



**N OVA**

NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

SHELBE ALEXANDRE DE ANDRADE

Licenciado em Engenharia Química e Bioquímica

# UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DA COR DA ROLHA DE CORTIÇA

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA E BIOQUÍMICA

Universidade NOVA de Lisboa

Novembro, 2021



# UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE IMAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DA COR DA ROLHA DE CORTIÇA

Shelbe Alexandre de Andrade

Licenciado em Engenharia Química e Bioquímica

**Orientador:** Professor Doutor Mário Fernando José Eusébio  
Professor Auxiliar, Departamento de Química, FCT NOVA

**Coorientador:** Doutor Luís Manuel Estêvão Cabrita  
Divisão de Engenharia de Produto, Amorim Cork S.A.

## Júri:

**Presidente:** Professor Doutor João Paulo Serejo Goulão Crespo  
Professor Catedrático, Departamento de Química, FCT Nova

**Arguentes:** Doutor Paulo Dinis Vales Lopes  
Responsável pela enologia, Amorim Cork S.A.

**Vogais:** Professor Doutor Mário Fernando José Eusébio  
Professor Auxiliar, Departamento de Química, FCT NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA E BIOQUÍMICA

Universidade NOVA de Lisboa  
Novembro, 2021



**Utilização de ferramentas de análise de  
imagem para caracterização da cor da rolha de cortiça**

Copyright © Shelbe Alexandre de Andrade, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Dedico esta dissertação à minha família, aos meus amigos e aos meus orientadores*



## AGRADECIMENTOS

Com o fim da minha carreira académica, gostaria de agradecer a todas as pessoas que estiveram envolvidas e que impactaram significativamente o meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo deste percurso, e particularmente neste último ano de dissertação.

Gostaria de agradecer ao Dr. Luís Cabrita pelo acompanhamento, pelas histórias partilhadas e pelas longas chamadas e conversas pessoais onde tentou educar-me não só sobre como melhor desenvolver e valorizar este trabalho, mas também sobre o que devo fazer para alcançar os meus próprios objetivos, quer pessoais quer profissionais. O Luís acreditou em mim, na minha capacidade de desenvolver o protótipo, e disponibilizou todos os conselhos e recursos que precisei para o propósito, e isso foi absolutamente crítico para desenvolver este trabalho, que é algo em que tenho imenso orgulho.

Aproveito aqui também para agradecer aos outros elementos que perfazem o trio que é a equipa da DEP, no departamento técnico da Amorim, a Telma Teixeira e Isabel Roseira, pela sua presença e apoio nas diversas reuniões, e por terem-me acolhido com bom humor e simpatia. Um agradecimento especial para a Telma, pelas dezenas de amostras de rolhas que preparou e que me permitiram a variedade necessária para o projeto.

Sobre o professor Mário Eusébio, não existem palavras, nem espaço provavelmente, para conseguir agradecer-lhe devidamente pelo seu acompanhamento. Não podia ter pedido um melhor orientador para o desenvolvimento deste trabalho. As reuniões extremamente longas, frequentes e fora de horas, as ideias oferecidas, o *debugging* frequente, o encorajamento a melhorar e experimentar, tudo isto sempre de bom humor e com a maior paciência que acho que alguma vez já vi. Como referi, este trabalho é algo no qual tenho muito orgulho, e tenho a certeza que não teria sido nem metade tão satisfatório se não o tivesse feito consigo.

E por último, mas não menos importante, queria agradecer à minha família. Aos meus pais, Carmen Andrade e Paulo Lucas, por terem criado um ambiente onde pude concentrar-me quase exclusivamente no desenvolvimento do trabalho, pela compreensão e apoio nesta etapa, e por terem ouvido as minhas queixas frequentes e monólogos, alternadamente depressivos e demasiado confiantes, sobre o trabalho. Em particular, porque eles brincaram com o assunto mas eu levei a sério, agradeço à minha irmã, Ana Lucas, e ao meu irmão, Miguel Lucas, pela paciência demonstrada quando chegava entusiasmado com alguma ideia que ninguém em casa entenderia, e por terem sido quem mais me ouviu, quem mais opinou e quem mais lidou comigo e com as minhas excentricidades neste período.



## RESUMO

A monitorização e controlo de qualidade da cor em rolhas de cortiça permite assegurar padrões visuais de uniformidade. Atualmente, este é realizado maioritariamente por inspeção visual, o que implica um elevado grau de subjetividade, e, em menor parte, por análise com um colorímetro, um aparelho apropriado para a caracterização objetiva da cor, mas demoroso, dado que requer 30 segundos por cada rolha analisada. Assim, o principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método objetivo e expedito para efetuar o controlo de qualidade da cor em rolhas naturais e técnicas, que possa complementar, ou substituir, os atuais.

Foi desenvolvido um protótipo, constituído por uma cabine de luz e um conjunto de suportes para máquina fotográfica e rolhas, que permitem fotografar até 24 faces ou 40 topos. É acompanhado por uma interface gráfica, em LabVIEW, para processamento e representação de imagens, e análise estatística dos resultados obtidos. No processamento, foram usados os espaços de cor RGB, HSL e CIELAB, e 6 estratégias de quantização de imagens.

Na validação do método, foram conduzidos testes de repetibilidade (CV=2,29%), precisão intermédia (CV=2,09%) e robustez (CV=1,39%). A precisão foi igualmente avaliada, com recurso a uma paleta de cores, tendo-se obtido um desvio padrão das distâncias colorimétricas de 1,35, inferior ao limite superior de 5 e aos 1,65 conseguidos pelo colorímetro.

Construiu-se ainda uma base de dados de 3 808 rolhas, com as coordenadas de cor padrão para 8 tipos de lavações, sendo que a sua caracterização estatística pode ser usada, no futuro, para monitorização e controlo do processo e para avaliação de ensaios de investigação. Foram realizados 3 casos de estudo. No primeiro, foi identificado o boleado nas rolhas, de modo a verificar a uniformidade da cor nestas. No segundo, foi estudada a marcação de rolhas de diferentes lotes, tendo-se concluído que estas apresentavam diferenças significativas. E no terceiro, os resultados obtidos pelo método foram comparados com os provenientes de um inquérito de prova cega, onde o objetivo era avaliar a diferença entre marcas no início e fim da marcação, tendo-se obtido um  $R^2 = 0,903$ , o que sugere uma forte correspondência com a perceção visual, e permite corroborar a validade das cores devolvidas pelo método.

O método caracteriza a cor das rolhas de cortiça nos suportes de forma objetiva e expedita, em apenas 3 segundos, podendo ser implementado no terreno como ferramenta de controlo de processo e, potencialmente, desenvolvido para aplicação in-line e em tempo real.

**Palavras-chave:** Rolhas de cortiça; Lavação; LabVIEW; CIELAB; Tratamento de imagens; Cor.



## ABSTRACT

Cork stopper color monitorization and quality control allows one to ensure visual standards of uniformity. Currently, this is mainly performed through visual inspection, which implies a high degree of subjectivity, and, to a lesser extent, through analysis with a colorimeter, a device that, while suitable for objective color characterization, is rather slow, given that it requires 30 seconds for each cork stopper that is analyzed. As such, the main purpose of this work is the development of an objective and expeditious method to conduct color quality control in natural and technical cork stoppers, which can complement, or replace, current methods.

A prototype was developed, consisting of a light booth and a set of holders for the camera and cork stoppers, which allow one to photograph up to 24 faces or 40 tops. It is accompanied by a graphical user interface, in LabVIEW, for image processing and representation, and statistical analysis of the results. In processing, the color spaces RGB, HSL and CIELAB were used, as well as 6 color image quantization strategies.

For method validation, repeatability (CV=2,29%), intermediate precision (CV=2,09%) and robustness (CV=1,39%) tests were conducted. Precision was also evaluated, using a color palette, resulting in a standard deviation for the colorimetric distances of 1,35, lower than the upper limit of 5 and the 1,65 achieved by the colorimeter.

A database of 3 808 cork stoppers was built, with standard color coordinates for 8 types of washing, and, in the future, its statistical characterization can be used for process monitoring and control and for evaluating research trials. Three case studies were conducted. In the first, the cork stopper fillet was identified, in order to verify color uniformity throughout the corks. In the second, the marking of cork stoppers, from different batches, was studied, and it was concluded that they present significant differences. And in the third, the results obtained by the method were compared to those resulting from a blind test survey, wherein the purpose was to evaluate the difference between marks at the beginning and end of the marking process, resulting in a  $R^2 = 0,903$ , which suggests a strong correlation with visual perception, and corroborates the validity of the colors obtained by the method.

The method characterizes the color of cork stoppers, in the holders, objectively and expeditiously, in just 3 seconds, and can be implemented in the field as a process control tool and, potentially, developed for in-line and real-time application.

**Keywords:** Cork stoppers; Washing; LabVIEW; CIELAB; Image treatment; Color.



# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1.	ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS .....	1
1.2.	O SOBREIRO, TIPOS E FLUXOS PRODUTIVOS DAS ROLHAS.....	3
1.2.1.	<i>Rolhas naturais</i> .....	5
1.2.2.	<i>Rolhas técnicas</i> .....	7
1.3.	LABVIEW.....	9
<b>2.</b>	<b>ESTADO DE ARTE .....</b>	<b>11</b>
2.1.	PERCEÇÃO DE COR E METAMERISMO.....	11
2.2.	IMAGENS DIGITAIS.....	14
2.2.1.	<i>Correção de raios gama</i> .....	15
2.3.	MODELOS E ESPAÇOS DE CORES .....	16
2.3.1.	<i>RGB e R'G'B'</i> .....	19
2.3.2.	<i>HSL</i> .....	20
2.3.3.	<i>CIE L*a*b* e CIE L*C*h*</i> .....	21
2.4.	MÉTRICAS DE DISTÂNCIA COLORIMÉTRICA .....	23
2.5.	ESTRATÉGIAS DE QUANTIZAÇÃO .....	27
2.5.1.	<i>Quantização Uniforme</i> .....	30
2.5.2.	<i>Popularidade</i> .....	32
2.5.3.	<i>Median Cut</i> .....	33
2.5.4.	<i>MinMax</i> .....	35
2.5.5.	<i>K-Means</i> .....	38
2.5.6.	<i>Moda do Histograma</i> .....	42
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
3.1.	CAPTURA DE IMAGENS, HARDWARE E SOFTWARE.....	43
3.2.	VALIDAÇÃO.....	46
3.3.	BASE DE DADOS .....	47
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
4.1.	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	49
4.1.1.	<i>Identificação das rolhas</i> .....	57
4.1.2.	<i>Segmentação das rolhas</i> .....	61
4.1.3.	<i>Quantização das imagens</i> .....	68
4.1.4.	<i>Cálculo da distância colorimétrica</i> .....	70
4.1.5.	<i>Representação das coordenadas de cor</i> .....	71

4.2.	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO .....	73
4.3.	VALIDAÇÃO DO MÉTODO .....	79
4.3.1.	<i>Avaliação indireta</i> .....	79
4.3.2.	<i>Avaliação direta</i> .....	83
4.4.	BASE DE DADOS DE ROLHAS DE CORTIÇA .....	85
4.5.	TEMPOS DE EXECUÇÃO .....	88
4.5.1.	<i>Comparação das estratégias de quantização</i> .....	89
4.6.	CASOS DE ESTUDO .....	91
4.6.1.	<i>Segmentação do boleado nas rolhas</i> .....	91
4.6.2.	<i>Diferenciar rolhas de lotes distintos</i> .....	94
4.6.3.	<i>Evolução da cor da marca ao longo da etapa de marcação</i> .....	98
5.	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO</b> .....	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>111</b>
	<b>ANEXO A. CONVERSÃO ENTRE ESPAÇOS DE CORES</b> .....	<b>117</b>
A.1.	CONVERSÃO ENTRE R'G'B' E HSL.....	117
A.2.	CONVERSÃO ENTRE RGB E CIE L*A*B* .....	119
A.3.	CONVERSÃO DE CIE L*A*B* PARA CIE L*C*H* .....	120
	<b>ANEXO B. DISTÂNCIA CIEDE2000</b> .....	<b>121</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - FLUXO PRODUTIVO PARA ROLHAS NATURAIS, DISCOS E ROLHAS TÉCNICAS.....	4
FIGURA 1.2 - REPRESENTAÇÃO DE UM VI EM LABVIEW .....	9
FIGURA 1.3 - REPRESENTAÇÃO DE UM SUBVI DENTRO DE UM VI EM LABVIEW.....	10
FIGURA 2.1 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA FORMA COMO A COR É CAPTADA PELO SISTEMA VISUAL HUMANO.....	11
FIGURA 2.2 - SENSIBILIDADE DOS TRÊS TIPOS DE CONES A LUZ DE DIFERENTES COMPRIMENTOS DE ONDA.....	12
FIGURA 2.3 - EXEMPLO DE UM ARRAY BIDIMENSIONAL DO QUAL RESULTARIA UMA IMAGEM COM RESOLUÇÃO DE 5x5 = 25 PIXELS .....	14
FIGURA 2.4 - EXEMPLO DO CÁLCULO DO VALOR DE UM PIXEL A CORES.....	15
FIGURA 2.5 - ETAPAS ENVOLVIDAS NO PROCESSAMENTO DE UMA IMAGEM DIGITAL .....	16
FIGURA 2.6 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO DE CORES RGB .....	19
FIGURA 2.7 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO DE CORES HSL.....	21
FIGURA 2.8 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO DE CORES CIE L*A*B*.....	22
FIGURA 2.9 - REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO CIE L*C*H* .....	23
FIGURA 2.10 - REPRESENTAÇÃO DO LIMITE DE PERCETIBILIDADE DE 1 UNIDADE $\Delta E_{AB}$ .....	24
FIGURA 2.11 - REPRESENTAÇÃO DO LIMITE DE PERCETIBILIDADE DE APROXIMADAMENTE 1,30 UNIDADES $\Delta E_{00}$ .....	26
FIGURA 2.12 - QUANTIZAÇÃO DE UMA IMAGEM EM 8 CORES.....	27
FIGURA 2.13 - DIFERENÇA NA ACUIDADE VISUAL PARA UMA IMAGEM PROCESSADA .....	28
FIGURA 2.14 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA ESTRATÉGIA DA QUANTIZAÇÃO UNIFORME .....	30
FIGURA 2.15 - QUANTIZAÇÃO DA FACE DE UMA ROLHA PELA ESTRATÉGIA DA QUANTIZAÇÃO UNIFORME...	31
FIGURA 2.16 - RESULTADOS DA QUANTIZAÇÃO PELA ESTRATÉGIA DE QUANTIZAÇÃO UNIFORME .....	32
FIGURA 2.17 - RESULTADOS DA QUANTIZAÇÃO PELA ESTRATÉGIA DA POPULARIDADE.....	33
FIGURA 2.18 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA ESTRATÉGIA MEDIAN CUT .....	34
FIGURA 2.19 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA ESTRATÉGIA MINMAX.....	36
FIGURA 2.20 - DIFERENTES CASOS PARA A QUANTIZAÇÃO DA MESMA IMAGEM EM 8 CORES SEGUNDO A ESTRATÉGIA MINMAX.....	37
FIGURA 2.21 - RESULTADOS DA QUANTIZAÇÃO PELA ESTRATÉGIA MINMAX .....	38
FIGURA 2.22 - RESULTADO DA QUANTIZAÇÃO PELA ESTRATÉGIA K-MEANS SEM E COM A CONDIÇÃO DE CONVERGÊNCIA ALTERNATIVA.....	39
FIGURA 2.23 - DIFERENTES CASOS PARA A QUANTIZAÇÃO DA MESMA IMAGEM EM 8 CORES SEGUNDO A ESTRATÉGIA K-MEANS.....	41
FIGURA 2.24 - QUANTIZAÇÃO DA FACE DE UMA ROLHA PELA ESTRATÉGIA DA MODA DO HISTOGRAMA.....	42
FIGURA 3.1 - MODELOS RENDERIZADOS E SUPORTES IMPRESSOS PARA AS ROLHAS.....	43
FIGURA 3.2 - MODELO RENDERIZADO E SUPORTE IMPRESSO PARA A MÁQUINA FOTOGRÁFICA.....	44

FIGURA 3.3 - REPRESENTAÇÃO DAS DIFERENTES PLACAS QUE CONSTITUEM A CABINE DE LUZ .....	45
FIGURA 3.4 - CABINE DE LUZ CONSTRUÍDA.....	45
FIGURA 4.1 - ETAPAS ENVOLVIDAS NA RECOLHA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS DE ROLHAS .....	50
FIGURA 4.2 - ABA DA "CONFIGURAÇÃO" NO PAINEL DE UTILIZADOR .....	52
FIGURA 4.3 - ABA DA "CONFIGURAÇÃO" NO PAINEL DE UTILIZADOR QUANDO SE PRETENDE ALTERAR O PADRÃO PARA O TIPO DE LAVAÇÃO ESCOLHIDO.....	53
FIGURA 4.4 - ABA DAS "ROLHAS NATURAIS" NO PAINEL DE UTILIZADOR, COM A REPRESENTAÇÃO DA IMAGEM ORIGINAL NA FIGURA "ROLHAS NATURAIS" E DA FACE DE CADA ROLHA COM AS DIFERENTES SECÇÕES ISOLADAS EM "ROLHAS NATURAIS SEGMENTADAS" .....	54
FIGURA 4.5 - ABA DA "CARACTERIZAÇÃO DA COR" NO PAINEL DE UTILIZADOR, COM COORDENADAS $L^*A^*B^*$ , DISTÂNCIA COLORIMÉTRICA EM RELAÇÃO AO PADRÃO DA LAVAÇÃO, CONFORME A MÉTRICA DE DISTÂNCIA SELECIONADA, CORES REPRESENTATIVAS, RECONSTRUÇÃO DE ROLHAS E HISTOGRAMAS $R'G'B'$ PARA CADA ROLHA .....	55
FIGURA 4.6 - ABA DAS "ESTATÍSTICAS" NO PAINEL DE UTILIZADOR, COM REPRESENTAÇÃO DAS COORDENADAS DE COR NO ESPAÇO CIE $L^*A^*B^*$ , DIAGRAMAS DE EXTREMOS E QUARTIS PARA CADA UMA DAS COORDENADAS E HISTOGRAMAS $R'G'B'$ PARA TODAS AS ROLHAS.....	56
FIGURA 4.7 - ETAPA INICIAL DE IDENTIFICAÇÃO DE ROLHAS EM LABVIEW .....	57
FIGURA 4.8 - ETAPA FINAL DE IDENTIFICAÇÃO DAS ROLHAS EM LABVIEW .....	58
FIGURA 4.9 - CORREÇÃO DO LIMITE IMPOSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DAS ROLHAS .....	59
FIGURA 4.10 - REPRESENTAÇÃO DO RESULTADO DA CORREÇÃO DO LIMITE IMPOSTO.....	59
FIGURA 4.11 - TENTATIVA DE IDENTIFICAÇÃO DE ROLHAS COM LAVAÇÃO LIGHT EM SUPORTE BRANCO .....	60
FIGURA 4.12 - SECÇÕES DISPONÍVEIS PARA CARACTERIZAÇÃO .....	61
FIGURA 4.13 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA SEGMENTAÇÃO DE ROLHAS NATURAIS .....	62
FIGURA 4.14 - SEGMENTAÇÃO DE POROS EM ROLHAS NATURAIS.....	63
FIGURA 4.15 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA SEGMENTAÇÃO DE ROLHAS NATURAIS .....	64
FIGURA 4.16 - REPRESENTAÇÃO DE DIFERENTES LIMITES PARA A SEGMENTAÇÃO DA MARCA .....	65
FIGURA 4.17 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA SEGMENTAÇÃO DE ROLHAS TÉCNICAS.....	67
FIGURA 4.18 - ROLHA UTILIZADA PARA DEMONSTRAR OS RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE QUANTIZAÇÃO .....	68
FIGURA 4.19 - EXEMPLO DA TOMADA DE DECISÕES POR CÁLCULO DA DISTÂNCIA COLORIMÉTRICA AO PADRÃO CLEAN 0.....	71
FIGURA 4.20 - REPRESENTAÇÃO DAS COORDENADAS DE COR EM TERMOS DA DIFERENÇA ENTRE A COR DE CADA ROLHA E O PADRÃO PARA A LAVAÇÃO CLEAN C, ESTE SENDO $L^*A^*B^* = (69,6, 8,27, 26,1)$ .....	72
FIGURA 4.21 - USO DO ESPAÇO DE CORES CIE $L^*A^*B^*$ NA REPRESENTAÇÃO DAS COORDENADAS DE COR DE ROLHAS DE DIFERENTES LAVAÇÕES .....	73
FIGURA 4.22 - EVOLUÇÃO DAS CORES REPRESENTATIVAS DA ROLHA AO LONGO DO TEMPO DE OPERAÇÃO DA CABINE.....	74
FIGURA 4.23 - REPRESENTAÇÃO DA ILUMINÂNCIA E COORDENADA COLORIMÉTRICA $L^*$ , EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	74
FIGURA 4.24 - REPRESENTAÇÃO DA ILUMINÂNCIA E COORDENADA COLORIMÉTRICA $A^*$ , EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	75
FIGURA 4.25 - REPRESENTAÇÃO DA ILUMINÂNCIA E COORDENADA COLORIMÉTRICA $B^*$ , EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	75
FIGURA 4.26 - CORES REPRESENTATIVAS PARA UMA ROLHA NAS DIFERENTES FILAS E COLUNAS, COM A PORTA DA CABINE DE LUZ ABERTA E FECHADA .....	77

