 JND, devido a este último valor representar o limiar de detecção atribuído para imagens complexas[45].

Nos histogramas é possível verificar visualmente que nenhuma pintura tem a maioria das frequências entre 0 e 2.2 JND, desta forma é possível prever que um observador standard não vai assumir as imagens simuladas e a imagem original do pós-restauro como semelhantes. As diferenças entre histogramas referentes ao efeito da camada protetora global e ao efeito da camada protetora por quadrante são de pequena escala, de forma que comparadas as duas métricas não se espera benefício na percepção do observador ao escolher uma delas.

Da Figura 4.32 à Figura 4.37 estão representadas para cada tela a imagem da pintura com camada protetora, a imagem da pintura sem camada protetora após a intervenção física e a simulação da pintura sem a camada protetora a partir da influência da camada protetora por quadrantes, respetivamente. Quando analisadas visualmente as três imagens referentes a cada pintura, podemos concluir que a imagem do restauro virtual não é igual à imagem com o restauro físico, contudo o restauro virtual melhora a visualização da imagem em relação à imagem da pintura com a camada protetora.

Nos histogramas referentes às imagens simuladas no espaço de cor CIE(a^* , b^*) os resultados melhoram, apresentando maiores frequências em valores de ΔE menores. Este resultado significa que o restauro virtual tem um melhor resultado para os valores de cromaticidade, do que quando se considera na computação da diferença a luminosidade.

Como forma de testar mais possibilidades do restauro virtual, realizamos ainda duas novas simulações, uma com a média da influência da camada protetora de todas as pinturas e outra com a média da influência da camada protetora de acordo com as datas estimadas da criação da

tela, ou seja, a média da influência da camada protetora de *Nuno Álvares Pereira em Valverde e Tronco nu masculino sentado* referentes ao ano de 1904 e a média da influência da camada protetora de *Cerco de Lisboa, Senhora de Chapéu*, a cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra* e da Cópia de *Infanta* referente ao ano de 1906, tentando avaliar se existirá diferenças entre a camada protetora utilizada durante uma época e a camada protetora utilizada durante outra época, extrapolando que as pinturas de épocas correspondentes estiveram sujeitas ao mesmo tipo de exposição e tratamentos. Com estas novas simulações pretendemos avaliar se o uso da camada protetora específica de cada pintura é melhor do que uma camada protetora global média.

Entre a Figura 5.7 e a Figura 5.11 estão representados os histogramas com as frequências de ΔE , referentes às duas situações descritas anteriormente e as imagens resultantes dessa simulação. Podemos concluir que em todas as pinturas, o restauro virtual teve um pior resultado tanto com o uso da camada protetora média de todas as pinturas como com a camada protetora média das pinturas datadas do mesmo ano. Isto prova que toda a análise realizada no presente estudo deve ser realizada com os valores específicos de cada pintura para obter os melhores resultados possíveis.

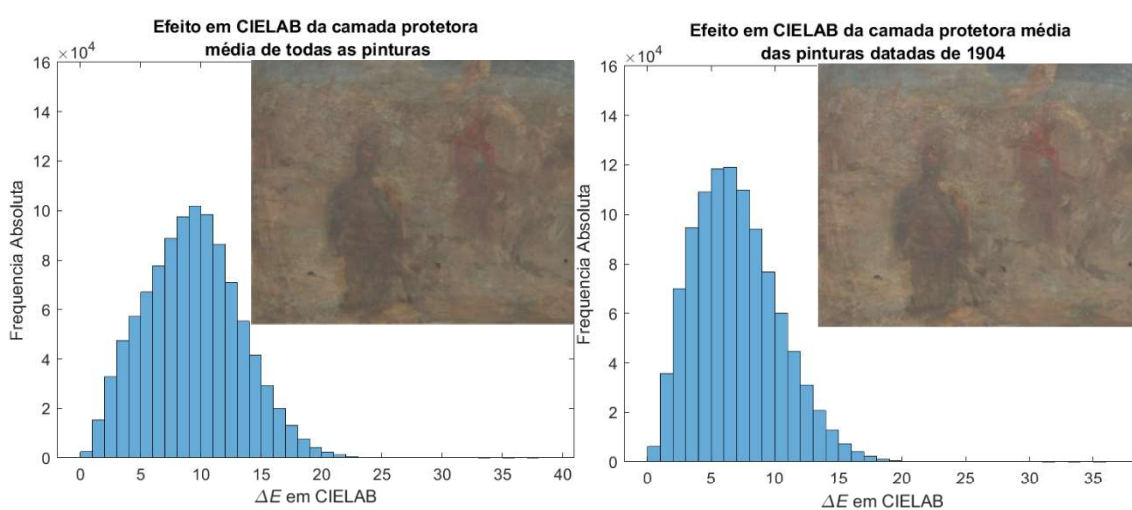


Figura 5.7 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1904 à direita, para a pintura *Nuno Álvares Pereira em Valverde*.