FIGURA 4.27 - CORES REPRESENTATIVAS DA FACE DE UMA MESMA ROLHA AO LONGO DAS 24 POSIÇÕES DO SUPORTE PARA FACES .....	81
FIGURA 4.28 - PALETE DE CORES PADRÃO UTILIZADA PARA VALIDAÇÃO .....	83
FIGURA 4.29 - SEGMENTAÇÃO DO BOLEADO EM ROLHAS NATURAIS .....	92
FIGURA 4.30 - SEGMENTAÇÃO DO BOLEADO EM 11 ROLHAS .....	93
FIGURA 4.31 - EXEMPLO DAS FACES E MARCAS DE ROLHAS NATURAIS R10S E SF.....	94
FIGURA 4.32 - EXEMPLO DAS FACES E MARCAS DE ROLHAS TÉCNICAS R10S E SF .....	95
FIGURA 4.33 - L* EM FUNÇÃO DE A* PARA A MARCAÇÃO DAS ROLHAS NATURAIS R10S E SF .....	95
FIGURA 4.34 - L* EM FUNÇÃO DE B* PARA A MARCAÇÃO DAS ROLHAS NATURAIS R10S E SF .....	96
FIGURA 4.35 - L* EM FUNÇÃO DE A* PARA A MARCAÇÃO DAS ROLHAS TÉCNICAS R10S E SF .....	96
FIGURA 4.36 - L* EM FUNÇÃO DE B* PARA A MARCAÇÃO DAS ROLHAS TÉCNICAS R10S E SF .....	97



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.1 - TIPOS DE ROLHAS NATURAIS.....	7
TABELA 1.2 - TIPOS DE ROLHAS TÉCNICAS .....	8
TABELA 2.1 - DESCRIÇÃO DOS DIFERENTES ESPAÇOS DE COR UTILIZADOS.....	18
TABELA 2.2 - FUNCIONAMENTO, VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS DIFERENTES CATEGORIAS DE ESTRATÉGIAS DE QUANTIZAÇÃO.....	29
TABELA 2.3 - ESTRATÉGIAS IMPLEMENTADAS E FAMÍLIA A QUE PERTENCEM.....	29
TABELA 2.4 - RESULTADOS DA ESTRATÉGIA K-MEANS SEM E COM CONDIÇÃO DE CONVERGÊNCIA ALTERNATIVA.....	39
TABELA 4.1 - RESULTADOS DA QUANTIZAÇÃO DA FACE DE UMA ROLHA PELAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE QUANTIZAÇÃO .....	69
TABELA 4.2 - DISTÂNCIA $\Delta E_{00}$ ENTRE OS PARES DE CORES REPRESENTATIVAS PARA UMA ROLHA NAS DIFERENTES FILAS E COLUNAS, COM A PORTA DA CABINE DE LUZ ABERTA E FECHADA.....	77
TABELA 4.3 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS DIFERENTES TESTES DIRECIONADOS À AVALIAÇÃO INDIRETA DO MÉTODO.....	79
TABELA 4.4 - COEFICIENTES DE VARIAÇÃO MÉDIOS INDICADOS PELO COLORÍMETRO E PELO MÉTODO NA CARACTERIZAÇÃO DA COR DE DIFERENTES FACES DE UMA ROLHA.....	80
TABELA 4.5 - INTERVALOS ESTABELECIDOS PARA AS COORDENADAS COLORIMÉTRICAS NAS DIFERENTES FILAS, COM E SEM OS VALORES DA PRIMEIRA COLUNA .....	81
TABELA 4.6 - MEDIÇÕES DO LUXÍMETRO EM DIFERENTES COLUNAS DE CADA FILA .....	82
TABELA 4.7 - VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DAS DISTÂNCIAS CIEDE2000 ENTRE AS 24 CORES NA PALETE PADRÃO E OS RESULTADOS DEVOLVIDOS PELAS ESTRATÉGIAS DE QUANTIZAÇÃO E PELO COLORÍMETRO.....	84
TABELA 4.8 - VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DAS DISTÂNCIAS CIEDE2000 ENTRE AS 24 CORES NA PALETE PADRÃO E OS RESULTADOS INDICADOS EM CADA METADE DE CADA FILA DO SUPORTE.....	85
TABELA 4.9 - CORES REPRESENTATIVAS E IC (95%) PARA AS MÉDIAS DAS COORDENADAS COLORIMÉTRICAS DE DIFERENTES TIPOS DE ROLHAS E LAVAÇÕES.....	86
TABELA 4.10 - TEMPO MÉDIO NECESSÁRIO PARA A EXECUÇÃO DAS ETAPAS REALIZADAS PELO SOFTWARE NA CARACTERIZAÇÃO DA COR DE 24 FACES.....	88
TABELA 4.11 - TEMPO MÉDIO NECESSÁRIO PARA A EXECUÇÃO DAS ETAPAS REALIZADAS PELO SOFTWARE NA CARACTERIZAÇÃO DA COR DE 40 TOPOS.....	89
TABELA 4.12 - TEMPO MÉDIO NECESSÁRIO PARA A EXECUÇÃO DE CADA UMA DAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS NA CARACTERIZAÇÃO DA COR DE 24 FACES.....	90
TABELA 4.13 - CORES REPRESENTATIVAS E COORDENADAS CIE L*A*B* MÉDIAS PARA O TOPO DAS ROLHAS NATURAIS E PARA O BOLEADO, E DISTÂNCIA $\Delta E_{00}$ ENTRE ELAS .....	92
TABELA 4.14 - CORES REPRESENTATIVAS, INTERVALO PARA COORDENADAS COLORIMÉTRICAS E DISTÂNCIA COLORIMÉTRICA ENTRE ROLHAS R10S E SF .....	97

TABELA 4.15 - LOTES FOTOGRAFADOS E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MESMOS .....	99
TABELA 4.16 - CORES REPRESENTATIVAS, MÉDIAS PARA P1 E RESULTADOS DA DISTÂNCIA COLORIMÉTRICA ENTRE INÍCIO E FIM DA ETAPA DE MARCAÇÃO, POR DIFERENTES MÉTRICAS .....	100
TABELA 4.17 - RELAÇÃO ENTRE RESULTADOS DA PROVA CEGA PARA P1 E MÉTRICAS DE DISTÂNCIA COLORIMÉTRICA NA ETAPA DE MARCAÇÃO .....	101
TABELA 4.18 - CORES REPRESENTATIVAS E OBSERVAÇÕES DADAS PELOS OBSERVADORES E REFERENTES A DETERMINADOS LOTES NA ETAPA DE MARCAÇÃO .....	103

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

### C

C\* - Coordenada cromática de croma, ou saturação, no espaço de CIE L\*C\*h\*

Chev - Distância colorimétrica Chebyshev

CIPR - Código Internacional das Práticas Rolheiras

CIE - Comissão Internacional da Iluminação

CMY - *Cyan* (Ciano), *Magenta* (Magenta), *Yellow* (Amarelo)

CV - Coeficiente de Variação

### D

DEP - Divisão de Engenharia de Produto

### H

h\* - Coordenada cromática de tonalidade, no espaço CIE L\*C\*h\*

HDTV - *High-Definition Television*

HSI - *Hue* (Tonalidade), *Saturation* (Saturação), *Intensity* (Intensidade)

HSL - *Hue* (Tonalidade), *Saturation* (Saturação), *Lightness* (Luminosidade)

### I

IC - Intervalo de confiança

IEC - *International Electrotechnical Commission*

ITU - *International Telecommunication Union*

IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*

### L

L\* - Coordenada acromática de luminosidade, no espaço de cores CIE L\*a\*b\*

LCD - *Liquid Crystal Display*

LED - *Light-Emitting Diode*

### M

Min5 - Distância colorimétrica Minkowsky 5

ML - Milheiro de rolhas

MP - Megapixéis

### N

NI - *National Instruments*

**P**

P1 - Pergunta 1 no inquérito de prova cega: A intensidade varia ao longo da marcação?

P2 - Pergunta 2 no inquérito de prova cega: A marcação está esborratada e com sujidade?

PLA - *Polylactic acid* (ácido polilático)

**R**

RGB - *Red* (vermelho), *Green* (verde), *Blue* (azul); Espaço de cores RGB linear

R'G'B' - *Red* (vermelho), *Green* (verde), *Blue* (azul); Espaço de cores RGB não linear

ROSA - *Rate of Optimal Steam Application*

**S**

SVE - Sistema de Vedação e Estanquicidade

**T**

TCA - 2,4,6-tricloroanisol

**U**

USP - *United States Pharmacopeia*

**V**

VI - *Virtual Instruments*

## 1.1. Enquadramento e objetivos

A produção de rolhas na Amorim Cork S.A. tem início com o descortiçamento do sobreiro. Esta operação de extração da cortiça é realizada entre os meses de maio e agosto, a intervalos de 9 anos, a partir do momento em que o sobreiro atinge cerca de 25 anos de idade<sup>[1]</sup>.

Do primeiro descortiçamento resulta a chamada cortiça virgem, cuja estrutura irregular e dureza tornam-na inapropriada para a produção de rolhas, sendo, portanto, valorizada em aplicações na área da construção. O segundo descortiçamento, aos 34 anos, produz cortiça secundária, e embora esta apresente uma estrutura mais regular, e menos dura, é ainda inadequada para a produção de rolhas e, como tal, é utilizada para as mesmas aplicações que a cortiça virgem<sup>[1]</sup>.

Tem-se então que é apenas a partir do terceiro descortiçamento, e inclusive, que se obtém cortiça amadia ou de reprodução, que possui as características físico-mecânicas necessárias para a produção de rolhas de cortiça<sup>[1]</sup>.

Os processos empregues pela Amorim Cork S.A. para transformação de cortiça amadia em rolhas envolvem uma série de etapas, conforme o tipo de rolha pretendido. Assim, nas diferentes unidades industriais são produzidos essencialmente dois tipos de rolhas<sup>[2]</sup>:

- Rolhas naturais: rolhas tradicionais obtidas por perfuração (brocagem) de pranchas de cortiça com a espessura mínima necessária, as chamadas pranchas de cheio. As rolhas naturais são recomendadas para a vedação de qualquer tipo de vinho tranquilo, no entanto, são particularmente apropriadas para vinhos com um longo tempo de estágio;

- Rolhas técnicas: constituídas por um corpo denso de cortiça aglomerada formado por aglutinação de granulados resultantes de refugos e aparas, cortiça sem a qualidade necessária para a produção de rolhas naturais e restos de cortiça excedentes da produção das mesmas. As rolhas técnicas podem ainda conter discos de cortiça natural no topo e/ou fundo, conforme o tipo produzido. Estas são geralmente utilizadas para vedar champanhes, espumantes, bebidas espirituosas e vinhos tranquilos de consumo rápido ou aqueles com um curto tempo de estágio.

As rolhas naturais e técnicas apresentam fluxos produtivos distintos, no entanto têm em comum determinadas etapas que provocam alterações no aspeto visual, afetando a intensidade da cor na rolha e na marca. Estas são<sup>[2]</sup>, <sup>[3]</sup>:

- a lavagem, onde as rolhas de cortiça são desempoeiradas, branqueadas e desinfetadas, com recurso geralmente a peróxido de hidrogénio. Esta etapa permite controlar a cor final da rolha, que pode ficar mais ou menos branca consoante o período de exposição ao peróxido;
- a marcação, onde é aplicada uma marca na rolha com o logótipo do produtor e/ou a designação comercial do vinho, por meio de impressão a fogo, tinta ou laser;
- o tratamento de superfície, onde a superfície da rolha é revestida com uma fina camada de um filme de parafina, ceras, emulsões ou elastómeros de silicone, com o objetivo de aumentar a impermeabilidade a líquidos e gases, e de lubrificar a rolha, facilitando assim a sua inserção e extração no gargalo da garrafa. O tratamento aplicado pode resultar num tom acinzentado para a rolha e num aspeto esborratado para a marca.

Atualmente, o controlo de qualidade da cor das rolhas é feito por inspeção visual, realizada pelos operadores da produção e pelas equipas de controlo de processo e da qualidade. Contudo, o recurso à visão humana implica um determinado grau de subjetividade, uma vez que a cor varia de acordo com o observador e com as condições locais, como a iluminação.

Um desenvolvimento recente consiste na implementação de um método de controlo da cor objetivo e instrumental, baseado no uso de um colorímetro que opera no espaço de cores CIE  $L^*a^*b^*$ . Este permite caracterizar a cor de uma rolha através da recolha das coordenadas de cor em 6 pontos, 2 vezes no topo, 1 vez no outro topo e 3 vezes na lateral. No entanto, a necessidade de avaliação individual de cada rolha, para recolha das coordenadas ponto a ponto, implica que o método só pode ser realizado sobre um número reduzido de rolhas, uma amostra. Tem-se ainda que o mesmo, apesar de estar limitado em termos do tamanho da amostragem e do número de medições por rolha, não deixa de ser demoroso e exigente em termos de mão de obra, motivo pelo qual o seu uso industrial em rotina é de difícil aplicação.

Como tal, o desafio proposto, e o tema deste trabalho, é o desenvolvimento de uma ferramenta de inspeção visual que permita caracterizar as rolhas lavadas, marcadas e tratadas, quanto à sua cor de forma expedita e objetiva, ou seja, sem fatores subjetivos e independentemente de condições externas, como a iluminação, que poderiam de outra forma influenciar o controlo da qualidade. Pretende-se verificar a heterogeneidade da cor tanto num contexto intra-rolha, dentro da própria rolha, como inter-rolha, quando comparada com rolhas num mesmo lote e/ou com rolhas provenientes de diferentes lotes.

O software de processamento de imagens utilizado é o LabVIEW, e o programa desenvolvido neste deve ser capaz de isolar e segmentar as diferentes secções da superfície da rolha, para que estas possam ser comparadas com os padrões desejados através do uso de determinadas métricas de distância colorimétrica, como a CIEDE2000. Para o efeito, é também utilizado o hardware apropriado para captura de imagens em condições consistentes, sobre a forma de uma montagem constituída por uma máquina fotográfica, cabine de luz e fonte de iluminação apropriada.

## 1.2. O Sobreiro, Tipos e Fluxos Produtivos das rolhas

O sobreiro, *Quercus suber* L., é uma árvore com um tempo de vida médio de 150 a 200 anos e com a característica particular de conseguir regenerar-se após ter a sua casca retirada. Este processo é conhecido como o descortiçamento, e permite a obtenção da cortiça, uma matéria-prima natural, reciclável e reutilizável. Os descortiçamentos são espaçados em 9 anos, sendo que ao longo do seu tempo de vida um sobreiro pode ser descortiado entre 15 a 18 vezes, produzindo entre 40 a 60 kg de cortiça<sup>[2]</sup>, <sup>[4]</sup>.

Abaixo encontra-se uma descrição simplificada e um esquema representativo (Figura 1.1) dos principais passos envolvidos na transformação da cortiça em rolhas naturais, discos e rolhas técnicas, tendo como base a informação descrita no Código Internacional das Práticas Rolheiras (CIPR)<sup>[1]</sup>.

**Tiradia:** o processo é iniciado ao cortar a cortiça verticalmente, ao longo dos sulcos, o que permite separá-la do entrecasco, a zona entre a camada de cortiça e o lenho que constitui o interior do sobreiro. O tamanho da prancha a separar é definido através de cortes horizontais. Pranchas maiores possuem um maior valor comercial e, portanto, é de interesse realizar uma extração cuidadosa das mesmas, de modo a evitar quebras. Após remoção da cortiça, o sobreiro é marcado com o dígito do último ano em que a extração foi realizada, e os resíduos depositados na base são martelados de modo a impedir a aparência de parasitas.

**Estabilização:** as pranchas obtidas são armazenadas num estaleiro durante pelo menos 6 meses, de forma a permitir um teor de humidade uniforme<sup>[5]</sup>. É antes, ou depois, desta etapa que as pranchas são separadas conforme o seu calibre, medido em *linhas*, uma medida utilizada na indústria corticeira que permite avaliar a grossura de uma prancha. Assim, pranchas com mais de 12 linhas são classificadas como *cheio* e remetidas para a produção de rolhas naturais, e pranchas com menos de 12 linhas são classificadas como *delgado* e utilizadas para a produção de discos para rolhas técnicas. Cortiça com defeitos, ou que seja inapropriada para a produção de rolhas naturais ou discos, é denominada como refugo, e utilizada para a produção de rolhas técnicas e para outras aplicações não rolheiras<sup>[3]</sup>.

**Cozedura:** após o período de estabilização, as pranchas são imersas e cozidas durante cerca de uma hora a uma temperatura média de 98°C, no interior de tanques de aço inoxidável fechados e filtrados. O objetivo é remover sólidos orgânicos, diminuir a atividade biológica e reduzir a densidade da cortiça ao aumentar a sua espessura. Esta etapa serve também para tornar as pranchas mais macias e elásticas, facilitando o manuseamento em etapas posteriores<sup>[3]</sup>, <sup>[5]</sup>.

**Estabilização:** uma nova etapa de estabilização, esta com duração de um a três dias, que permite reduzir o teor de humidade para níveis aceitáveis, entre os 8 a 16%<sup>[1]</sup>.

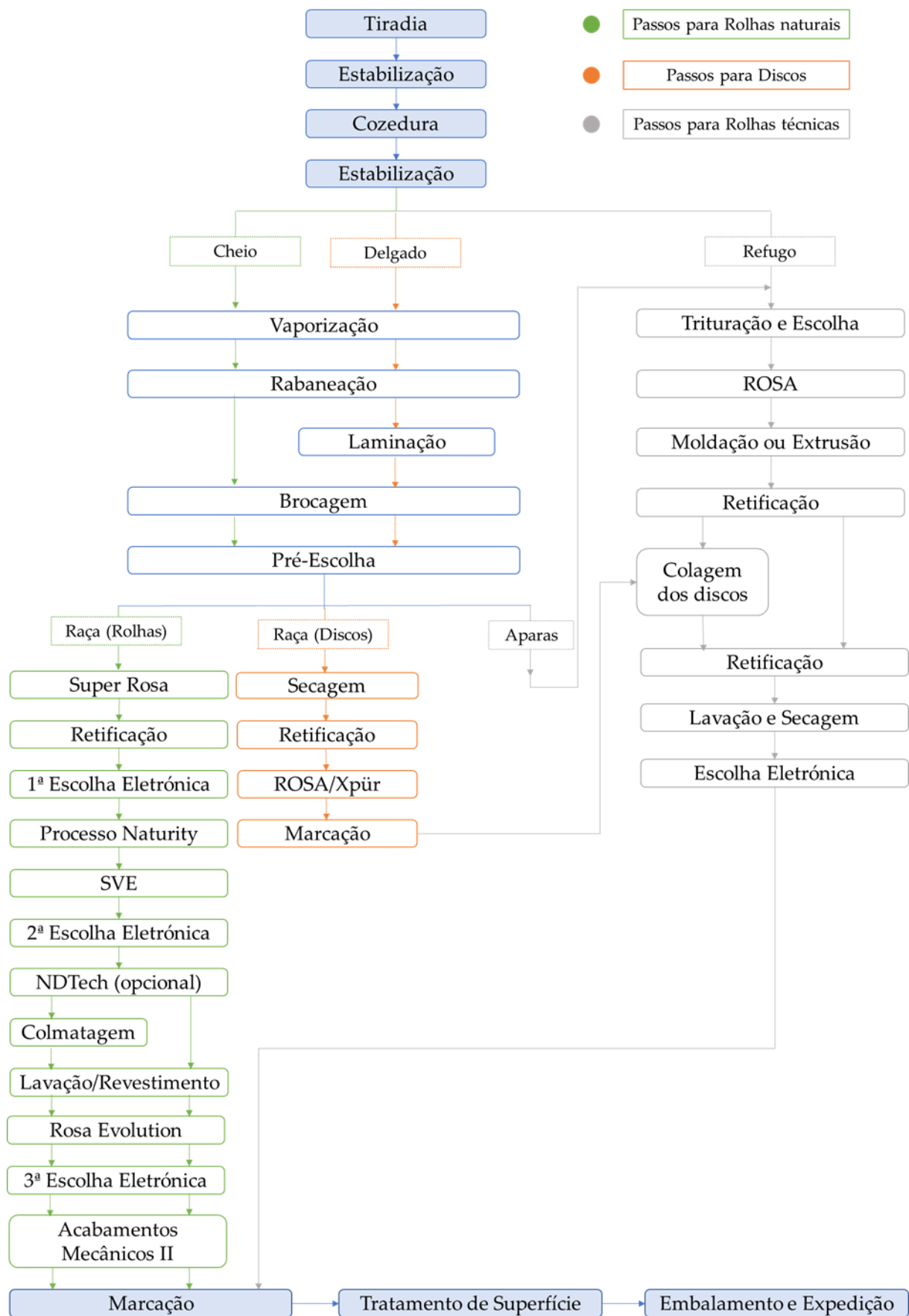


Figura 1.1 - Fluxo produtivo para Rolhas naturais, Discos e Rolhas técnicas

### 1.2.1. Rolhas naturais

As etapas descritas em seguida compreendem os diferentes passos do fluxo produtivo de rolhas naturais.