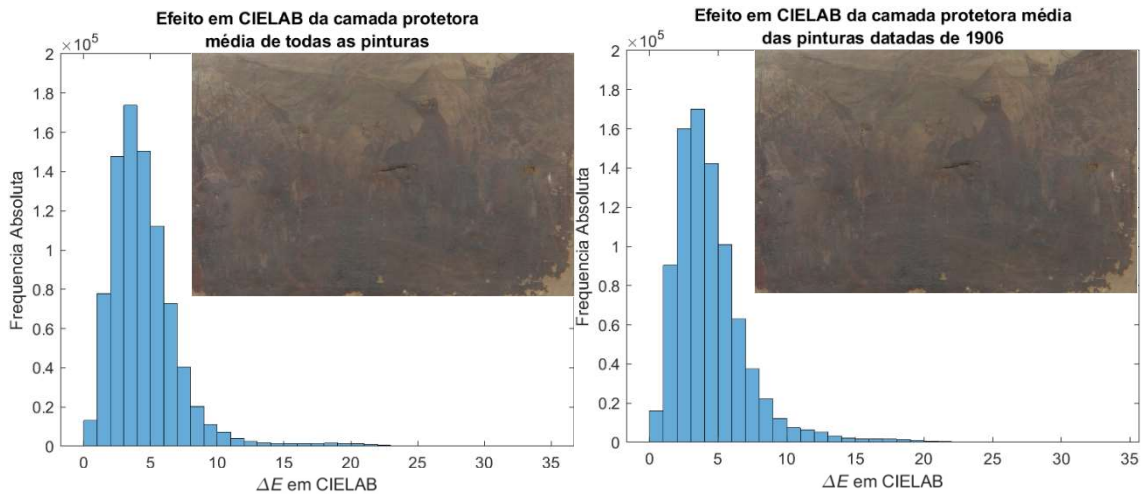


Figura 5.8 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura *Cerco de Lisboa*.

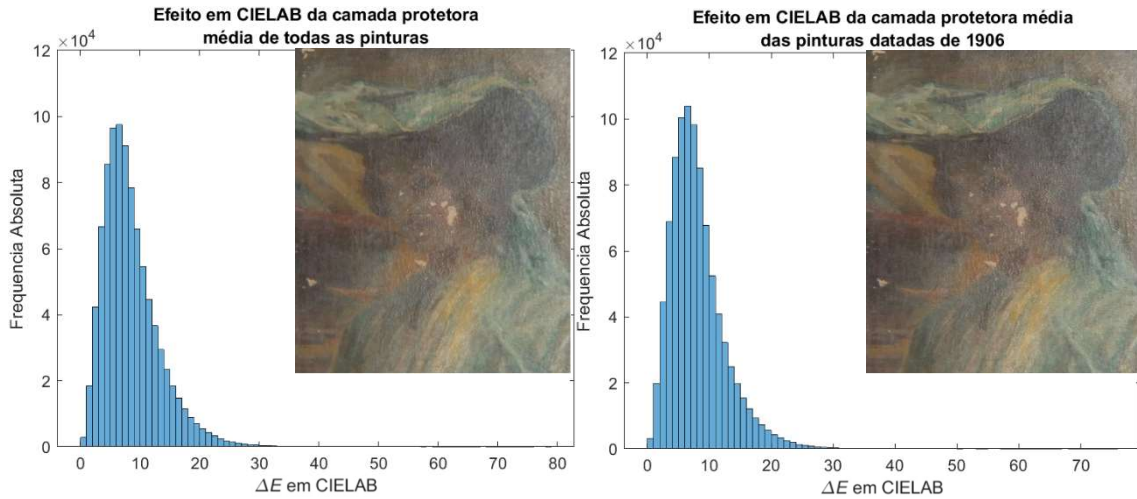


Figura 5.9 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura *Senhora de Chapéu*.

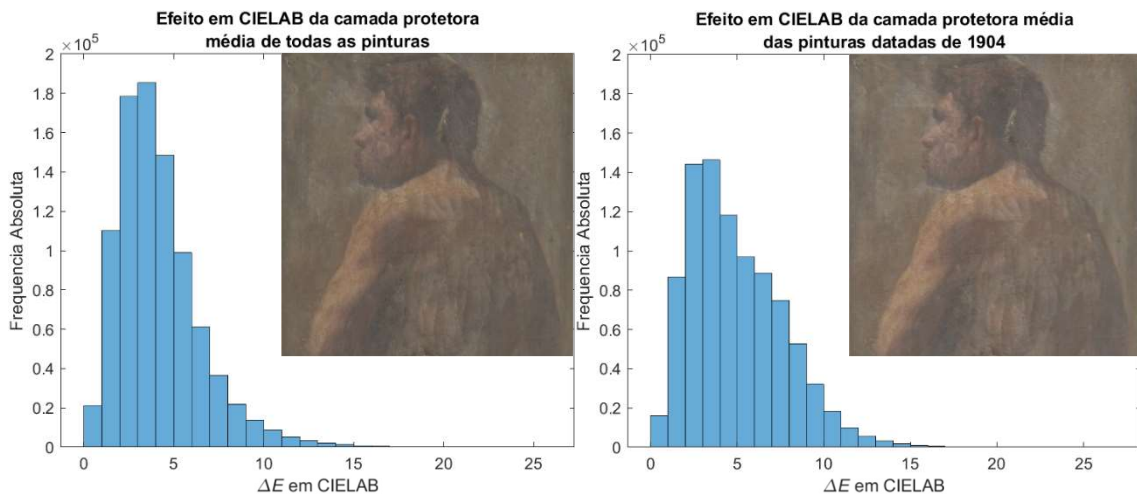


Figura 5.10 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1904 à direita, para a pintura *Tronco nu masculino sentado*

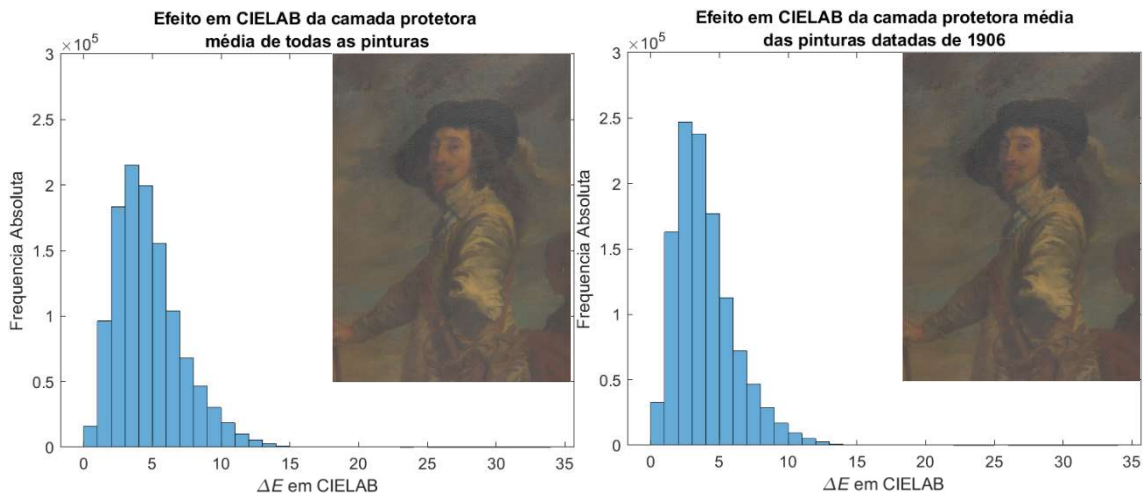


Figura 5.11 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura cópia do *Retrato de Carlos I de Inglaterra*.