**Vaporização:** as pranchas de cheio e de delgado são submetidas a diferentes tipos de vapor, vapor húmido e vapor seco, com diferentes intervalos de duração conforme os níveis de humidade na cortiça. O objetivo do processo é aumentar a maleabilidade da cortiça e reduzir os níveis de 2,4,6-tricloroanisol (TCA), o composto químico responsável pelo odor a mofo na mesma<sup>[2], [6]</sup>.

**Rabaneação:** as pranchas são cortadas em tiras ou traços, denominados de rabanadas, com largura superior ao comprimento da rolha a fabricar. O processo de rabaneação pode ser manual, semiautomático ou totalmente automático<sup>[2], [7]</sup>.

**Laminação:** as rabanadas provenientes de pranchas delgadas são cortadas transversalmente para formar palmilhas, com espessura correspondente à dos discos<sup>[1]</sup>.

**Brocagem:** as rabanadas são perfuradas com uma broca manual, a pedal ou semiautomática, no sentido perpendicular ao comprimento da tira de cortiça, de modo que os canais lenticulares, os poros, fiquem perpendiculares ao comprimento da rolha, o que aumenta a capacidade de vedação da mesma. Brocas a pedal e semiautomáticas permitem um maior controlo sobre a perfuração, logo o operário consegue evitar defeitos na prancha e produzir rolhas de maior qualidade. Em contraste, brocas automáticas extraem rolhas de menor qualidade, uma vez que não têm em conta a qualidade da perfuração. No entanto, estas permitem uma taxa de produção constante, sendo, portanto, mais apropriadas para produção em quantidade. Os discos são obtidos por brocagem das palmilhas, e tanto estes como as rolhas têm dimensões superiores às necessárias, que serão corrigidas em etapas seguintes. Sobre o processo de brocagem, tem-se ainda que a implementação recente de brocas inteligentes na produção permite à Amorim Cork S.A. ultrapassar as limitações das gerações anteriores de brocas semiautomáticas<sup>[6], [7]</sup>.

**Pré-escolha:** é conduzida a seleção da *raça* e *apara*. A *raça* são as rolhas e discos em bruto, antes da escolha. Nesta fase são também separadas as aparas resultantes das etapas anteriores, que são utilizadas para a produção de rolhas técnicas<sup>[2]</sup>.

**Super Rosa:** uma evolução do processo ROSA (*Rate of Optimal Steam Application*), que consiste no uso de vapor de água para garantir o teor de humidade adequado e para reduzir o teor de TCA e outros compostos orgânicos voláteis. O processo Super Rosa destaca-se do convencional ao utilizar uma temperatura mais elevada e permitir uma maior capacidade de remoção de componentes voláteis em rolhas de cortiça natural<sup>[8]</sup>.

**Retificação Dimensional:** também conhecida como Acabamentos Mecânicos I, é a etapa de correção das rolhas naturais resultantes da brocagem, de forma a produzir rolhas com as dimensões pretendidas. A operação é geralmente conduzida em linha, onde na primeira máquina dá-se a correção do diâmetro (ponçamento) e na segunda dá-se a correção dos topos (topejamento)<sup>[6], [7]</sup>.

**1ª Escolha Eletrónica:** as topejadeiras, as máquinas responsáveis pelo topejamento, estão colocadas em linha com máquinas de escolha eletrónica que separam as rolhas, conforme a sua qualidade, nas classes industriais AA, A, B e C<sup>[6]</sup>.

**Processo Naturity:** processo baseado no uso de pressão, temperatura e água purificada para extrair compostos voláteis, entre estes o TCA<sup>[9]</sup>.

**Sistema de Vedação e Estanquicidade (SVE):** determina a capacidade de vedação das rolhas. Estas são colocadas numa máquina e sujeitas a um gradiente de pressão numa das suas extremidades. Rolhas com boa capacidade de vedação são aquelas que impedem a queda de pressão no interior da máquina<sup>[2], [6]</sup>.

**2ª Escolha Eletrónica:** as rolhas das classes AA e A, bem como algumas da classe B, são separadas de acordo com 6 classes comerciais, estas sendo Flor, Extra, Superior, 1ª, 2ª e 3ª<sup>[2], [6]</sup>.

**ND Tech:** como indicado, este é um processo opcional onde cada rolha é individualmente analisada e rejeitada se possuir um teor de TCA superior a 0,5 ng/L<sup>[10]</sup>.

**Colmatagem:** processo onde é utilizada uma mistura com cola e pó de cortiça, resultante da retificação de rolhas ou discos de cortiça, que cobre os poros (lenticelas) em rolhas de baixa classe. Permite melhorar a aparência e a capacidade de vedação<sup>[2]</sup>.

**Lavação/Revestimento:** processo onde as rolhas são lavadas e desinfetadas, com recurso a peróxido de hidrogénio. Tem como objetivo assegurar o desempoejamento e desinfeção das rolhas, preparando-as para o acabamento final. O controlo sobre a cor vem da reação entre o peróxido de hidrogénio e o hidróxido de sódio, da qual resulta o anião hidroperóxido que, posteriormente, reage com os grupos cromóforos presentes na lenhina. Isto permite a produção de rolhas com diferentes níveis de brancura, conforme as especificações dos compradores. As rolhas podem também ser sujeitas ao processo de revestimento, onde são revestidas com pó de cortiça e produtos à base de elastómeros em emulsão aquosa, o que ajuda a uniformizar a cor na superfície das mesmas. Este último é um processo obrigatório para rolhas colmatadas, mas opcional para rolhas não colmatadas<sup>[2], [3]</sup>.

**Rosa Evolution:** uma melhoria do processo ROSA padrão, que procura diminuir os níveis de TCA que possam ainda estar presentes nas rolhas, antes destas serem secadas<sup>[6]</sup>.

**3ª escolha eletrónica:** a última etapa de escolha eletrónica, onde é definida a classe final do produto que é enviado<sup>[6]</sup>.




**Acabamentos Mecânicos II:** repetição da etapa de retificação dimensional, ou acabamentos mecânicos I, para reprocessar rolhas que tenham sofrido danos entre estas etapas.

**Marcação:** impressão da marca e/ou logótipo na superfície da rolha. Se especificado, pode também ser impressa a contramarca e o código de fornecedor, conforme as especificações do cliente. Como referido na secção 1.1, a marca pode ser feita por impressão a fogo, tinta ou laser<sup>[2]</sup>.

**Tratamento de superfície:** a superfície das rolhas é revestida com silicone e/ou parafina, conforme o tipo de rolha a produzir e o objetivo pretendido para o tratamento. O silicone lubrifica a superfície da rolha, facilitando a sua inserção e remoção do gargalo da garrafa, e a parafina ajuda a impedir a passagem do vinho através da rolha, e a passagem de ar entre a rolha e o gargalo<sup>[3]</sup>.

**Embalamento e Expedição:** é a etapa final, onde as rolhas são selecionadas visualmente, para garantir a ausência de defeitos, contadas automaticamente e embaladas para expedição em sacos de plástico com dióxido de sílica (SiO<sub>2</sub>), selados sobre vácuo, de modo a minimizar a possibilidade de desenvolvimento de microrganismos<sup>[2]</sup>.

Tabela 1.1 - Tipos de rolhas naturais<sup>[2], [3]</sup>

Rolhas naturais	
<p><b>Natural</b></p> 	<p>É obtida por brocagem de uma peça única de cortiça (rabanada). É aplicável a todos os tipos de vinho, mas recomendada para uso em vinhos reserva e outros com um longo tempo de estágio.</p>
<p><b>Colmatada</b></p> 	<p>Rolha natural sujeita ao processo de colmatagem para melhoria do aspeto visual e capacidade de vedação.</p>
<p><b>Acquamark</b></p> 	<p>Rolha revestida com uma solução aquosa que fixa os extratos de cortiça à superfície da rolha, aumentando a sua capacidade de vedação.</p>

### 1.2.2. Rolhas técnicas

Abaixo encontram-se descritas as etapas necessárias para a produção de rolhas técnicas, excetuando aquelas previamente abordadas na descrição do fluxo produtivo de rolhas naturais.

**Trituração e Escolha:** a cortiça proveniente do refugo, e das aparas resultantes da produção de rolhas naturais e discos, é triturada para formar o granulado, que constitui o corpo das rolhas técnicas. Os granulados são então separados e agrupados conforme o seu tamanho, através do uso de mesas densimétricas<sup>[2]</sup>.

**Moldação ou Extrusão:** os granulados de cortiça são aglomerados para formar um corpo denso, através de polimerização a quente com recurso a colas à base de isocianatos, polióis de baixo peso molecular ou outros agentes aglutinantes. As duas etapas são semelhantes entre si, sendo que na moldação obtêm-se corpos individuais, enquanto que na extrusão obtêm-se um bastão que é cortado em corpos<sup>[2]</sup>.

**Colagem dos discos:** se a rolha técnica a produzir for uma com discos, estes são colados a um ou a ambos os topos da rolha, dependendo do tipo de rolha<sup>[3]</sup>.

Tabela 1.2 - Tipos de rolhas técnicas<sup>[2], [3]</sup>

Rolhas técnicas	
<p><b>Helix</b></p> 	<p>Rolha desenhada para, quando combinada com um tipo particular de garrafa, permitir a abertura da mesma sem uso de um saca-rolhas.</p>
<p><b>Top series</b></p> 	<p>Coleção de rolhas capsuladas para vedação de bebidas espirituosas. Existem 4 grupos distintos, <i>Prestige</i>, <i>Elegance</i>, <i>Premium</i> e <i>Classic Value</i>, consoante o tipo de material utilizado na construção da cápsula.</p>
<p><b>Aglomeradas</b></p> 	<p>Corpo de cortiça aglomerada, utilizado para a vedação de vinhos de consumo rápido.</p>
<p><b>Spark</b></p> 	<p>Constituída por granulados de cortiça e dois discos de cortiça natural no topo que entra em contacto com o vinho. É utilizada para a vedação de vinhos efervescentes.</p>
<p><b>Twin Top</b></p> 	<p>Corpo de cortiça aglomerada com um disco de cortiça natural em cada extremidade. É indicada para vinhos frutados e para vinhos de curto estágio.</p>
<p><b>Neutrocork</b></p> 	<p>Rolha constituída por micro grânulos de cortiça de tamanho uniforme. Recomendada para vinhos de consumo rápido.</p>

### 1.3. LabVIEW

O LabVIEW é um ambiente de programação gráfico desenvolvido em 1986 pela *National Instruments* (NI). É baseado na linguagem de programação G, que difere de outras linguagens de programação, como C++ ou Python, pelo facto de ser uma linguagem gráfica, e não à base de texto. A programação em LabVIEW baseia-se na criação de camadas sucessivas de programas/sub-rotinas denominadas de *Virtual Instruments* (VIs), que permitem uma representação mais intuitiva do código desenvolvido<sup>[11], [12]</sup>.

Um VI é constituído por um diagrama de blocos e um painel frontal. O diagrama de blocos é a solução gráfica para o problema de programação, o código, cujo resultado é representado no painel frontal, que age como a interface interativa do usuário. O painel frontal é uma combinação de controladores, que fornecem dados ao diagrama de blocos, e indicadores, que apresentam os dados adquiridos ou gerados pelo diagrama de blocos<sup>[11]</sup>.

A Figura 1.2 serve como uma representação simplificada de um VI com o código escrito no diagrama de blocos, imagem a). O controlador e uma constante 10 estão ambos ligados a um operador que realiza a multiplicação. O valor do controlador é estabelecido no painel frontal, imagem b), e o produto da operação é representado no indicador.

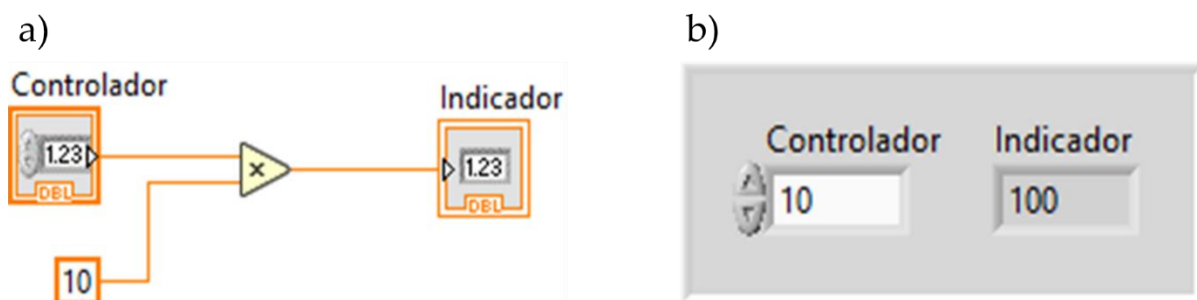


Figura 1.2 - Representação de um VI em LabVIEW, onde: a) representa o diagrama de blocos e b) representa o painel frontal

A programação em G depende do fluxo de dados, e não da sequência das linhas de texto. No exemplo apontado pela imagem a) da Figura 1.2, o operador da multiplicação necessita de dois *inputs*, os dados do controlador e da constante, neste caso, sendo que sem estes o programa não executaria. Esta natureza possibilita a criação de diagramas que executem paralelamente múltiplas operações, independentes umas das outras, num processo que é chamado de *multithreading*, o que é ainda outro fator que permite distinguir G das linguagens de programação à base de texto, onde é necessário conhecimento extensivo da linguagem para atingir o mesmo nível de paralelismo<sup>[11], [13]</sup>.

Os VIs em LabVIEW têm uma natureza hierárquica e modular. Um VI pode ser o programa principal ou pode tomar a forma de um subprograma que realiza determinadas tarefas dentro do programa principal. Um VI presente dentro de outro VI é denominado de um subVI. A Figura 1.3 representa um novo VI principal, que utiliza como subVI o VI da Figura 1.2.

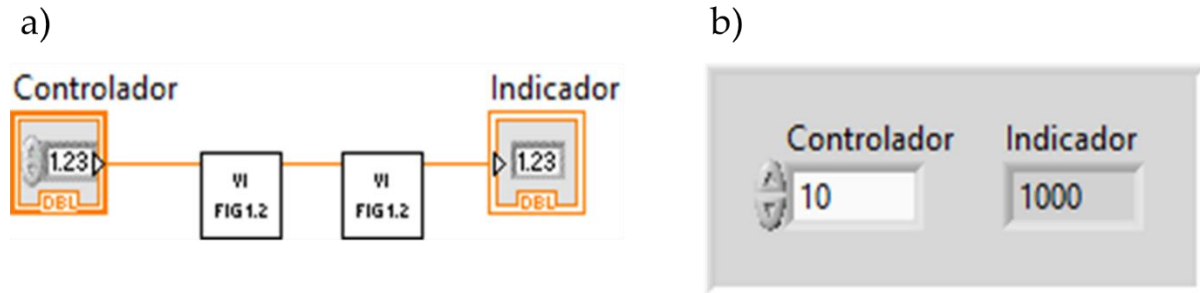


Figura 1.3 - Representação de um subVI dentro de um VI em LabVIEW, onde: a) representa o diagrama de blocos e b) representa o painel frontal

O indicador do painel frontal na Figura 1.3, imagem b), representa, portanto, o resultado do VI da Figura 1.2 se executado duas vezes. O exemplo permite demonstrar uma das maiores vantagens do LabVIEW, no sentido em que um problema complexo pode ser reparado numa série de subproblemas mais simples, que são então resolvidos através do uso de subVIs implementados no VI principal. Isto facilita a identificação e resolução de erros no programa, uma vez que cada módulo, cada subVI, pode ser testado individualmente<sup>[12]</sup>.

O LabVIEW possui uma extensa biblioteca de subVIs direcionados para tratamento e processamento de imagens, chamada IMAQ Vision. Essencialmente, estes recebem como *input* uma ou mais imagens digitais e realizam uma série de operações, como por exemplo<sup>[14]</sup>:

- Construção do histograma de cores;
- Adição, subtração, multiplicação e divisão de duas imagens;
- Definição e sobreposição de regiões de interesse;
- Localização e contagem de objetos.

Cada subVI da biblioteca IMAQ Vision, ou qualquer pertencente a uma das inúmeras bibliotecas do LabVIEW, tem uma breve descrição do funcionamento, *inputs* necessários para a execução e resultados esperados do mesmo, bem como um ou vários exemplos do subVI em funcionamento. Os exemplos em particular são extremamente úteis para a experiência de aprendizagem de LabVIEW, uma vez que permitem não só ver o subVI em operação, mas também retirar ideias sobre como construir um programa otimizado para a realização de determinada tarefa.

Em suma, a representação gráfica do código, ferramentas, tutoriais e subVIs, particularmente os encontrados na biblioteca IMAQ Vision, distinguem o LabVIEW de outras linguagens de programação, e tornam-no na opção preferencial para a criação de código de complexidade elevada, inclusive para um programador inexperiente nesta, ou em qualquer linguagem de programação, e/ou para um sem conhecimento prévio sobre processamento e tratamento de imagens.

## 2.1. Percepção de cor e metamerismo

O ser humano interpreta a cor como uma combinação de<sup>[15], [16]</sup>:

- brilho, definido como a sensação visual que indica se uma área emite mais ou menos luz;
- matiz (ou tonalidade), que representa a cor dominante interpretada pelo observador. É o que permite classificar uma cor como vermelha, amarela, verde, azul ou uma mistura de duas;
- saturação, que serve como indicação da pureza relativa de uma cor, em termos da quantidade de luz branca que está misturada com uma cor de determinada tonalidade. Quanto mais saturada for uma cor, menos branco tem.

Em termos físicos, a cor pode ser descrita como a fração de energia refletida,  $C(\lambda)$ , resultante do produto entre a capacidade refletora do próprio objeto,  $R(\lambda)$ , e a energia proveniente de uma fonte de iluminação com distribuição espectral  $E(\lambda)$ , onde  $\lambda$  corresponde ao comprimento de onda<sup>[17]</sup>.

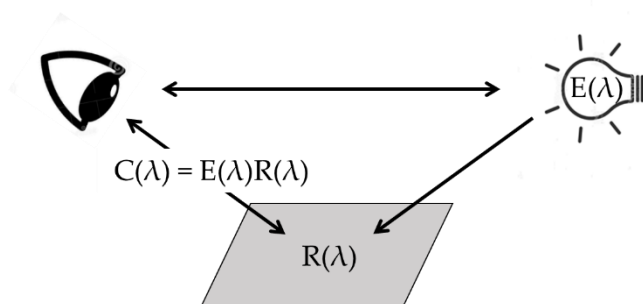


Figura 2.1 - Esquema representativo da forma como a cor é captada pelo sistema visual humano

A ligação bidirecional entre o olho e a fonte de energia, na Figura 2.1, indica que a mesma afeta a forma como a cor é interpretada, ou seja, que a percepção da cor varia de acordo com a iluminação local. A cor é também influenciada pelo conhecimento prévio que o observador tem sobre o objeto, uma vez que as expectativas do observador podem alterar a aparência do mesmo<sup>[17]</sup>.

A cor é captada no olho, mais precisamente na retina, e interpretada pelo sistema visual humano. A retina é uma camada fina, com menos de meio milímetro de espessura, que reveste o interior do olho. É onde estão localizados os neurónios sensoriais que respondem à luz, e os circuitos neuronais que são responsáveis pelas primeiras etapas do processamento da mesma<sup>[18]</sup>.

As células fotorreceptoras, que podem ser bastonetes ou cones, são os neurónios responsáveis pela deteção da luz de qualquer comprimento de onda, e transformação desta em sinais elétricos e químicos. No interior dos neurónios encontram-se os fotopigmentos, cadeias sensíveis de polipeptídeos que absorvem os fótons de luz e desencadeiam uma reação enzimática, da qual resulta um sinal elétrico que é enviado para o cérebro, através do nervo ótico, para posterior processamento<sup>[19]</sup>.

Os bastonetes possuem apenas um tipo de fotopigmento e, portanto, reagem de forma idêntica à luz de qualquer comprimento de onda, não permitindo a distinção entre as cores. No entanto, estes são particularmente sensíveis a variações na intensidade de luz, motivo pelo qual são os fotorreceptores responsáveis pela visão noturna.

Já os cones possuem vários tipos de fotopigmentos, logo permitem a distinção entre cores. Os cones podem ser distinguidos em três tipos, cada um com diferentes espectros de absorção de comprimento de onda,  $S(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$  e  $L(\lambda)$ . Estes reagem à luz de diferentes comprimentos de onda, dentro da gama correspondente à luz visível, localizada entre os 380 a 720 nm. Dependendo do comprimento de onda, a luz pode ser associada a cada uma das três cores primárias<sup>[18]</sup>:

- Luz de comprimento de onda curto, associada à cor azul (S);
- Luz de comprimento de onda médio, associada à cor verde (M);
- Luz de comprimento de onda longo, associada à cor amarela/vermelha (L).

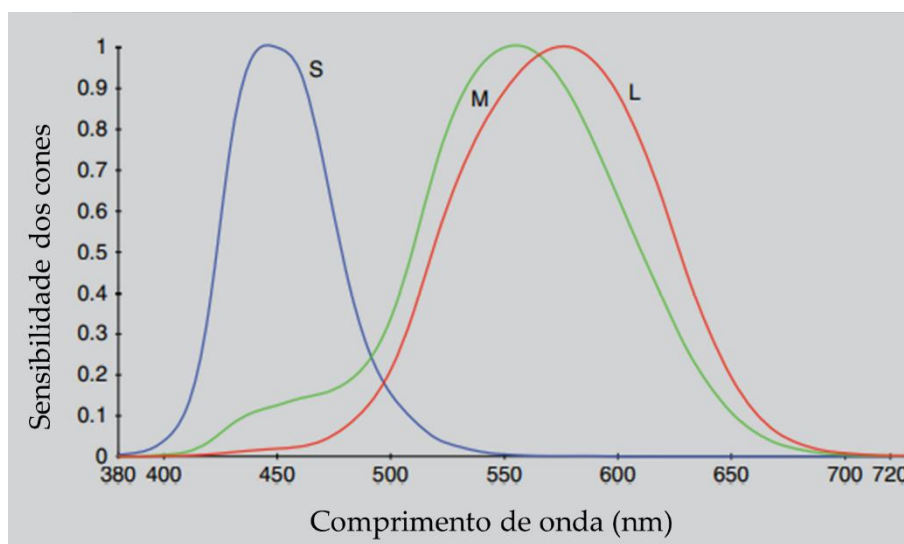


Figura 2.2 - Sensibilidade dos três tipos de cones a luz de diferentes comprimentos de onda (adaptado de <sup>[18]</sup>)

Tem-se então que a visão a cores é possível quando o estímulo provocado pela energia refletida,  $C(\lambda)$ , é interpretado pelo cone apropriado, de acordo com o comprimento de onda, e a resposta subsequente é enviada para processamento através do nervo ótico.

O modelo teórico descrito na literatura dita que a sensação visual,  $\alpha$ , resultante pode ser descrita pelas equações (2.1), (2.2) e (2.3), conforme os espectros de absorção dos cones<sup>[20]</sup>:

$$\alpha_S(C) = \int_{\lambda} C(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

$$\alpha_M(C) = \int_{\lambda} C(\lambda) M(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

$$\alpha_L(C) = \int_{\lambda} C(\lambda) L(\lambda) d\lambda \quad (2.3)$$

Com base nas equações apontadas, pode ser concluído que dois objetos com energias refletidas diferentes, ou seja com cores diferentes,  $C_1$  e  $C_2$ , são interpretados pelo sistema visual como tendo a mesma cor desde que se observe a mesma sensação visual, ou seja, desde que se verifique a igualdade entre os três integrais<sup>[18]</sup>:

$$\int_{\lambda} C_1(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} C_2(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

$$\int_{\lambda} C_1(\lambda) M(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} C_2(\lambda) M(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

$$\int_{\lambda} C_1(\lambda) L(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda} C_2(\lambda) L(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

Isto é conhecido como metamerismo, o fenómeno onde dois objetos, um par metamérico, aparentam ter cores diferentes quando sujeitos a diferentes fontes de luz ou quando expostos a diferentes observadores. Existem dois tipos de fenómenos metaméricos<sup>[21]</sup>:

- Metamerismo iluminante, que ocorre quando, para o mesmo observador, dois objetos apresentam a mesma cor sobre determinada fonte de luz, mas cores diferentes quando sujeitos a outra(s) fonte(s);
- Metamerismo de observador, quando a cor de dois objetos corresponde para determinados observadores, mas difere para outros. Isto pode dever-se às condições de observação, como a distância ou ângulo a que os objetos são observados.

## 2.2. Imagens digitais

Uma imagem digital é formada por um *array* bidimensional que contém milhares a milhões de pixels de determinada cor, organizados de forma a conferir o aspeto visual pretendido para a imagem. Cada pixel ocupa uma determinada posição  $(x, y)$  no *array*, e a resolução da imagem é dada pelo número de pixels que este contém. Se a resolução for de  $500 \times 500$ , a imagem tem  $500^2 = 250\,000$  pixels, e uma máquina fotográfica com resolução de 24 MP (megapixels) devolve uma imagem com 24 milhões de pixels.

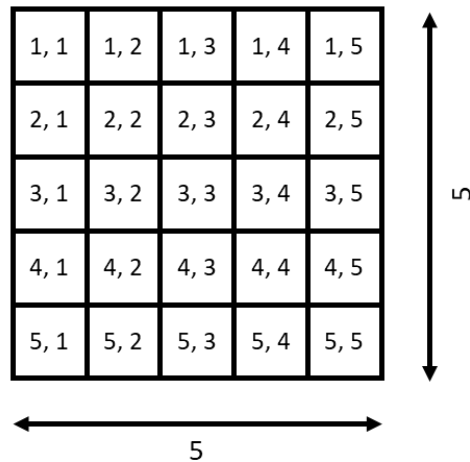


Figura 2.3 - Exemplo de um *array* bidimensional do qual resultaria uma imagem com resolução de  $5 \times 5 = 25$  pixels

O tipo de imagem está dependente do número de bits utilizado para codificar cada pixel, denominado de *bit depth*. As imagens binárias, também conhecidas como imagens a preto e branco, têm uma *bit depth* de 1. Atendendo que cada bit assume o valor de 0 ou 1, um pixel numa imagem binária seria ou preto ou branco, respetivamente<sup>[22], [23]</sup>.

Imagens *gray-scale* são imagens monocromáticas onde cada pixel descreve uma determinada intensidade luminosa em tons de cinzento. Uma imagem *gray-scale* convencional utiliza 8 bits por pixel, o que permite representar  $2^8 = 256$  tons de cinzento, que variam desde preto, 0, a branco, 255<sup>[24]</sup>.

Imagens a cores são tomadas como um compósito de 4 valores, associados a 4 canais distintos. O primeiro dos 4 canais é o plano alfa, que é utilizado para guardar informação extra, como a transparência do pixel. Os restantes 3 canais agem como bandas monocromáticas, onde cada contém informação sobre a intensidade luminosa de cada uma das três cores primárias: vermelho, verde e azul<sup>[24]</sup>. À semelhança do apontado para imagens *gray-scale*, o número de bits por canal define o número de tons distintos que podem ser representados para cada cor primária, variando novamente entre preto e branco. Se a *bit depth* for de 8 bits por canal, então um pixel seria codificado como um valor com 4 bytes, ou  $4 \times 8 = 32$  bits. Uma vez que são utilizados apenas 3 bytes, ou 24 bits, para guardar a informação relativa à cor, e lembrando que cada bit assume valores de 0 ou 1, uma imagem a cores pode ter no máximo  $2^{8 \times 3} = 2^{24} = 16\,777\,216$  cores distintas e, portanto, cada pixel numa imagem a cores é caracterizado por um valor entre 0, preto, a 16 777 215, branco.

A Figura 2.4 serve como uma representação do cálculo do valor de um pixel, no espaço de cores R'G'B' (*Red, Green, Blue*) e para uma *bit depth* de 8 bits por canal, quando este representa uma cor com coordenadas R'G'B' = (255, 42, 1).

$$\begin{array}{cccccccc}
 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \\
 \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} = 2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 255 \\
 \\ 
 \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} = 0 + 0 + 2^5 + 0 + 2^3 + 0 + 2^1 + 2^0 = 42 \\
 \\ 
 \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 2^0 = 1 \\
 \\ 
 23 & 22 & 21 & 20 & 19 & 18 & 17 & 16 & 15 & 14 & 13 & 12 & 11 & 10 & 9 & 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \\
 \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{1} \\
 2^{23} + 2^{22} + 2^{21} + 2^{20} + 2^{19} + 2^{18} + 2^{17} + 2^{16} + 0 + 0 + 2^{13} + 0 + 2^{11} + 0 + 2^9 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 2^0 = 16\ 722\ 433
 \end{array}$$

Figura 2.4 - Exemplo do cálculo do valor de um pixel a cores

Atendendo ao elevado número de cores disponíveis para cada pixel, uma imagem pode ter entre dezenas a milhões de cores distintas, dependendo da resolução do dispositivo de captura e do sujeito da fotografia.

### 2.2.1. Correção de raios gama

Como indicado na secção 2.1, o sistema visual humano interpreta a cor com base no brilho, tonalidade e saturação. No entanto, este é particularmente não linear em termos do brilho, sendo mais sensível para pequenas diferenças em zonas mais escuras e menos sensível para diferenças em zonas mais claras. Para representar corretamente esta falta de linearidade, uma imagem teria de ser codificada em 11 bits por canal, ao contrário dos 8 bits referidos, o que iria obrigar a que cada imagem ocupasse cerca de 40% mais espaço em memória<sup>[25]</sup>. Por este motivo, as imagens digitais, no momento em que são captadas, são sujeitas ao que é chamado de codificação de raios gama, um processo que garante uma maior alocação de bits para as regiões mais escuras do que para as mais claras, o que permite manter a codificação em 8 bits por canal. Assim, no momento de aquisição de uma imagem, o dispositivo de captura transforma as coordenadas lineares RGB da luz refletida pelo objeto em coordenadas R'G'B', pertencentes ao espaço RGB não linear. No momento de reprodução da imagem, o próprio dispositivo de captura, ou o monitor, aplica a correção de raios gama e reproduz as coordenadas RGB lineares originais<sup>[20], [25], [26]</sup>.

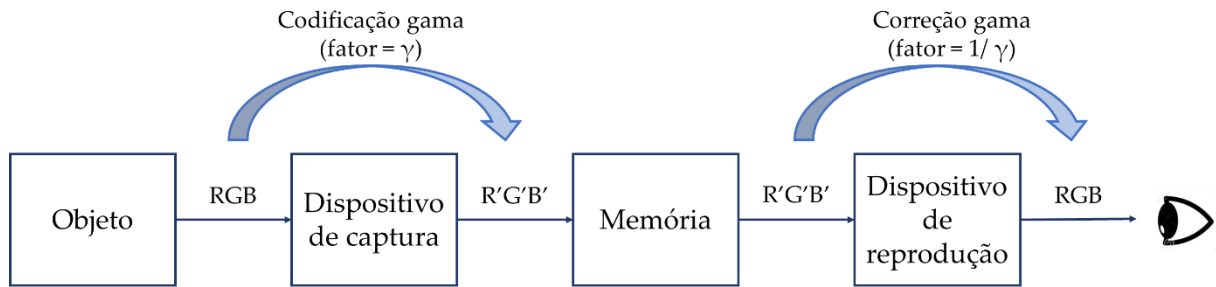


Figura 2.5 - Etapas envolvidas no processamento de uma imagem digital (adaptado de [20])

O valor gama,  $\gamma$ , e as fórmulas empregues para a codificação e correção de raios gama variam conforme a norma utilizada.

Se adotada a norma internacional IEC 61966-2-1, estabelecida em 1999 pela *International Electrotechnical Commission* (IEC), e emendada em 2003, o fator gama é de 0,417 e a codificação e correção de raios gama, do linear  $X$  para o não linear  $X'$ , e vice-versa, é dada pelas equações (2.7) e (2.8)<sup>[27]</sup>:

$$X' = \begin{cases} 12,92X & \text{se } X < 0,0031308 \\ 1,055X^{0,417} - 0,055 & \text{se } X \geq 0,0031308 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$X = \begin{cases} \frac{X'}{12,92} & \text{se } X' \leq 0,04045 \\ \left( \frac{X' + 0,055}{1,055} \right)^{\frac{1}{0,417}} & \text{se } X' > 0,04045 \end{cases} \quad (2.8)$$

Se adotada a norma internacional ITU-R BT.709-6 para codificação de sinais em HDTV (*High-Definition Television*), estabelecida em 2015 pela *International Telecommunication Union* (ITU), o fator gama é de 0,45 e a codificação e correção de raios gama é dada pelas equações (2.9) e (2.10)<sup>[28]-[30]</sup>:

$$X' = \begin{cases} 4,5X & \text{se } X < 0,018 \\ 1,099X^{0,45} - 0,099 & \text{se } X \geq 0,018 \end{cases} \quad (2.9)$$

$$X = \begin{cases} \frac{X'}{4,5} & \text{se } X' \leq 0,081 \\ \left( \frac{X' + 0,099}{1,099} \right)^{\frac{1}{0,45}} & \text{se } X' > 0,081 \end{cases} \quad (2.10)$$

### 2.3. Modelos e espaços de cores

Na secção 2.1 foi apontada a existência de três tipos de cones associados a espectros de absorção distintos e que são responsáveis pela visão a cores. Referiu-se também que o ser humano interpreta a cor com base no brilho, tonalidade e saturação. Posto isto, faz sentido que um modelo de cores utilize igualmente três componentes para a formação de um vetor que represente, matematicamente, uma determinada cor<sup>[20]</sup>.

Um espaço de cores é, portanto, um espaço vetorial que descreve a organização de um conjunto de cores e que serve para a reprodução das mesmas, onde cada cor é caracterizada de acordo com um determinado modelo de cores<sup>[31]</sup>.

Como exemplos de espaços de cores associados a um dado modelo de cores têm-se os espaços sRGB, também conhecido como *standard* RGB, e Adobe RGB, ambos os quais utilizam o mesmo modelo de cores, o modelo RGB. Atendendo que o uso de um determinado espaço de cores implica o uso do modelo de cores associado, os dois termos encontram-se frequentemente indiscerníveis em fontes literárias, onde, por exemplo, RGB é frequentemente identificado como um espaço de cores e não um modelo<sup>[15], [20], [32]</sup>. De modo a evitar discordâncias com a literatura, esta convenção será adotada na presente dissertação.

Os modelos, ou espaços, de cores podem ser divididos em três categorias<sup>[20], [33]</sup>:

- Orientados para o hardware: aqueles definidos de acordo com as propriedades do sistema ótico que reproduz a cor. Servem para especificar a cor de forma que seja compatível com o hardware que é utilizado para criar, manipular ou receber os sinais de cor. Impressoras e scanners utilizam o modelo de cores CMY (*Cyan, Magenta, Yellow*), e monitores utilizam o modelo de cores RGB, e mais concretamente os espaços de cores sRGB ou Adobe RGB;
- Orientados para o usuário: os baseados na percepção humana da cor de acordo com os valores de brilho, tonalidade e saturação. Como exemplo tem-se os modelos da família HSI (*Hue, Saturation, Intensity*), que são utilizados em aplicações de processamento de imagens como segmentação, deteção de objetos, reconhecimento de padrões e outras<sup>[34]</sup>;
- Independentes do dispositivo: modelos que definem as coordenadas de uma cor de forma que esta possa ser igualmente reproduzida, independentemente das características do sistema. Modelos do género, como o CIE XYZ ou CIE L\*a\*b\*, são utilizados em aplicações onde haja necessidade de comparação de cores ou de transmissão de informação visual entre dispositivos diferentes<sup>[20], [35]</sup>.

Outra característica importante de um espaço de cores é a sua uniformidade. Um espaço de cores diz-se perceptualmente uniforme quando a diferença observável entre duas cores pode ser precisamente descrita através do valor indicado para a distância euclidiana entre as coordenadas de cor. Assim, se duas cores de um par aparentarem ser mais distintas que duas cores de outro par, a distância euclidiana entre as cores do primeiro par deve ser maior do que distância euclidiana entre as cores do segundo. A distância euclidiana entre duas cores,  $C_1$  e  $C_2$ , pertencentes a um espaço de cores aleatório IJK, é dada pela equação (2.11)<sup>[36]</sup>:

$$\Delta E = ((I_1 - I_2)^2 + (J_1 - J_2)^2 + (K_1 - K_2)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

Os benefícios do uso de espaços de cor perceptualmente uniformes são aparentes em questões de comparação entre cores. Por este motivo, a CIE (Comissão Internacional da Iluminação) padronizou, em 1976, os espaços de cor CIE L\*a\*b\* e CIE L\*u\*v\*, ambos os quais são derivados do modelo CIE XYZ e publicitados como espaços independentes do dispositivo e perceptualmente uniformes. Estes caracterizam uma cor com base na coordenada acromática L\* (luminosidade, ou *lightness*) e duas coordenadas cromáticas a\* e b\* ou u\* e v\*, conforme<sup>[20]</sup>.

Para os objetivos propostos no presente trabalho, foram utilizados os espaços de cor RGB, HSL e CIE L\*a\*b\*, cujas características principais encontram-se sumariamente descritas na Tabela 2.1, e que são abordados com maior detalhe nas secções 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3, respetivamente.

Tabela 2.1 - Descrição dos diferentes espaços de cor utilizados<sup>[20], [33]</sup>

	RGB	HSL	CIE L*a*b*
<b>Categoria a que pertence</b>	Independente do dispositivo	Orientado para o usuário	Independente do dispositivo
<b>Tipo de coordenadas</b>	Cromáticas	Cromáticas e acromáticas	Cromáticas e acromáticas
<b>Espaço ou modelo do qual deriva</b>	---	RGB	XYZ
<b>Vantagens</b>	<p>É o espaço padrão utilizado na maioria dos dispositivos, logo permite representar a cor sem transformações adicionais;</p> <p>Propriedades aditivas na representação de cores.</p>	<p>Preferível para usuários devido à similaridade com o sistema visual humano;</p> <p>Separação em duas coordenadas cromáticas e uma acromática tornam-no útil no processamento de imagens, uma vez que pode ser utilizada apenas uma das coordenadas para segmentação, o que resulta em algoritmos mais expedientes do que aqueles à base de outros espaços de cores.</p>	<p>Perceptualmente uniforme, logo é particularmente apropriado para propósitos de avaliação da diferença entre cores.</p>
<b>Desvantagens</b>	<p>Não é útil para segmentação de imagens e reconhecimento de cores;</p> <p>Pouco intuitivo;</p> <p>Não é perceptualmente uniforme.</p>	<p>Instabilidade na coordenada de tonalidade devido à natureza angular do espaço;</p> <p>Não é apropriado para propósitos de manipulação de cores;</p> <p>Não é perceptualmente uniforme.</p>	<p>Pouco intuitivo;</p> <p>A conversão requer o estabelecimento de um “ponto branco”.</p>
<b>Aplicações principais</b>	<p>Armazenamento e processamento de imagens;</p> <p>Caracterização de cores.</p>	<p>Segmentação de imagens;</p> <p>Deteção de características.</p>	<p>Avaliação da diferença entre cores;</p> <p>Calibração de cores.</p>

### 2.3.1. RGB e R'G'B'

O espaço de cores RGB é um espaço vetorial com três dimensões associadas a cada uma das cores primárias, estas sendo vermelho (*Red*, R), verde (*Green*, G) e azul (*Blue*, B). Neste, uma cor C é definida como um vetor, tal que  $C = (R, G, B) \forall R, G, B \in [0, 1]$ . O espaço de cores assume a forma de um cubo<sup>[15], [37]</sup>.

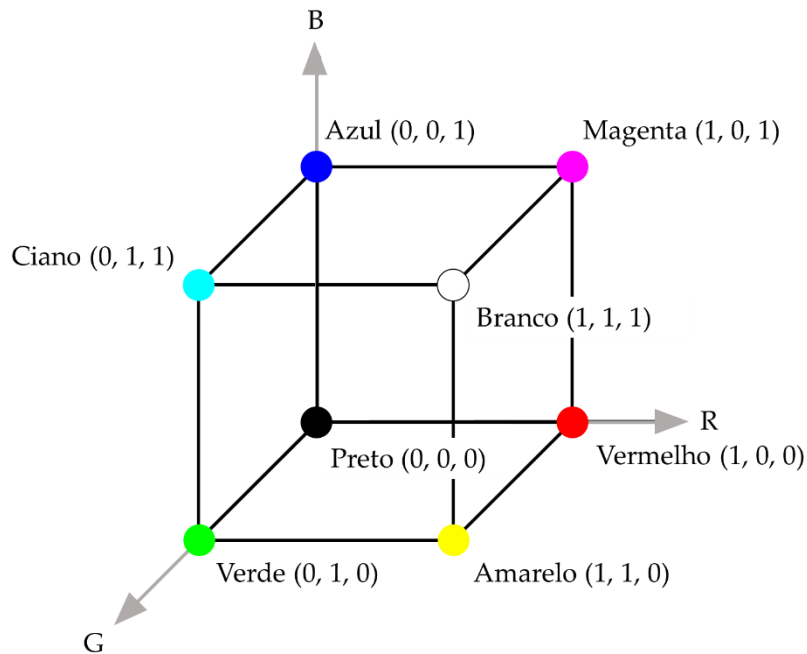


Figura 2.6 - Representação do espaço de cores RGB

A Figura 2.6 indica ainda a natureza aditiva do espaço de cores RGB, onde o amarelo, por exemplo, resulta da mistura em quantidades iguais de verde e vermelho. Isto é conhecido como a primeira lei de Grassmann para a mistura de cores, estabelecida pelo físico e matemático alemão Hermann Grassmann, e que dita que todas as cores, à exceção das três primárias, resultam da mistura de pelo menos 2 das cores primárias em determinada proporção<sup>[35]</sup>.

A sua natureza aditiva é o que torna o espaço de cores RGB particularmente apropriado para a representação de cor em monitores, isto porque, tomando como exemplo o funcionamento de monitores LCD (*Liquid Crystal Display*), cada monitor é constituído por milhões de pixels, dependendo da resolução, e cada pixel está dividido em três sub-pixéis, cobertos por filtros vermelhos, verdes e azuis, que representam as cores primárias. Assim, as cores representadas em monitores tomam proveito da natureza aditiva e resultam da excitação de cada um destes sub-pixéis com determinada voltagem, conforme a intensidade pretendida para a primária em questão<sup>[38]</sup>.