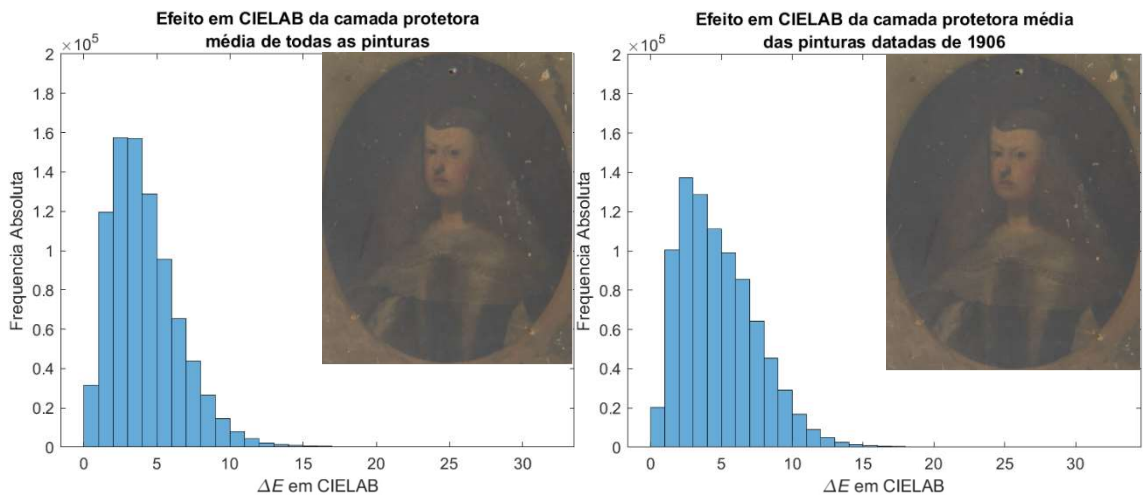


Figura 5.12 Comparação entre a simulação a partir da camada protetora média das pinturas à esquerda e da camada protetora média das pinturas datadas de 1906 à direita, para a pintura cópia de *Infanta*.

6. Conclusões

Existem efetivamente alterações cromáticas provocadas pela presença da camada protetora, que vão variar consoante as características da própria camada, bem como do seu estado de conservação.

Foram utilizados os dados híperespectrais de todas as pinturas antes e depois da remoção da camada protetora para a estimativa da influência desta na cromaticidade de pinturas artísticas. Devido à aquisição não ter sido realizada nas mesmas condições físicas antes e depois da intervenção, as imagens recolhidas pelo sistema tinham tamanhos diferentes. De forma a ultrapassar esta limitação recorreremos ao alinhamento de imagem que demonstrou ser uma ferramenta útil para realizar o ajuste do tamanho das imagens e tornar possível a comparação pixel a pixel.

A análise realizada ao volume, área, número de cores discerníveis e reflectância de cada pintura antes e depois da remoção da camada protetora, veio demonstrar que o efeito da camada protetora é específico para cada pintura, devido a este facto não podemos generalizar a análise de uma pintura para as restantes, desta forma a hipótese 1 foi testada com parcial sucesso, devendo ter cuidado com a sua aplicação genérica.

A hipótese 3 foi parcialmente verificada, uma vez que em algumas pinturas a remoção da camada protetora fez diminuir a saturação das cores.

Determinado o efeito da camada protetora a partir das reflectâncias antes e depois da remoção da camada protetora, este efeito foi retirado às reflectâncias antes da remoção com o intuito de realizar uma simulação da imagem após a remoção da camada protetora. Após a análise dos resultados da simulação, podemos concluir que a imagem simulada da remoção da camada protetora não é igual à imagem após a remoção física da camada protetora, tendo uma média de diferenças de cor de 4.1, superior ao limite de deteção do olho humano para imagens complexas. A simulação tem melhores resultados se ignorarmos a luminosidade, estimando apenas as diferenças cromáticas o valor médio da diferença de cor de todas as pinturas desce para 3.1

Considerando a hipótese 2, a mesma foi verificada uma vez que a utilização da informação média de todas as pinturas apresentou uma simulação com piores resultados do que a simulação obtida a partir da informação individualizada.