Cada uma das coordenadas cromáticas no espaço RGB é proporcional à intensidade da luz, de respetivo comprimento de onda, que é irradiada por um objeto no espectro visível. Assim, o valor linear de R é proporcional à luz na banda dos 700 nm, o valor linear de G é proporcional à luz na banda dos 546,1 nm e o valor linear de B à luz na banda dos 435,8 nm. Como tal, o espaço linear RGB é independente do dispositivo, sendo utilizado para garantir

consistência de cores entre diferentes dispositivos e para a transformação de coordenadas de cor para outros espaços independentes do dispositivo, como o CIE  $L^*a^*b^*$  (secção 2.3.3)<sup>[20]</sup>.

Como referido na secção 2.2.1, coordenadas de cor no espaço RGB podem ainda, por codificação gama, ser convertidas para o espaço não linear  $R'G'B'$ , sendo posteriormente multiplicadas por 255, uma vez que cada canal é codificado em 8 bits. Portanto, uma cor  $C$  no espaço  $R'G'B'$  é definida por  $C = (R', G', B') \forall R', G', B' \in [0, 255]$ .

Dado que o resultado da codificação depende do fator gama do dispositivo, uma imagem definida no espaço  $R'G'B'$  só é igualmente representada em dois monitores distintos se estes possuírem o mesmo fator gama. Logo, este é um espaço dependente do dispositivo e não é apropriado para garantir consistência de cores entre dispositivos. No entanto, uma vez que o sistema visual humano tem igualmente uma resposta não linear à intensidade de luz, o espaço  $R'G'B'$  é mais perceptualmente uniforme do que o RGB, e como tal é mais indicado para a avaliação de distâncias colorimétricas. Este é também utilizado para conversão de coordenadas em outros espaços de cores, como o HSL (secção 2.3.2), e para aplicações de processamento de imagens, como estratégias de quantização ou filtração<sup>[20]</sup>.

### 2.3.2. HSL

O espaço de cores HSL pertence à família HSI, e define uma cor de acordo com o seu valor de tonalidade (*Hue*,  $H$ ), saturação (*Saturation*,  $S$ ) e luminosidade (*Lightness*,  $L$ ). Esta natureza implica uma correlação direta entre as coordenadas no espaço HSL e a forma como o sistema visual humano interpreta a cor, referida na secção 2.1, o que facilita a especificação de cores neste espaço, quando comparado com outros espaços de cores como o RGB ou o CIE  $L^*a^*b^*$ , dado que é mais intuitivo seleccionar a tonalidade e alterar o valor de saturação e luminosidade para representar a cor pretendida. Como tal, o espaço HSL, e outros da família HSI, são os mais indicados para interação humana<sup>[20]</sup>.

O espaço de cores é representado por dois cones hexagonais, onde a tonalidade ( $H$ ) é dada pelo ângulo no sistema de coordenadas polar, a saturação ( $S$ ) é proporcional à distância radial e a luminosidade ( $L$ ) é a distância ao longo do eixo perpendicular ao plano de coordenadas polar, como indicado na Figura 2.7<sup>[20]</sup>.

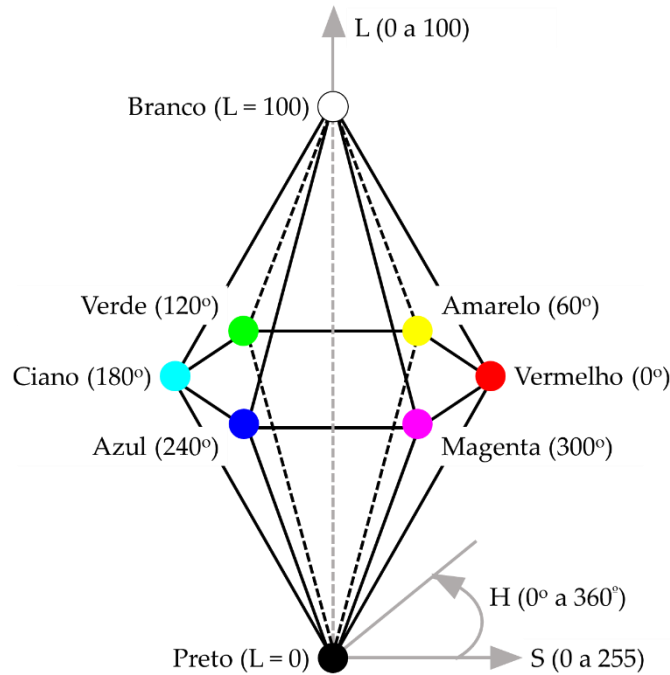


Figura 2.7 - Representação do espaço de cores HSL

A forma do espaço de cores permite a separação em duas coordenadas cromáticas, tonalidade e saturação, e uma coordenada acromática de luminosidade, o que, como indicado na Tabela 2.1, concede a vantagem de utilizar apenas uma coordenada, geralmente a tonalidade, para propósitos de segmentação de imagens. No entanto, a representação angular da tonalidade implica uma descontinuidade no espaço de cores para o ângulo de 360°, na transição para o vermelho. Tem-se ainda que o espaço HSL não é perceptualmente uniforme e, dado que deriva da conversão de coordenadas no espaço  $R'G'B'$ , é também dependente do dispositivo.

### 2.3.3. CIE $L^*a^*b^*$ e CIE $L^*C^*h^*$

O espaço de cores CIE  $L^*a^*b^*$ , ou CIELAB, foi apresentado em 1976 pela CIE como uma potencial solução para a falta de uniformidade no cálculo de distâncias colorimétricas, dado que na altura existiam até 20 fórmulas distintas para calcular a diferença entre cores<sup>[18]</sup>. Tem uma representação cartesiana tridimensional, indicada na Figura 2.8.

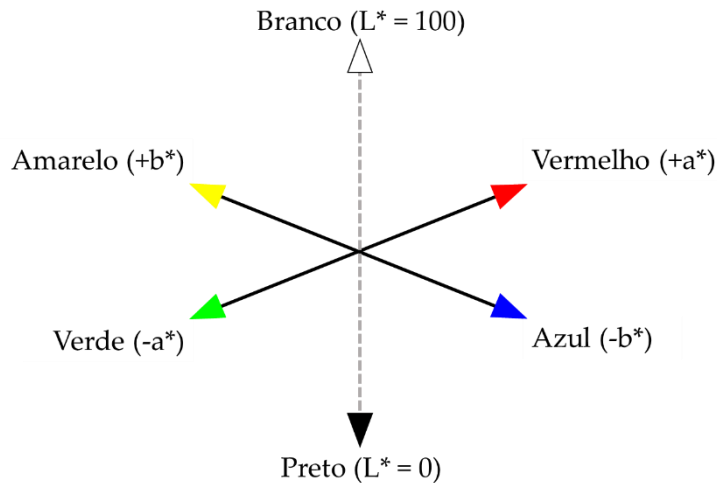


Figura 2.8 - Representação do espaço de cores CIE L\*a\*b\*

Este resulta da transformação do espaço linear RGB para o espaço de cores CIE XYZ, por meio de uma matriz apropriada, seguida pela conversão para CIE L\*a\*b\*. Como indicado na Tabela 2.1, a conversão requer o uso de um ponto branco, definido como o ponto, no espaço CIE XYZ, ao qual equivale as coordenadas RGB = (1, 1, 1) que, como ilustrado na Figura 2.6, representam a cor branca<sup>[39]</sup>. A necessidade do ponto branco apresenta-se como uma desvantagem, uma vez que este varia de acordo com a fonte de iluminação utilizada e de acordo com o ângulo de observação, ou de captura, do objeto. Assim, o uso do espaço CIE L\*a\*b\* para caracterização da cor requer que a mesma seja registada sobre uma fonte de iluminação com valores padronizados, como o iluminante D65, e que o observador, ou dispositivo de captura, se encontre a um ângulo entre 1 a 4° ou 5 a 10°, sendo que ambos os intervalos têm coordenadas de ponto branco distintas, para a mesma fonte de iluminação<sup>[40]</sup>.

Tem-se ainda que, apesar do CIE L\*a\*b\* ter sido criado com o propósito de ser um espaço perceptualmente uniforme, ou seja, um onde a diferença entre duas cores pode ser descrita pela distância euclidiana entre as respectivas coordenadas, denominada de  $\Delta E_{ab}$ , múltiplas fontes literárias confirmam que este não é exatamente uniforme<sup>[41]-[43]</sup>, particularmente para pequenas diferenças entre cores, motivo pelo qual a CIE recomenda atualmente o uso da fórmula CIEDE2000, cujo desenvolvimento será sumariamente descrito na secção 2.4<sup>[40]</sup>.

No entanto, apesar de não corresponder à definição exata de perceptualmente uniforme, o espaço de cores CIE L\*a\*b\* é mais uniforme do que os outros espaços de cores em uso atualmente, inclusive o RGB e HSL. Como tal, este é a escolha preferencial para propósitos de avaliação da distância colorimétrica e, atendendo que é também independente do dispositivo, para proporcionar especificações exatas da cor nas indústrias automotiva, têxtil e do papel<sup>[44]</sup>.

Exemplos de aplicações atuais do espaço CIE L\*a\*b\* incluem a caracterização da cor da pele para transplantes ou para deteção de mudanças de tom que possam ser indicativas de doenças como cancro da pele<sup>[45]</sup>, <sup>[46]</sup>. Este é ainda amplamente utilizado para avaliação da diferença de cores em áreas como a medicina dentária, onde a correspondência entre o tom dos implantes e o dos dentes naturais do paciente é de extrema importância<sup>[47]-[49]</sup>.

O espaço de cores CIE  $L^*a^*b^*$  pode também ser adaptado para uma representação esférica, no que é chamado de o espaço CIE  $L^*C^*h^*$ . Neste, as coordenadas cromáticas são dadas pela croma, ou saturação, ( $C^*$ ), e pela tonalidade, ( $h^*$ )<sup>[44]</sup>. À semelhança do espaço HSL, o espaço CIE  $L^*C^*h^*$  é mais intuitivo, ao permitir uma melhor correlação com o sistema visual humano. Tem-se também que a conversão de CIE  $L^*a^*b^*$  para CIE  $L^*C^*h^*$  é um passo necessário no cálculo da distância colorimétrica  $\Delta E_{00}$ , indicada na secção 2.4.

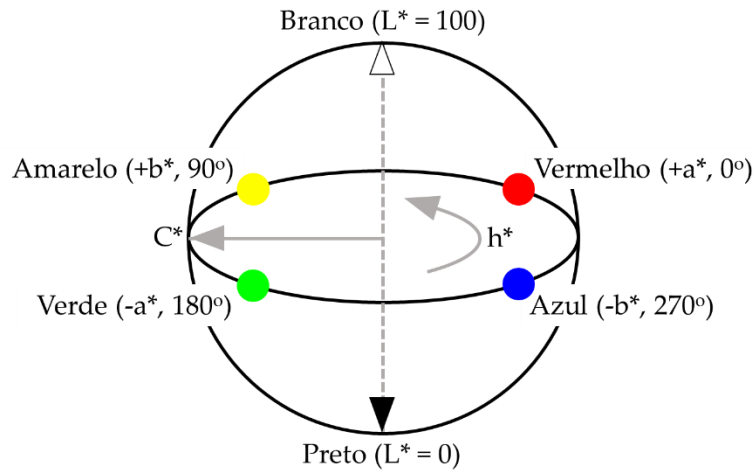


Figura 2.9 - Representação do espaço CIE  $L^*C^*h^*$

## 2.4. Métricas de distância colorimétrica

No contexto de imagens digitais, a distância colorimétrica entre duas cores é dada como a distância numérica entre os dois pixéis que as caracterizam, definidos de acordo com um determinado espaço de cores<sup>[50]</sup>. Como referido na secção 2.3.3, o espaço de cores CIE  $L^*a^*b^*$  é atualmente a opção mais próxima de um espaço perceptualmente uniforme e, portanto, é a escolha preferencial para a avaliação da distância, ou diferença, entre cores.

Em CIE  $L^*a^*b^*$ , a distância euclidiana entre duas cores,  $C_1$  e  $C_2$ , é indicada como  $\Delta E_{ab}$  e definida de acordo com a equação (2.12):

$$\Delta E_{ab} = ((L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Atribuir um valor numérico à distância entre cores permite estabelecer o que são chamados de limites de aceitabilidade e perceptibilidade.

O limite de aceitabilidade é o valor a partir do qual a diferença entre cores torna-se inaceitável para o observador, de acordo com um determinado critério. Este varia de indústria para indústria, conforme o que for considerado como aceitável, e, portanto, requer um estudo aprofundado sobre a diferença de cores na mesma<sup>[51]</sup>. Na altura em que foi desenvolvido este trabalho, não aparentam existir artigos ou outras fontes literárias que descrevam limites de aceitabilidade da cor de rolhas ou de outros produtos à base de cortiça ou madeira.

O limite de perceptibilidade é tido como o valor que define uma diferença entre cores notável para 50% dos observadores<sup>[51]</sup>. Um artigo publicado em 2013 refere que o valor mais comumente utilizado é de 1 unidade  $\Delta E_{ab}$ , este resultante de um estudo realizado em 1979

sobre o valor numérico de pequenas diferenças de cores<sup>[52], [53]</sup>. De acordo com a equação (2.12), duas cores  $C_1$  e  $C_2$  teriam uma diferença de 1 unidade  $\Delta E_{ab}$  se, por exemplo, apenas uma das diferenças entre coordenadas fosse equivalente a 1.

A Figura 2.10 representa, entre as setas divisórias, uma cor padrão com coordenadas  $L^*a^*b^* = (75, 50, 50)$ . No lado esquerdo das setas divisórias têm-se as cores equivalentes a uma diferença de -1, e no lado direito as cores equivalentes a uma diferença de +1, para um total de, portanto, 6 cores com uma diferença de 1 unidade  $\Delta E_{ab}$  à cor padrão, no centro.

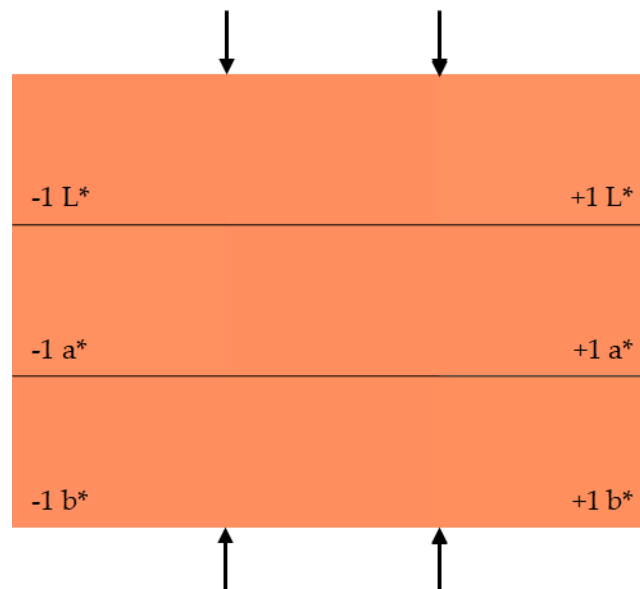


Figura 2.10 - Representação do limite de perceptibilidade de 1 unidade  $\Delta E_{ab}$

Como indicado, a diferença observável entre as 6 cores e a cor padrão é ténue, se distinguível de todo, e aparenta ser mais pronunciada para a coordenada  $L^*$  de luminosidade.

Os valores resultantes do cálculo da distância euclidiana seriam válidos se o espaço de cores onde esta é aplicada fosse perceptualmente uniforme. Contudo, e como denotado na secção 2.3.3, isto não é o caso para o espaço de cores CIE  $L^*a^*b^*$ , ou para outro atualmente em uso.

Com o propósito de compensar pela falta de uniformidade em CIE  $L^*a^*b^*$ , particularmente no que compete a pequenas diferenças entre cores, como as indicadas na Figura 2.10, a CIE propôs sucessivas melhorias à norma euclidiana, a última das quais é denominada de CIEDE2000, ou  $\Delta E_{00}$ . Esta fórmula é atualmente o padrão recomendado pela CIE e por múltiplas fontes literárias para propósitos de avaliação da distância colorimétrica<sup>[40], [54], [55]</sup>.

A distância  $\Delta E_{00}$  pode ser tomada como uma modificação da  $\Delta E_{ab}$  onde as coordenadas são convertidas para a representação esférica do espaço em questão, o espaço CIE  $L^*C^*h^*$ , e é adicionado<sup>[40], [41], [47], [56]</sup>:

- o termo de rotação ( $R_T$ ) para ajustar diferenças cromáticas na região azul ( $-b^*$ );
- termos associados a cada uma das coordenadas que visam corrigir os efeitos da dependência da luminosidade ( $S_L$ ), croma ( $S_C$ ) e tonalidade ( $S_H$ );

- fatores paramétricos,  $k_L$ ,  $k_C$  e  $k_H$ , para alterar o formato do espaço de cores e compensar pela influência das condições experimentais, como a textura dos objetos fotografados.

Assim, a fórmula  $\Delta E_{00}$  é como indicada pela equação (2.13), cujo desenvolvimento encontra-se descrito no Anexo B<sup>[40]</sup>:

$$\Delta E_{00} = \left( \left( \frac{\Delta L'}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right)^2 + R_T \left( \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \right) \left( \frac{\Delta H'}{k_H S_H} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Os valores dos fatores paramétricos variam com a textura e outras condições experimentais. Como referido, estes alteram o formato do espaço de cores CIE L\*C\*h\*, ao influenciar o comprimento dos eixos L\* e C\*. A representação esférica ilustrada na Figura 2.9 é indicativa do espaço CIE L\*C\*h\* (1:1), ou seja, quando  $k_L = 1$  e  $k_H = k_C = 1$ <sup>[57]</sup>.

Os fatores paramétricos podem assumir o valor de 1 quando a fórmula é aplicada na comparação direta da cor de secções de objetos expostos a determinadas condições de referência, nomeadamente:

- A iluminação deve ser uma fonte de luz que simule a distribuição espectral do iluminante padrão D65;
- A iluminância deve ser de 1000 lx. Esta é dada como a quantidade de luz que incide sobre uma superfície a determinada distância, cuja unidade é o lux (lx);
- O observador deve possuir uma visão a cores normal;
- O plano de fundo deve ser cinzento e uniforme, com  $L^* = 50$ ;
- O ângulo de observação deve ser superior a 4°;
- Os dois objetos devem ter uma separação mínima;
- A diferença entre cores deve ser entre 0 a 5 unidades  $\Delta E_{ab}$ ;
- Os objetos devem ter uma cor homogénea, sem padrões aparentes ou falta de uniformidade.

Para comparação da cor de dois pixéis em imagens digitais, a CIE recomenda que  $k_L = 2$  e  $k_H = k_C = 1$ <sup>[58]</sup>. Isto confere uma forma elipsoidal ao espaço CIE L\*C\*h\*, com um alongamento ao longo do eixo L\*.

Utilizar os valores próprios para imagens digitais permite evitar a aderência às condições de referência apontadas previamente. Contudo, o uso da fórmula  $\Delta E_{00}$  obriga ainda a diversas etapas de conversão entre espaços de cores, para representação das coordenadas no espaço CIE L\*C\*h\*. Atendendo que, para determinados objetivos de análise de diferenças de cores em imagens digitais, como a quantização de cores, pode ser necessário calcular a distância colorimétrica entre milhares a milhões de pixéis, o uso de métricas de distância menos computacionalmente intensivas pode ser benéfico, particularmente em aplicações onde o tempo de execução seja um fator crítico.

Com isto em mente, uma fonte literária comparou 12 métricas de distância colorimétrica, 3 no espaço CIE L\*a\*b\*, uma delas sendo a distância  $\Delta E_{00}$ , e as restantes 9 no espaço R'G'B', com o propósito de concluir sobre qual delas é a mais apropriada para segmentação

de imagens<sup>[59]</sup>. É de notar que, e embora não esteja explicitamente indicado na literatura, assumiu-se que o estudo foi conduzido com recurso à versão não linear do espaço RGB, o espaço R'G'B', uma vez que esta é a mais apropriada, e a mais comumente empregue, para o cálculo da distância colorimétrica, como referido na secção 2.3.1.

Os resultados da literatura indicam que a distância  $\Delta E_{00}$  apresentou o melhor desempenho para 3 das 20 imagens analisadas, atingindo assim a pontuação mais alta. Contudo, esta foi a mesma pontuação que a de 2 métricas baseadas no espaço R'G'B', a Minkowsky 5 e Chebyshev, ambas as quais são variantes da distância Minkowsky.

$$\text{Minkowsky} = (|R'_1 - R'_2|^p + |G'_1 - G'_2|^p + |B'_1 - B'_2|^p)^{\frac{1}{p}} \quad (2.14)$$

A distância Minkowsky 5 é, como o nome indica, a distância Minkowsky para  $p = 5$ :

$$\text{Min5} = (|R'_1 - R'_2|^5 + |G'_1 - G'_2|^5 + |B'_1 - B'_2|^5)^{\frac{1}{5}} \quad (2.15)$$

E a distância Chebyshev é a variante Minkowsky para  $p = \infty$ , o que implica que o valor da distância colorimétrica entre dois pixéis é dado pelo máximo da distância entre as coordenadas R'G'B':

$$\text{Chev} = \text{máx}(|R'_1 - R'_2|; |G'_1 - G'_2|; |B'_1 - B'_2|) \quad (2.16)$$

O estudo referido permite então concluir que a distância  $\Delta E_{00}$ , embora seja a mais indicada para avaliação da distância colorimétrica entre amostras de cor homogéneas, pode não ser a escolha ótima para todas as aplicações que requeiram o cálculo da distância colorimétrica em imagens digitais, como por exemplo a segmentação de imagens ou a quantização de cores<sup>[60]</sup>.

Um artigo publicado em 2010 indica que o limite de percetibilidade pela distância  $\Delta E_{00}$  é de 1,30 unidades, e este foi novamente representado em ordem a uma cor padrão com coordenadas  $L^*a^*b^* = (75, 50, 50)$ <sup>[61]</sup>. Uma vez que a dependência não é tão linear quanto para a distância euclidiana, foram representadas apenas duas cores cuja diferença, em relação ao padrão, é de aproximadamente 1,30 unidades.

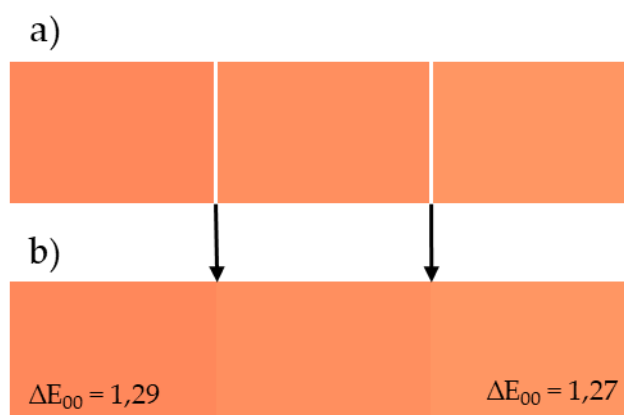


Figura 2.11 - Representação do limite de percetibilidade de aproximadamente 1,30 unidades  $\Delta E_{00}$

Na Figura 2.11, ambas as imagens representam à esquerda das setas divisórias uma cor com coordenadas  $L^*a^*b^* = (72, 49, 48)$ , e à direita uma com coordenadas

$L^*a^*b^* = (78, 52, 52)$ . Como indicado, e ao contrário do verificado para a distância euclidiana na Figura 2.10, o limite de perceptibilidade na métrica  $\Delta E_{00}$  aparenta ser uma melhor indicação de cores visualmente distintas, para o exemplo referido, uma vez que a diferença observável entre tons permite uma separação entre o padrão e as cores da esquerda e direita. É de notar ainda que esta separação é mais distinta quando as cores estão agrupadas, na imagem b), dado que é possível distinguir a diferença de tonalidades na fronteira entre cores.

## 2.5. Estratégias de quantização

Como referido na secção 2.2, uma imagem digital pode conter milhões de pixéis e milhares a milhões de cores distintas, uma vez que cada pixel pode representar qualquer uma das  $2^{24}$  cores disponíveis, isto quando a *bit depth* é de 8 bits por canal. É aqui que se nota a importância das estratégias de quantização, cujo objetivo é a redução das  $M$  cores de uma imagem até um determinado número de  $K$  cores representativas, que constituem o que é chamado de uma paleta de cores<sup>[62]</sup>.

Uma estratégia de quantização de alta qualidade seria uma onde a paleta resultante permite a reprodução da imagem digital com o mínimo de distorção visual. Este foi um tema de particular importância nos anos 70 e 80, devido à limitação dos dispositivos de reprodução de imagens, que, geralmente, suportavam até 8 bits para a reprodução de cores, para um total de  $2^8 = 256$  cores diferentes<sup>[63]</sup>.

Atualmente, estratégias de quantização são utilizadas para a compressão de imagens em GIFs (*Graphics Interchange Format*) ou PNGs (*Portable Network Graphics*), que utilizam igualmente 8 bits para a reprodução de cores, o que permite reduzir o espaço ocupado pelas imagens em memória. Outras aplicações de quantização em imagens digitais incluem segmentação, identificação e localização de texto e análise da textura de cores<sup>[64]-[66]</sup>.

As estratégias de quantização de cores baseiam-se no processamento dos dados, os valores de pixéis, que representam a imagem em memória e, portanto, operam com valores no espaço  $R'G'B'$  (ver Figura 2.5)<sup>[20]</sup>. Estas incorrem, geralmente, sobre dois passos, a construção de uma paleta com  $K$  cores e a substituição de cada pixel pela sua respetiva cor representativa, no processo chamado de *pixel mapping*, do qual resulta a imagem reduzida a  $K$  cores<sup>[67]</sup>.

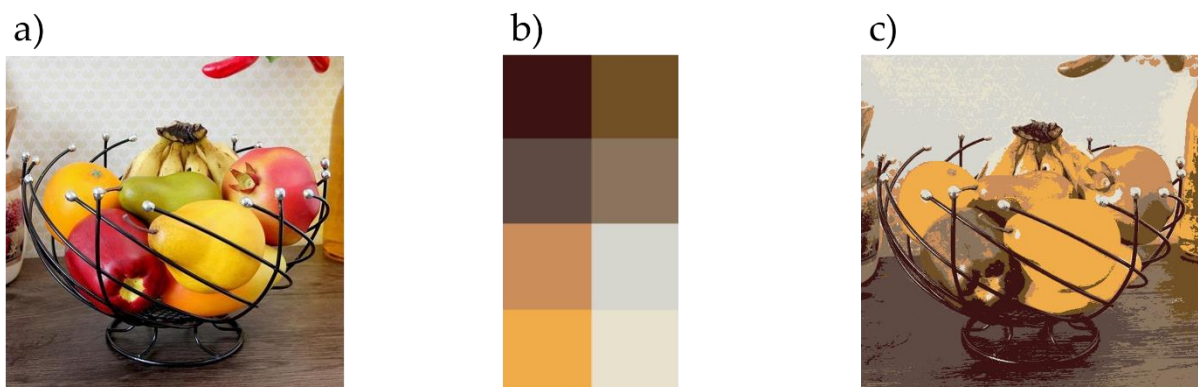


Figura 2.12 - Quantização de uma imagem em 8 cores, onde: a) representa a imagem original, b) a paleta de 8 cores e c) a imagem reduzida às 8 cores da paleta

A imagem a), indicada na Figura 2.12, foi a imagem padrão utilizada para exemplificar os resultados das diferentes estratégias de quantização discutidas na presente secção. Esta apresenta uma resolução de  $569 \times 567 = 322\,623$  pixels, e um total de 109 877 cores distintas. Todas as estratégias foram programadas em LabVIEW, de acordo com os princípios básicos de funcionamento de cada, descritos nas respetivas fontes literárias.

Determinadas estratégias de quantização, como a de Quantização Uniforme (secção 2.5.1), permitem a associação direta de cada pixel a uma cor representativa e, portanto, facilitam o passo de *pixel mapping*<sup>[68]</sup>.

Quando os pixels não podem ser diretamente associados, a reprodução da imagem original é realizada por meio de uma operação denominada de *Inverse Colormap*, onde cada pixel é agrupado à cor representativa que permita a menor distância colorimétrica, de acordo com determinada métrica de distância<sup>[62]</sup>. Para propósitos de representação dos resultados das diferentes estratégias de quantização optou-se pelo uso da métrica de distância Minkowsky 5 que, como indicado na secção 2.4, apresenta um desempenho comparável à  $\Delta E_{00}$  no que compete a segmentação de imagens. Ao manter o espaço de cores R'G'B', e utilizar a métrica referida, evita-se os passos extensivos envolvidos no cálculo da  $\Delta E_{00}$ , o que reduz o tempo de execução das estratégias empregues.

O número de cores representativas é estabelecido pelo utilizador e tem um impacto direto na qualidade da imagem resultante em termos de proximidade visual à imagem original, como ilustrado na Figura 2.13.

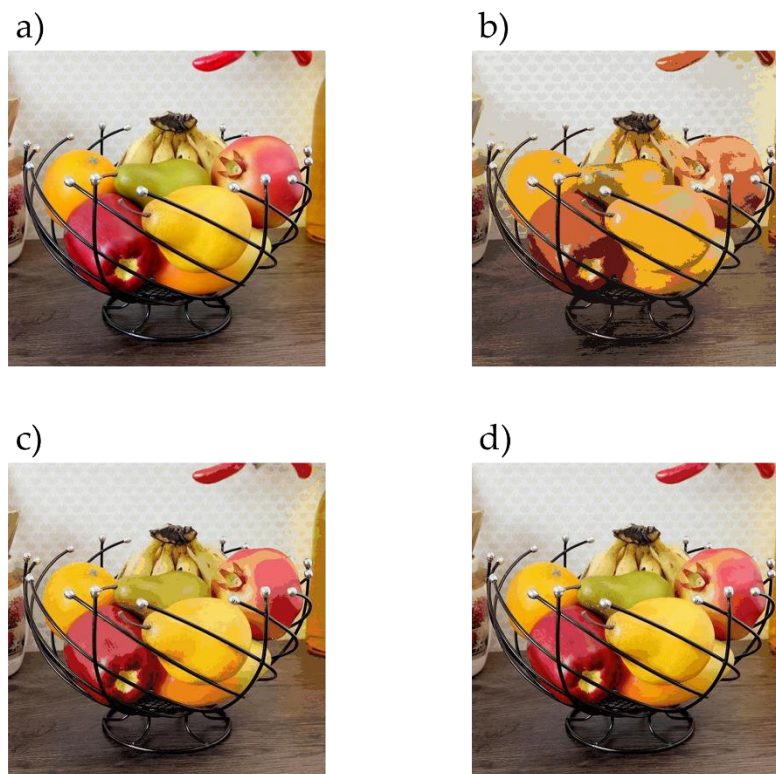


Figura 2.13 – Diferença na acuidade visual para uma imagem processada, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem reduzida a 16 cores, c) a imagem reduzida a 64 cores e d) a imagem reduzida a 256 cores

No que diz respeito à criação da paleta de cores, as estratégias de quantização podem ser divididas em duas categorias, indicadas na Tabela 2.2<sup>[62]</sup>:

Tabela 2.2 - Funcionamento, vantagens e desvantagens das diferentes categorias de estratégias de quantização

Categoria	Funcionamento	Vantagens	Desvantagens
<b>Independentes da imagem</b>	É estabelecida uma paleta de cores universal e independente das características da imagem.	Simples de implementar; Execução mais rápida.	Distorção visual da imagem resultante, devido à paleta de cores independente.
<b>Dependentes da imagem</b>	A paleta é construída de acordo com a distribuição de cores na imagem.	Maior qualidade visual na imagem resultante.	Difíceis de implementar e computacionalmente intensivas.

Devido à fraca qualidade visual das imagens resultantes de métodos independentes, a maior parte do desenvolvimento na literatura tem sido direcionado para a melhoria da eficiência computacional e qualidade visual dos métodos dependentes da imagem<sup>[67]</sup>.

Em termos do seu funcionamento, as estratégias de quantização podem ser agrupadas em duas famílias, as estratégias *pré-clustering*, onde o conjunto de cores representativas é criado apenas uma vez, e as estratégias *pós-clustering*, onde é criado um conjunto inicial de cores representativas, que é melhorado iterativamente<sup>[62]</sup>.

Para os objetivos propostos para este trabalho, e atendendo à variabilidade da cor das rolhas, considerou-se que estratégias do tipo independente da imagem não seriam apropriadas, e como tal foram programadas e implementadas 6 estratégias dependentes da imagem, indicadas na Tabela 2.3 de acordo com a família a que pertencem.

Tabela 2.3 - Estratégias implementadas e família a que pertencem

Família	<i>Pré-clustering</i>	<i>Pós-clustering</i>
<b>Estratégias (secção)</b>	Quantização Uniforme (2.5.1) Popularidade (2.5.2) Median Cut (2.5.3) MinMax (2.5.4) Moda do histograma (2.5.6)	K-Means (2.5.5)

### 2.5.1. Quantização Uniforme

Na estratégia da Quantização Uniforme, cada canal no espaço de cores R'G'B' é dividido em subcanais igualmente espaçados, denominados de regiões.

As coordenadas R'G'B' são agrupadas à região a que pertencem, e o valor representativo de cada é dado como a média de todos os valores presentes na região em questão. Posteriormente, as coordenadas iniciais são substituídas pelas novas médias. Na implementação desta estratégia, optou-se por dividir os 3 canais num número equivalente de regiões<sup>[68]</sup>.

Uma vez que as cores finais da paleta resultam da combinação das diferentes médias de cada região, a estratégia da Quantização Uniforme permite a formação de uma paleta com um máximo de  $n^3$  cores, com  $n > 1$  e onde  $n$  é o número de regiões. A Figura 2.14 serve como um esquema simplificado do funcionamento desta na quantização de 3 pixéis, onde cada coordenada no espaço R'G'B' foi dividida em 2 regiões, 0 - 127 e 128 - 255, o que permitiria um máximo de  $2^3 = 8$  cores.

Pré-quantização	Agrupamento em regiões		Média das regiões		Pós-quantização
Pixel 1 - (203, 197, 51)	0 - 127	128 - 255	0 - 127	128 - 255	Pixel 1 - (204, 198, 34)
Pixel 2 - (205, 42, 30)	120	203 205	120	204	Pixel 2 - (204, 42, 34)
Pixel 3 - (120, 199, 21)	42	197 199	42	198	Pixel 3 - (120, 198, 34)
	51 30 21		34		

Figura 2.14 - Esquema representativo da estratégia da Quantização Uniforme

O exemplo simples permite identificar dois problemas que são o motivo pelo qual a estratégia da Quantização Uniforme, com a divisão do espaço de cores em regiões igualmente espaçadas e sem tomar em conta a distribuição de pixéis, permite um máximo de  $n^3$  cores mas não garante a quantização em  $n^3$  cores.

Primeiramente, no exemplo ilustrado, a região 128 - 255 para a coordenada azul, B', não tem valores atribuídos e, portanto, a paleta de cores formada com os valores médios de cada região só permite representar um máximo de  $2^2 = 4$  cores distintas, ao invés de 8, cujas coordenadas resultam da combinação das diferentes médias, sendo, portanto, (120, 42, 34), (120, 198, 34), (204, 42, 34) e (204, 198, 34). No entanto, a formação de regiões que não têm valores atribuídos é improvável, devido ao elevado número de pixéis presentes numa imagem, sendo que geralmente estas só ocorrem quando há necessidade de um elevado número de cores representativas, ou seja, quando cada canal é dividido em múltiplas regiões, o que leva a regiões com intervalos mais pequenos.

O problema principal resulta, portanto, da variedade dos pixels. Para o exemplo estabelecido na Figura 2.14 nota-se que, no conjunto inicial de 3 pixels (o conjunto Pré-quantização), não há nenhum cujas coordenadas pertençam exclusivamente à região 0 - 127 para todos os canais, ou seja, a cor (120, 42, 34), apesar de poder existir e estar presente na paleta de cores, não é associada a nenhum pixel (não está presente no conjunto Pós-quantização).

A existência de cores na paleta que não são atribuídas a pixels existentes na imagem é o principal motivo pelo qual não há garantia de um número consistente de cores representativas. Para ilustrar este efeito, a Figura 2.15 exemplifica a quantização em 8 cores da face de uma rolha por meio da estratégia da Quantização Uniforme, em conjunto com os resultados devolvidos pelo LabVIEW.

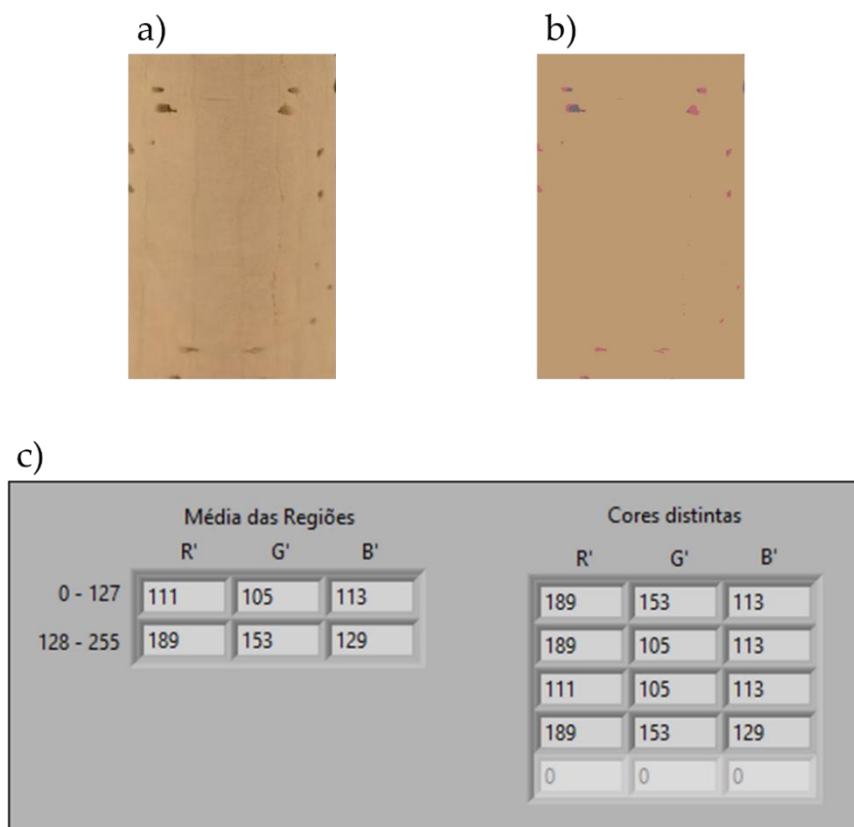


Figura 2.15 - Quantização da face de uma rolha pela estratégia da Quantização Uniforme, onde:  
a) representa a face da rolha, b) a face reduzida a 4 cores (com quantização em 8 cores) e  
c) os resultados devolvidos pelo LabVIEW

A imagem c) da Figura 2.15 indica que todas as regiões estão preenchidas com as respectivas médias. No entanto, a imagem reconstruída, a imagem b), é composta por apenas 4 cores distintas, ao invés das 8 possíveis. Isto confirma a existência de elementos da paleta de cores que não estão associados a pixels na imagem, e expõe o problema principal da estratégia da Quantização Uniforme. É ainda importante notar que, para a imagem a), só são formadas regiões vazias quando se pretende a quantização em 64 cores, ou seja, quando cada canal é dividido em 4 regiões (0 - 63, 64 - 127, 128 - 191 e 192 - 255).

A Figura 2.16 reforça a falha apontada na estratégia proposta, ao indicar o número de cores final da imagem reconstruída e o número de cores pretendido.

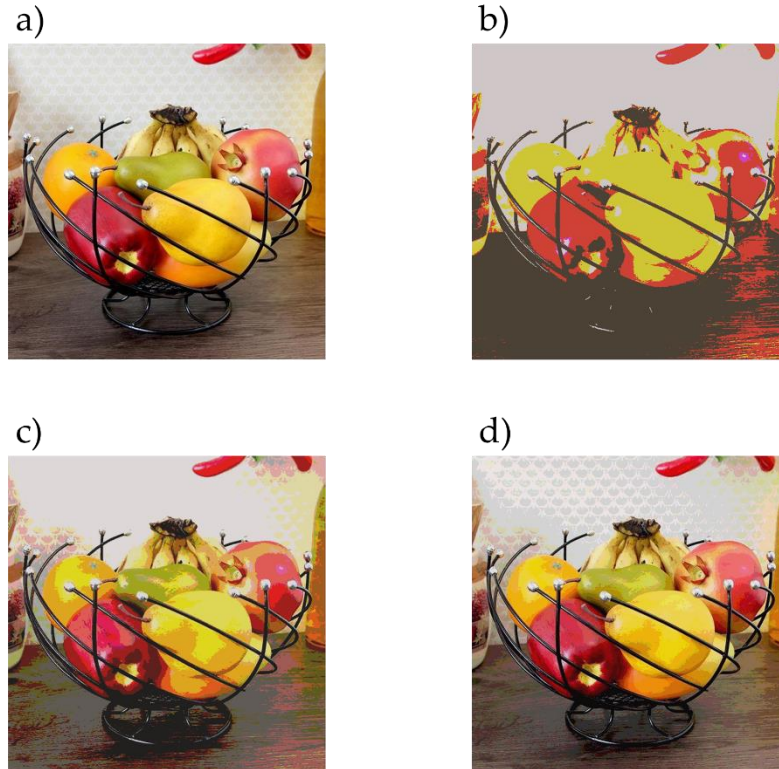


Figura 2.16 - Resultados da quantização pela estratégia de Quantização Uniforme, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem reduzida a 8 cores (com quantização em 8 cores), c) a imagem reduzida a 38 cores (com quantização em 64 cores) e d) a imagem reduzida a 192 cores (com quantização em 512 cores)

## 2.5.2. Popularidade

A estratégia da Popularidade trata de construir um histograma de cores e escolher como cores representativas as N cores mais comuns<sup>[62]</sup>.