Este resultado vem demonstrar que a metodologia simplificada não se revela perfeita, mas que pode ser utilizada para avaliar as alterações cromáticas, assim como para obter rapidamente uma imagem simulada de uma pintura após o restauro para uma primeira observação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Ohta and A. R. Robertson, "Light, Vision and Photometry," in *Colorimetry*, 2006, pp. 1–38.
- [2] E. Bruce Goldstein, "Sensation and Perception," Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 57–94.
- [3] B. Sir ISAAC NEWTON, *The Project Gutenberg eBook of Opticks; by Sir Isaac Newton, Knt.* .
- [4] R. W. G. Hunt and M. R. Pointer, *Measuring Colour: Fourth Edition*. 2011.
- [5] Ruryk, "EM Spectrum Properties edit.svg - Wikimedia Commons." [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrum_pt.svg. [Accessed: 24-Oct-2019].
- [6] Rhcastilhos. And Jmarchn., "Schematic diagram of the human eye pt.svg - Wikipédia, a enciclopédia livre." [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Schematic_diagram_of_the_human_eye_pt.svg#filelinks. [Accessed: 24-Oct-2019].
- [7] E. N. Marieb and Katja Hoehn, *Human Anatomy & Physiology, 9th Edition*, vol. 88, no. 6. Pearson, 2013.
- [8] Göran Darius Hildebrand and Alistair R. Fielder, *Pediatric Retina*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [9] Helga Kolb and Webvision, "Simple Anatomy of the Retina by Helga Kolb – Webvision." .
- [10] C. Salesse, "Physiologie du signal visuel rétinien : de la phototransduction jusqu'au cycle visuel," *Journal Francais d'Ophthalmologie*, vol. 40, no. 3. Elsevier Masson SAS, pp. 239–250, 2017.
- [11] H. Kolb, R. Nelson, E. Fernandez, and B. Jones, "Photoreceptors by Helga Kolb – Webvision," *Webvision: The Organisation of the Retina and Visual System*, 2013. [Online]. Available: <https://webvision.med.utah.edu/book/part-ii-anatomy-and-physiology-of-the-retina/photoreceptors/>. [Accessed: 23-Oct-2019].
- [12] J. K. Bowmaker and H. J. Dartnall, "Visual pigments of rods and cones in a human retina.," *J. Physiol.*, vol. 298, no. 1, pp. 501–511, Jan. 1980.
- [13] N. Ohta and A. R. Robertson, "Color Vision and Color Specification Systems," in *Colorimetry*, 2006, pp. 39–62.
- [14] A. Roy Choudhury Kumar, *Principles of Colour and Appearance Measurements, 1st Edition, Volume 1: Object Appearance, Colour Perception and Instrumental Measurement*. 2014.
- [15] N. W. Daw and J. Kremers, "Retinal Color Mechanisms" in *Reference Module in*

Neuroscience and Biobehavioral Psychology, no. April 2016, 2017, pp. 1–8.

- [16] “Color Vision by Peter Gouras – Webvision.” [Online]. Available: <https://webvision.med.utah.edu/book/part-vii-color-vision/color-vision/>. [Accessed: 23-Oct-2019].
- [17] M. R. Pointer and G. G. Attridge, “The number of discernible colours,” *Color Res. Appl.*, vol. 23, no. 1, pp. 52–54, 1998.
- [18] J. M. M. Linhares, P. D. Pinto, and S. M. C. Nascimento, “The number of discernible colors in natural scenes,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 25, no. 12, p. 2918, 2008.
- [19] C. I. E. Colorimetry, “Cie colorimetry 2,” pp. 25–78.
- [20] R. Jacob, “Hcl-hcv models.svg - Wikimedia Commons.” [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hcl-hcv_models.svg. [Accessed: 24-Oct-2019].
- [21] G. selbst erstellt. T. Hauke, “Ewald hering colors.jpg - Wikimedia Commons.” [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ewald_hering_colors.jpg. [Accessed: 24-Oct-2019].
- [22] CIE (Commission Internationale de l’Eclairage), “Colorimetry. CIE Technical Report CIE 15:2004,” 2004.
- [23] “João Manuel Maciel Linhares Diversidade cromática de cenários complexos digitalizados com imagiografia,” 2011.
- [24] S. Westland, *Encyclopedia of Color Science and Technology*. 2019.
- [25] “File:CIE1931xy CIERGB.svg - Wikimedia Commons.” [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE1931xy_CIERGB.svg. [Accessed: 24-Oct-2019].
- [26] David H. Brainard and A. Stockman, “Colorimetry,” *Introd. to Color Imaging Sci.*, pp. 89–131, 2010.
- [27] T. H. Van Nguyen, T. T. Nguyen, X. Ji, and M. Guo, “Predicting Color Change in Wood During Heat Treatment Using an Artificial Neural Network Model,” *BioResources*, vol. 13, no. 3, pp. 6250-6264–6264, 2018.
- [28] K. Masaoka, R. S. Berns, M. D. Fairchild, and F. Moghareh Abed, “Number of discernible object colors is a conundrum,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 30, no. 2, p. 264, 2013.
- [29] Rolf G. Kuehni, “How many object colors can we distinguish?,” *Color Res. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 439–444, 2015.
- [30] G. Trumpy, D. Conover, L. Simonot, M. Thoury, M. Picollo, and J. K. Delaney, “Experimental study on merits of virtual cleaning of paintings with aged varnish,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 26, p. 33836, 2015.