Esta foi inicialmente desenvolvida em 1978 por Tom Boyle e Andy Lippman, e na versão original os autores sugerem um passo de pré-quantização, denominado de *bit-cutting*, onde o número de bits usado, por canal, é reduzido de 8 para 5 bits, o que permite que cada cor ocupe  $5 \times 3 = 15$  bits em memória, ou seja, menos de 2 bytes (16 bits) ao invés dos 3 bytes iniciais. Para além de reduzir o espaço necessário e aumentar a velocidade de computação, a redução do número de bits serve efetivamente para reduzir o número de cores na imagem e aumentar a frequência de ocorrência de cada cor, facilitando assim a construção do histograma de cores<sup>[69]</sup>.

Contudo, o processo de *bit-cutting* provoca também a distorção visual da imagem, uma vez que uma cor codificada em 15 bits apresenta-se visualmente distinta de uma codificada em 24 bits<sup>[70]</sup>. Atendendo à necessidade de preservação e posterior representação das cores de forma mais exata possível, optou-se por não realizar este passo de pré quantização.

Sendo assim, a Figura 2.17 representa a quantização de uma imagem de acordo com a estratégia da Popularidade.



Figura 2.17 - Resultados da quantização pela estratégia da Popularidade, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem reduzida a 8 cores, c) a imagem reduzida a 500 cores e d) a imagem reduzida a 1000 cores

A Figura 2.17 denota um problema na estratégia proposta, isto porque a mesma não devolve uma reprodução adequada quando na presença de múltiplas cores, uma vez que as cores mais abundantes podem não ser variadas o suficiente para permitir a reprodução da imagem original com algum grau de fidelidade, até para um elevado número de cores representativas<sup>[62]</sup>. As cores mais frequentes da imagem a) na Figura 2.17 são diferentes tons de cinzento, logo estes tomam precedência sobre outras cores quando a imagem é reduzida a apenas 8 cores (imagem b)). É apenas na quantização em 500 cores e 1000 cores representativas, imagens c) e d), respetivamente, que começam a notar-se os primeiros tons de castanho, preto e, posteriormente, amarelo.

### 2.5.3. Median Cut

A estratégia Median Cut foi desenvolvida em 1979 por Paul Heckbert como uma alternativa à estratégia da Popularidade, referida na secção 2.5.2, e mantém-se como o método mais utilizado no processo de quantização de imagens para a criação de GIFs devido à sua eficiência computacional<sup>[70], [71]</sup>.

Na Median Cut, os pixéis são agrupados numa região, e cada um dos canais R'G'B' é analisado quanto à sua amplitude. O canal que tiver a maior diferença entre valor máximo e mínimo é tido como o canal dominante, e os pixéis são ordenados de acordo com os valores deste canal, do menor ao maior<sup>[69]</sup>. Para exemplificar, se o canal dominante for o canal G', então um pixel R'G'B' com coordenadas (80, 22, 86) é maior do que um com coordenadas (105, 8, 212), dado que  $22 > 8$ , e, portanto, a ordem dos pixéis seria (105, 8, 212)  $\rightarrow$  (80, 22, 86).

Após ser ordenada, a região é dividida pelo ponto médio do canal dominante, para garantir a criação de 2 novas regiões. O processo ocorre iterativamente, até o número de regiões formado ser igual ao número pretendido de cores representativas. As cores representativas são obtidas pela média das coordenadas de cada pixel presente na respetiva região<sup>[69]</sup>. Uma vez que cada região é dividida em duas, a paleta de cores formada terá sempre  $2^N$  cores, onde N é o número de iterações.

A Figura 2.18 serve como uma representação simplificada da estratégia Median Cut. Esta exemplifica os passos principais descritos acima, desde a ordenação dos pixéis de acordo com o canal de maior amplitude (passo 1), até à divisão em regiões pelo ponto médio do canal dominante (passo 2) e terminando na criação de pixéis pela média dos valores pertencentes a cada canal da região (passo 3). Os passos 1 e 2 são repetidos 2 vezes (2 iterações) e, portanto, resultam  $2^2 = 4$  cores representativas.

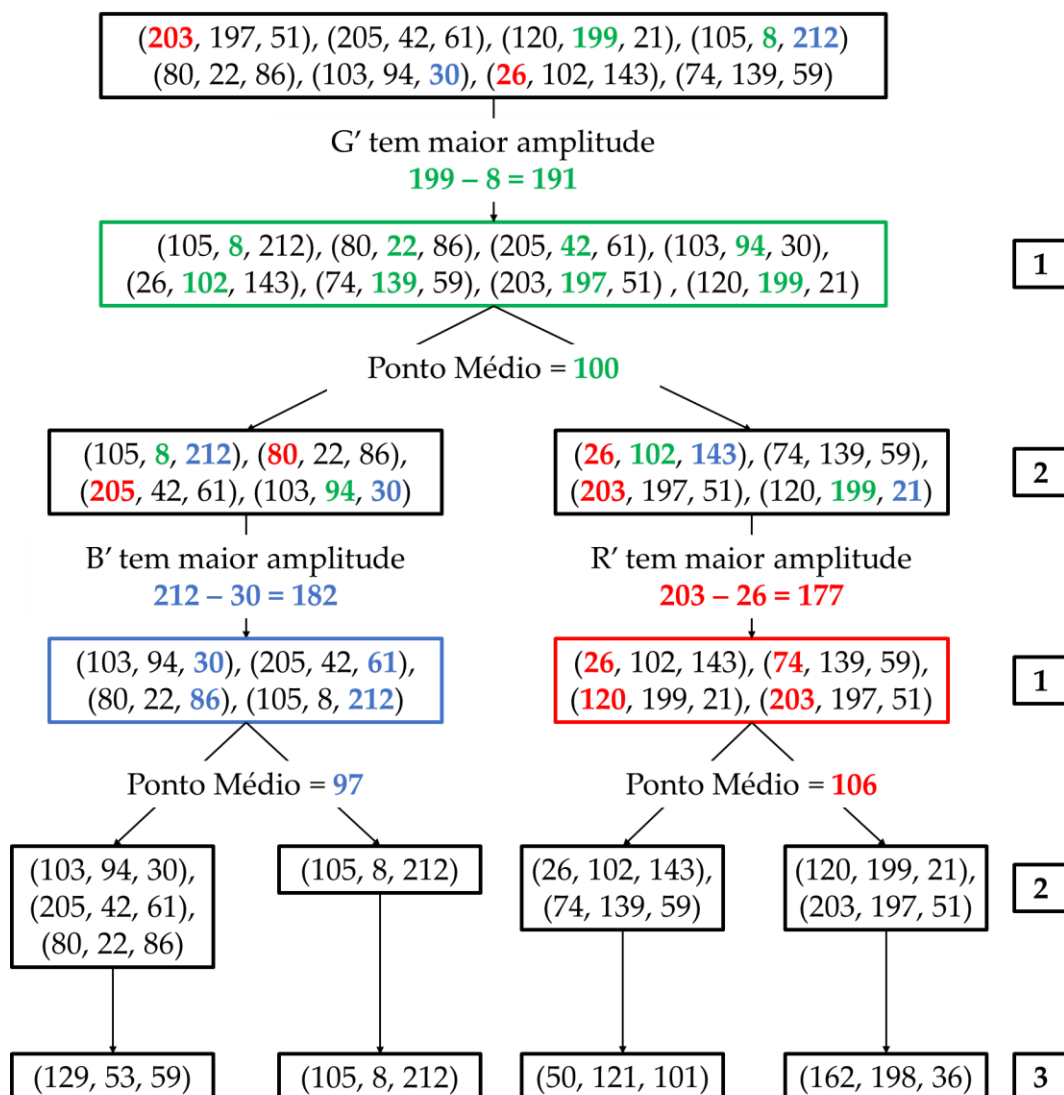


Figura 2.18 - Esquema representativo da estratégia Median Cut

A estratégia Median Cut foi a utilizada na Figura 2.12 e Figura 2.13, da secção 2.5, para exemplificar os resultados de uma estratégia de quantização de cores.

## 2.5.4. MinMax

Na estratégia MinMax, inicialmente todas as cores numa imagem são agrupadas no mesmo conjunto, ou *cluster*, e a cor representativa é escolhida aleatoriamente de entre as disponíveis. Um novo *cluster* é criado para cada uma das K-1 iterações, onde K é o número de cores representativas pretendido, e a cor que estiver mais longe da sua cor representativa inicial é tida como o centroide, ou cor representativa, do novo *cluster* formado na iteração<sup>[72]</sup>. Se houver quaisquer duas cores que estejam à mesma distância máxima da sua cor representativa, uma destas será escolhida aleatoriamente como o centroide do novo *cluster*<sup>[70]</sup>. As cores representativas finais na paleta de cores seriam, portanto, os centroides dos diferentes *clusters* formados.

Dado que a estratégia trata apenas de estabelecer centroides como cores representativas dos *clusters*, a frequência de ocorrência de cada cor é inconsequente para a execução do algoritmo, uma vez que duas cores idênticas teriam a mesma distância ao seu respetivo centroide. Assim, é possível processar apenas os pixéis que representam cores distintas, e não todos os que definem a imagem.

De acordo com uma melhoria proposta para o algoritmo, a distância entre cores é dada pela equação (2.17), que modifica a importância de cada canal R'G'B' em termos da sua contribuição relativa para a luminosidade, o que permite compensar parcialmente a falta de uniformidade do espaço de cores, melhorando os resultados da quantização. Sendo assim, a distância de cor entre dois pixéis, a e b, é dada por<sup>[70], [72]</sup>:

$$d(a, b) = \sqrt{\left(0,5 * (R'(a) - R'(b))\right)^2 + (G'(a) - G'(b))^2 + \left(0,25 * (B'(a) - B'(b))\right)^2} \quad (2.17)$$

A Figura 2.19 serve como uma representação do processo de criação de centroides e dos respetivos *clusters* com base na estratégia MinMax, tendo início com a escolha aleatória do ponto 7 como o centroide inicial. Para o exemplo, o novo centroide estabelecido em cada iteração foi dado como o que apresenta a maior diferença, em módulo, ao centroide do seu respetivo *cluster*. Foram realizadas 3 iterações e, portanto, resultam 3+1 = 4 *clusters* e centroides (4 cores representativas).

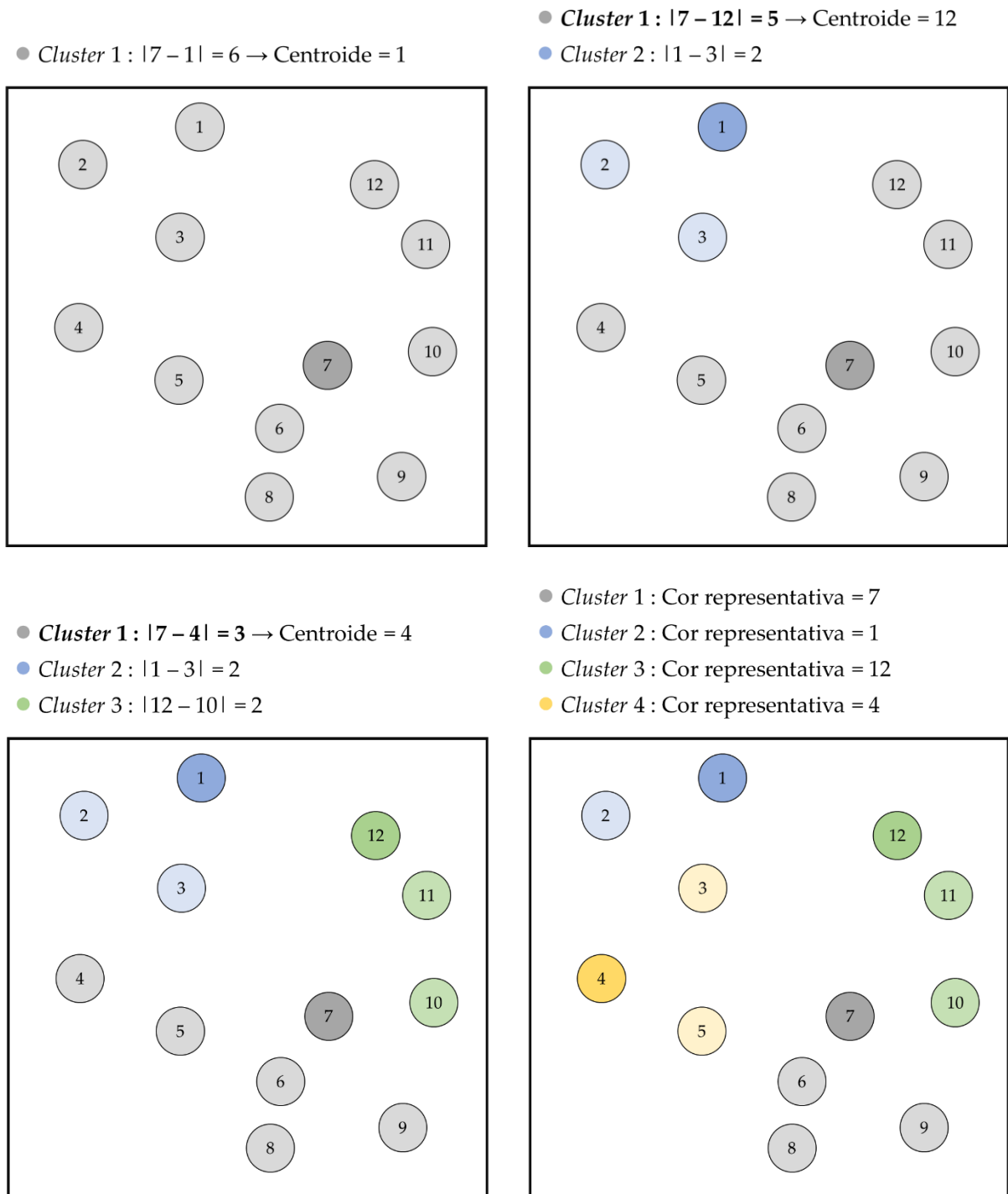


Figura 2.19 - Esquema representativo da estratégia MinMax

Como pode ser deduzido, a distribuição final de *clusters* e centroides na Figura 2.19 dependeu da escolha do ponto 7 como o centroide inicial. Isto estende-se também para a quantização de imagens com a estratégia MinMax, no sentido em que se a paleta de cores formada é dependente do centroide inicial, e o centroide inicial é escolhido aleatoriamente, então o aspeto visual da imagem resultante varia em diferentes execuções da estratégia, para um mesmo número de cores representativas, como indicado na Figura 2.20.



Figura 2.20 – Diferentes casos para a quantização da mesma imagem em 8 cores segundo a estratégia MinMax, onde: a) representa a imagem original, b) a paleta de 8 cores para o caso 1, c) a imagem reduzida a 8 cores para o caso 1, d) a paleta de 8 cores para o caso 2 e e) a imagem reduzida a 8 cores para o caso 2

Uma abordagem alternativa para a implementação da estratégia MinMax consiste em estabelecer como o centroide inicial a cor que seja mais frequente na imagem<sup>[62]</sup>. Isto implica a construção do histograma de cores da imagem, no entanto permite evitar a variabilidade da estratégia apresentada, dado que o ponto de partida seria sempre o mesmo e, portanto, obter-se-ia a mesma paleta de cores final.

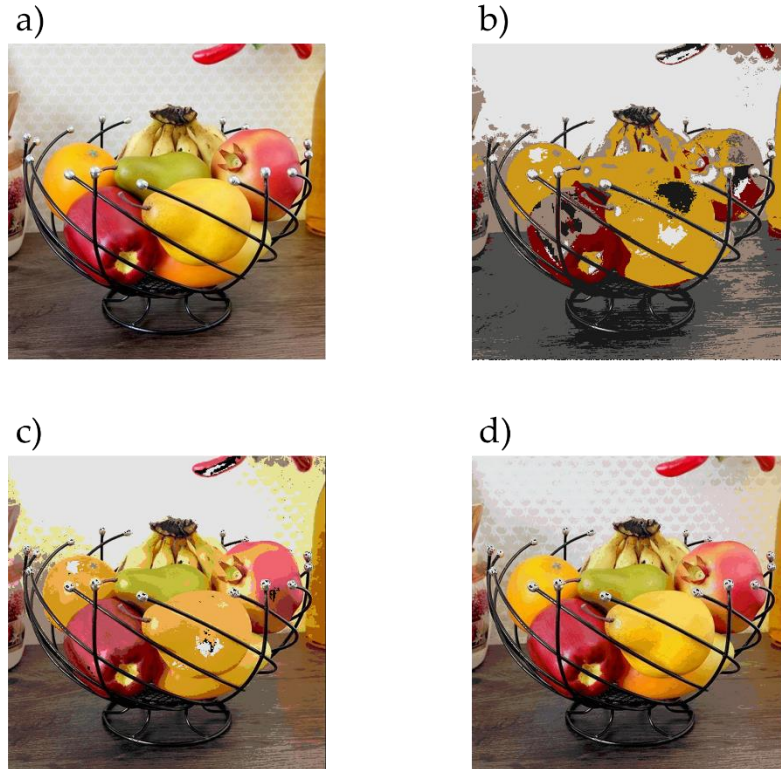


Figura 2.21 - Resultados da quantização pela estratégia MinMax, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem reduzida a 16 cores, c) a imagem reduzida a 64 cores e d) a imagem reduzida a 256 cores

### 2.5.5. K-Means

Como indicado pela Tabela 2.3, a estratégia K-Means é a única do tipo pós-*clustering*. Nesta, para um determinado número pretendido de K cores representativas, é escolhido aleatoriamente um conjunto inicial de K centroides e cada pixel é associado ao seu centroide mais próximo, com base numa dada métrica de distância, formando então um *cluster*. Os novos centroides resultam da média de todos os pixels que pertencem aos respetivos *clusters*, e os pixels são novamente associados ao centroide mais próximo<sup>[73]</sup>.

Os dois últimos passos, de criação dos centroides pela média dos pixels no *cluster* e de associação de cada pixel ao seu centroide mais próximo, ocorrem iterativamente até o valor dos centroides manter-se inalterado entre iterações, altura em que é atingida a solução mínima local<sup>[74]</sup>. Contudo, embora a estratégia permita obter uma solução ótima para determinadas condições iniciais, os algoritmos do tipo pós-*clustering* incorrem sobre dois problemas principais.

Primeiramente, dado que não há um número definido de iterações, o algoritmo pode tornar-se computacionalmente intensivo. No caso particular da estratégia K-Means, o número de iterações necessário depende da distribuição de cores da imagem, do número pretendido de cores representativas, do tamanho do espaço de cores e da escolha dos centroides iniciais<sup>[74]</sup>. Tendo isto em conta, optou-se pela implementação de uma condição de convergência alternativa.

A literatura indica que é na primeira iteração que ocorre a mudança mais drástica em termos da diferença entre os centroides iniciais e finais, e que em iterações seguintes a diferença tende a diminuir à medida que o algoritmo converge<sup>[75]</sup>. De forma a tomar proveito desta característica, a nova condição de convergência é estabelecida como um limiar definido como 5% da maior deslocação de centroides na primeira iteração ( $D_{max}$ ), onde a deslocação de centroides é medida como a distância Minkowsky 5 entre as coordenadas de cor dos centroides iniciais e finais dos diversos *clusters*. Segundo a literatura, este limiar permite reduzir o tempo de execução do algoritmo em até 87,1%, sem perda significativa de qualidade<sup>[75]</sup>.

Tem-se então que, para um determinado número de  $K$  *clusters*, o algoritmo converge quando  $D \leq 0,05 D_{max}$ , onde  $D$  é a deslocação de centroides observada na respectiva iteração:

$$D = \max_{1 \leq k \leq K} |\text{Centroide}_{inicial}(k) - \text{Centroide}_{final}(k)| \quad (2.18)$$

Como exemplo tem-se a Figura 2.22, que representa a quantização da imagem a) em 50 cores, ou seja, os pixels da imagem foram repartidos em 50 *clusters*, sem e com a implementação da condição de convergência. Os resultados do processamento da imagem encontram-se representados na Tabela 2.4.