- [31] M. Maire, "USE AND INFLUENCE OF PAINTINGS ' VARNISH."
- [32] R. S. Berns and E. R. De La Rie, "The Effect of the Refractive Index of a Varnish on the Appearance of Oil Paintings," *Stud. Conserv.*, vol. 48, no. 4, pp. 251–262, 2004.
- [33] A. Villarquide Jevenois, *A Pintura sobre tea : historiografia, técnicas e materiais*. 1999.
- [34] R. S. Berns, L. A. Taplin, F. H. Imai, E. A. Day, and D. C. Day, "Spectral Imaging of Matisse's Pot of Geraniums: A Case Study," in *Final Program and Proceedings - IS and T/SID Color Imaging Conference*, 2003, pp. 149–153.
- [35] A. Casini *et al.*, "Fiber optic reflectance spectroscopy and hyper-spectral image spectroscopy: two integrated techniques for the study of the Madonna dei Fusi," *Opt. Methods Arts Archaeol.*, vol. 47, no. 12, p. 58570M, 2005.
- [36] M. Elias and P. Cotte, "Multispectral camera and radiative transfer equation used to depict Leonardo's sfumato in Mona Lisa," *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 12, pp. 2146–2154, 2008.
- [37] L. CARDEIRA and A. Bailão, *Adriano de Sousa Lopes - Conservação e restauro das obras académicas pertencentes ao espólio da FBAUL*. 2019.
- [38] C. Montagner, J. M. M. Linhares, M. Vilarigues, M. J. Melo, and S. M. C. Nascimento, "Supporting history of art with colorimetry: The paintings of Amadeo de Souza-Cardoso," *Color Res. Appl.*, vol. 43, no. 3, pp. 304–310, 2018.
- [39] F. Daniel *et al.*, "Comparison between non-invasive methods used on paintings by Goya and his contemporaries: hyperspectral imaging vs. point-by-point spectroscopic analysis," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 409, no. 16, pp. 4047–4056, 2017.
- [40] P. D. Pinto, J. M. M. Linhares, and S. M. C. Nascimento, "Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 25, no. 3, p. 623, 2008.
- [41] C. Montagner, J. M. M. Linhares, M. Vilarigues, and S. M. C. Nascimento, "Statistics of colors in paintings and natural scenes," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 33, no. 3, p. A170, 2016.
- [42] D. H. Foster, K. Amano, S. M. C. Nascimento, and M. J. Foster, "America A and is made available as an electronic reprint with the permission of Frequency of metamerism in natural scenes."
- [43] S. M. C. Nascimento *et al.*, "The colors of paintings and viewers' preferences," *Vision Res.*, vol. 130, pp. 76–84, 2017.
- [44] B. Hill, T. Roger, and F. W. Vorhagen, "Comparative Analysis of the Quantization of Color Spaces on the Basis of the CIELAB Color-Difference Formula," vol. 16, no. 2, pp. 109–154, 1997.
- [45] M. A. Aldaba, J. M. M. Linhares, P. D. Pinto, S. M. C. Nascimento, K. Amano, and D. H. Foster, "Visual sensitivity to color errors in images of natural scenes," *Vis. Neurosci.*, vol. 23, no. 3–4, pp. 555–559, 2006.

- [46] M. Barni, F. Bartolini, and V. Cappellini, "Image processing for virtual restoration of artworks," *IEEE Multimed.*, vol. 7, no. 2, pp. 34–37, 2000.
- [47] S. Sands, "Delta E: A Key to Understanding Lightfastness Readings | Just Paint," 2016. [Online]. Available: <https://www.justpaint.org/delta-e/>. [Accessed: 24-Oct-2019].