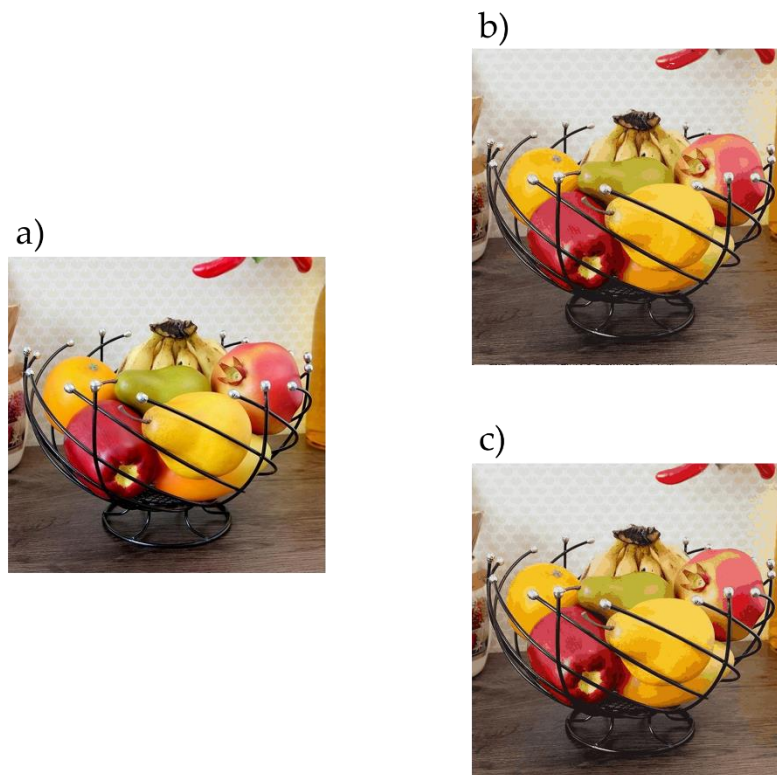


Figura 2.22 – Resultado da quantização pela estratégia K-Means sem e com a condição de convergência alternativa, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem reduzida a 50 cores pelo algoritmo padrão e c) a imagem reduzida a 50 cores com a condição de convergência alternativa

Tabela 2.4 - Resultados da estratégia K-Means sem e com condição de convergência alternativa

Condição de convergência	Nº de iterações	Tempo
<b>Padrão</b>	130	11 min e 54 s
<b>Alternativa</b>	29	2 min e 39 s

Como indicado pela Tabela 2.4, para o algoritmo convergir naturalmente foram necessárias 130 iterações. Uma vez que, e como referido, a imagem original, imagem a), contém 322 623 píxéis, então a distância colorimétrica foi calculada  $50 \times 130 \times 322\ 623 = 2\ 097\ 049\ 500$  vezes, ou 2 097 milhões de vezes, de modo a permitir a criação dos diversos *clusters* ao longo das sucessivas iterações. Consequentemente, a quantização em 50 cores demorou 11 minutos e 54 segundos.

Por outro lado, quando a condição de convergência alternativa é implementada, são necessárias apenas 29 iterações e, como tal, a quantização em 50 cores é 77,8% mais rápida do que no estado original da estratégia K-Means, atingindo, portanto, uma economia de tempo relativamente próxima dos 87,1% indicados na literatura.

Uma análise visual das imagens resultantes, na Figura 2.22, permite também corroborar que não há perda significativa de qualidade. Apesar da imagem b) ser, talvez, uma representação mais fidedigna da imagem original, a diferença de qualidade entre esta e a imagem c) não é evidente o suficiente para invalidar o uso da condição de convergência alternativa.

Contudo, mesmo quando esta condição é considerada, a estratégia K-Means prova-se significativamente mais lenta do que qualquer outra estratégia implementada, particularmente quando são processadas imagens de maior resolução ou, como neste caso, quando se pretende um elevado número de cores representativas, uma vez que a distância colorimétrica entre cada pixel e cada centroide tem de ser calculada uma vez a cada iteração. Em termos comparativos, a estratégia Median Cut, da secção 2.5.3, demora apenas 16 segundos para construir a imagem d) da Figura 2.13, que representa a quantização da mesma imagem original em 256 cores, ao invés de 50.

O segundo problema associado à estratégia K-Means está relacionado com a escolha aleatória dos centroides iniciais e com a natureza iterativa do processo. Como demonstrado na Figura 2.19 e Figura 2.20 do algoritmo MinMax, quando os centroides são escolhidos aleatoriamente a quantização da mesma imagem num mesmo número de cores resulta em diferentes conjuntos de cores representativas para cada execução da estratégia. A estratégia K-Means sofre do mesmo problema, e devido à sua natureza, esta converge para o mínimo local que esteja mais próximo da seleção inicial, ou seja, a paleta de cores final está dependente da escolha inicial de centroides<sup>[62]</sup>.

Os dois casos para a quantização da imagem a) na Figura 2.23 ilustram o problema referido, ao representarem claramente resultados de quantização díspares, uma vez que as paletas de cor iniciais, imagens b) e e), são formadas por cores diferentes e, portanto, as paletas de cor finais são também formadas por cores diferentes, resultando então em duas imagens distintas, imagens d) e g).

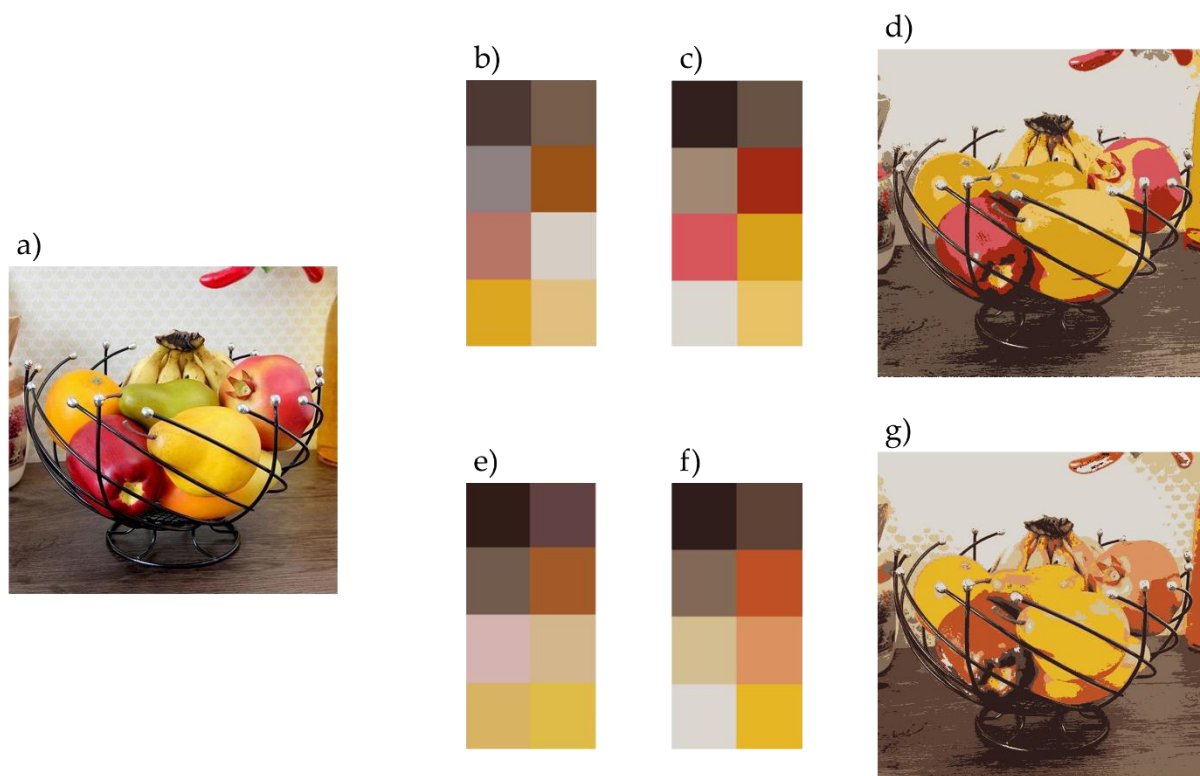


Figura 2.23 - Diferentes casos para a quantização da mesma imagem em 8 cores segundo a estratégia K-Means, onde: a) representa a imagem original, b) a paleta inicial de 8 cores para o caso 1, c) a paleta final de 8 cores para o caso 1, d) a imagem reduzida a 8 cores para o caso 1, e) a paleta inicial de 8 cores para o caso 2, f) a paleta final de 8 cores para o caso 2 e g) a imagem reduzida a 8 cores para o caso 2

Isto demonstra, portanto, que a estratégia K-Means não é apropriada para aplicações onde a repetibilidade dos resultados seja de particular importância. Potenciais soluções para este problema podem ser, por exemplo, utilizar sempre a mesma posição  $(x, y)$  de pixels para escolha inicial dos centroides, independentemente da imagem analisada, ou então tomar uma abordagem semelhante à da estratégia MinMax, onde os  $N$  centroides iniciais são escolhidos como os  $N$  pixels mais comuns da imagem. Uma vez que, e como demonstrado, esta estratégia é consideravelmente mais lenta do que as outras estratégias implementadas, optou-se pela primeira opção, de usar sempre a mesma posição  $(x, y)$  para escolha inicial dos centroides, de modo a evitar a construção do histograma de cores da imagem. Isto permite solucionar o problema da repetibilidade sem acrescentar ao tempo total de execução do algoritmo.

## 2.5.6. Moda do Histograma

A estratégia da Moda do Histograma difere das apresentadas anteriormente no sentido em que resulta numa paleta de cores com uma única cor. Nesta, é construído um histograma para cada um dos canais R'G'B' e as coordenadas representativas de cada canal são tidas como aquelas que representam o maior número de pixéis, ou seja, a moda de cada um dos três histogramas.

Dado que só há uma cor na paleta, resultante da combinação das três coordenadas representativas, esta não possui variedade suficiente para permitir a reprodução de uma imagem com múltiplas cores distintas. No entanto, se o intuito for a obtenção de uma única cor a partir de um conjunto de cores semelhantes, como no caso deste trabalho, então a estratégia da Moda do Histograma permite alcançar o objetivo proposto de forma expedita e fácil de entender.

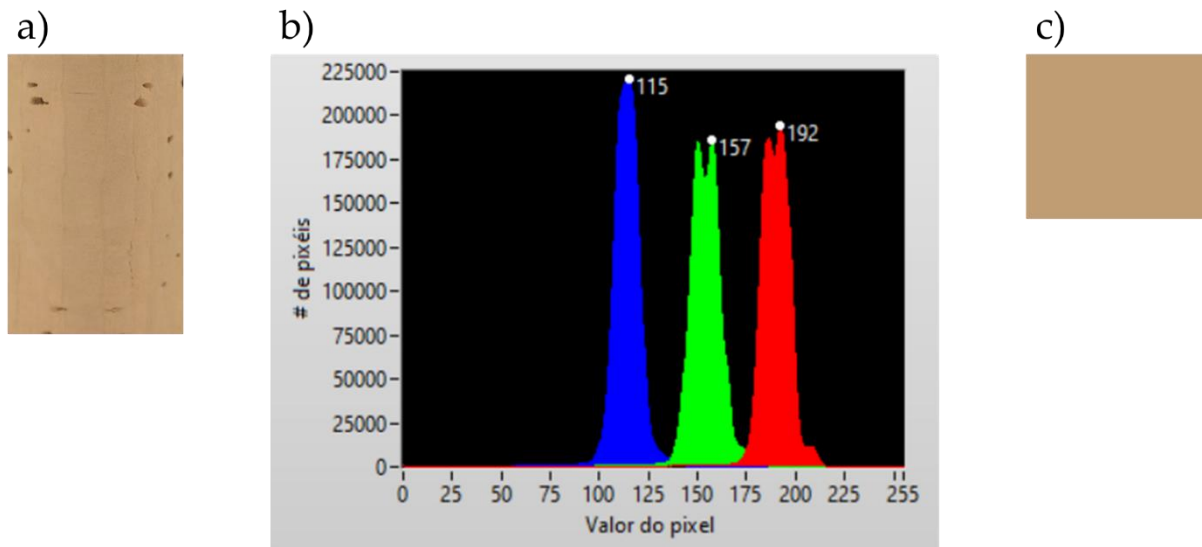


Figura 2.24 – Quantização da face de uma rolha pela estratégia da Moda do Histograma, onde: a) representa a face da rolha, b) o histograma construído com os valores das coordenadas R' (vermelho), G' (verde) e B' (azul) e c) a cor resultante da quantização

Tem-se então que a imagem c) da Figura 2.24 representa uma cor formada pelas coordenadas da moda de cada um dos picos,  $R'G'B' = (192, 157, 115)$ , que seria então tomada como a cor representativa da imagem a).

### 3.1. Captura de imagens, hardware e software

Devido à natureza do objetivo exposto para este trabalho é importante garantir que a captura de imagens é realizada sobre condições que permitam evitar a ocorrência de metamerismo de observador, referido na secção 2.1, e que assegurem exatidão e precisão na caracterização da cor das rolhas. É também necessária a conformação com os padrões impostos pela CIE no que diz respeito às coordenadas de ponto branco utilizadas na transformação para o espaço CIE  $L^*a^*b^*$ , que estão dependentes da fonte de iluminação e do ângulo de captura.

As faces e topos das rolhas foram fotografadas em suportes próprios, modelados em 3D com recurso ao software Rhinoceros®, versão 7 SR7, e impressos com filamento de ácido polilático (PLA) de cor preta. Ambos os suportes têm um desnível de 1°, para corresponderem a especificações impostas.

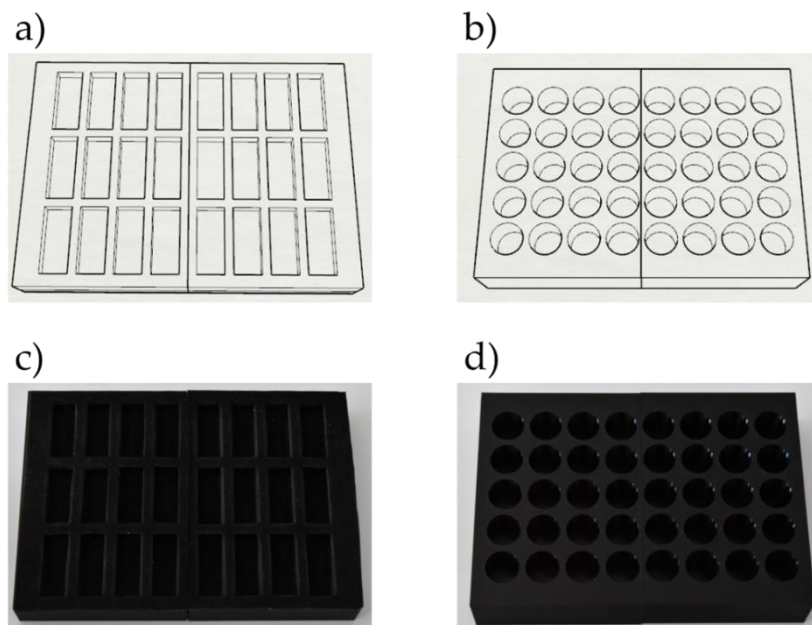


Figura 3.1 - Modelos renderizados e suportes impressos para as rolhas, onde: a) representa o modelo renderizado do suporte para as faces, b) o modelo renderizado do suporte para os topos, c) o suporte impresso para as faces e d) o suporte impresso para os topos

Como demonstrado na Figura 3.1, os suportes para as faces e topos acomodam 24 e 40 rolhas por fotografia, respectivamente. Um equilíbrio entre o número de rolhas fotografadas e a qualidade geral da caracterização da cor teve de ser considerado, uma vez que quantas mais rolhas maior a distância necessária entre a máquina e os suportes, o que implica que cada rolha contém menos pixels que definam a sua cor. Os suportes estão colocados a uma distância de cerca de 28 cm da máquina fotográfica, no interior da cabine de luz.

A máquina fotográfica utilizada é uma Nikon D3500, de resolução 24,78 MP, com objetiva AF-P DX NIKKOR 18-55 mm VR. Novamente, recorreu-se ao software Rhinoceros® para modelar uma estrutura que permita acomodar a construção deste modelo de câmaras em particular, e que inclui uma abertura lateral para facilitar a focagem manual.

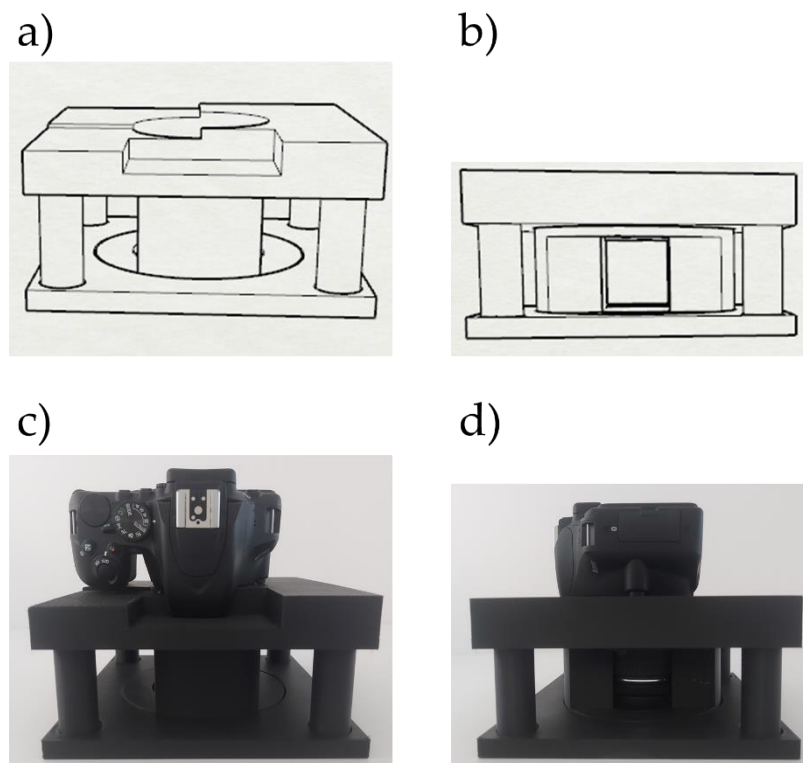


Figura 3.2 - Modelo renderizado e suporte impresso para a máquina fotográfica, onde: a) representa a vista frontal do modelo renderizado, b) a vista lateral do modelo renderizado, c) a vista frontal do suporte impresso e d) a vista lateral do suporte impresso

O suporte para a máquina fotográfica está assente num encaixe próprio, localizado no topo da cabine de luz. No topo está também uma abertura, através da qual a máquina fotografa as rolhas, dispostas nos suportes para as mesmas. A cabine de luz é um paralelepípedo com 28,7 cm de altura, 28,8 cm de largura e 34 cm de comprimento. É construída a partir de placas brancas de polimetilmetacrilato, acrílico, com 4 mm de espessura, modeladas individualmente com recurso ao software CorelDRAW Graphics Suite 2021, e, posteriormente, submetidas para corte e colagem.

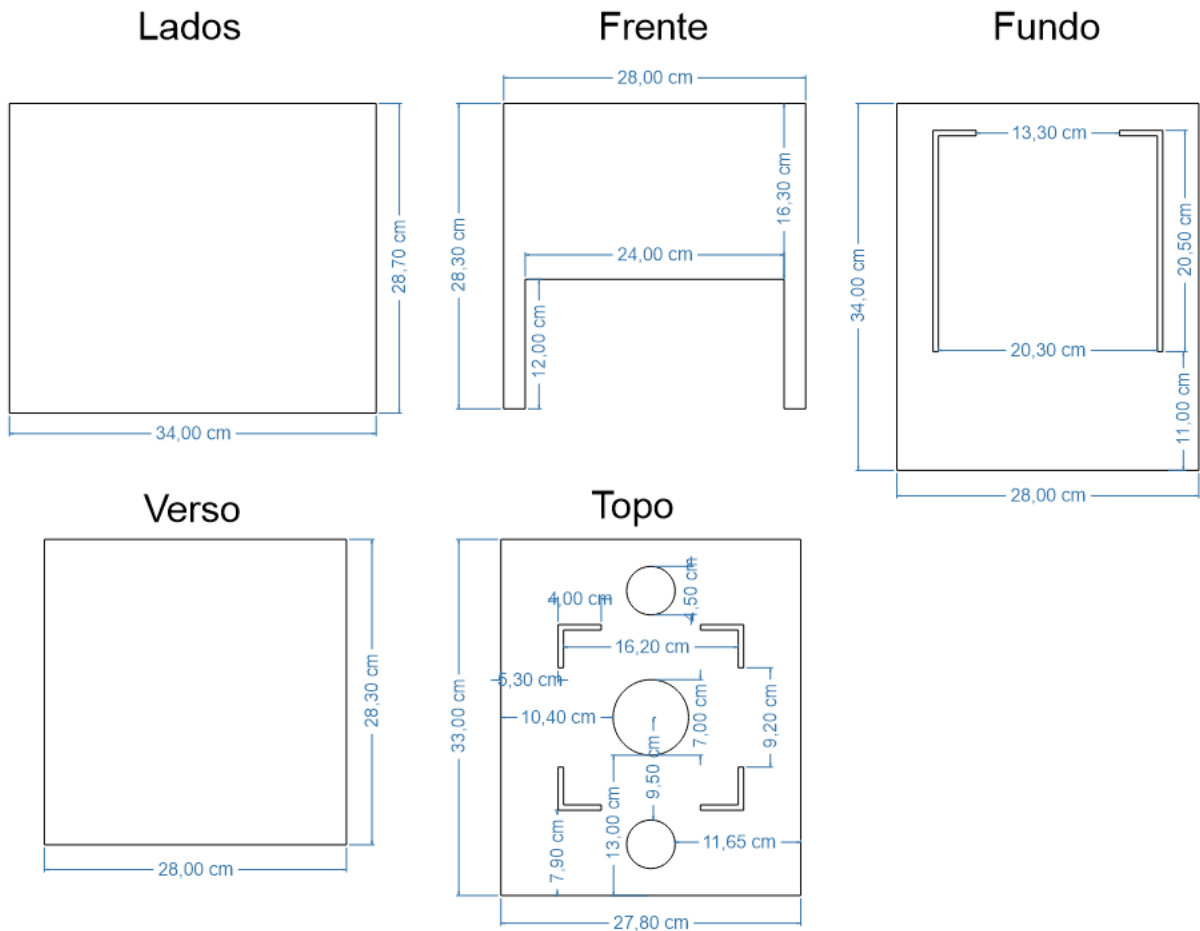


Figura 3.3 - Representação das diferentes placas que constituem a cabine de luz

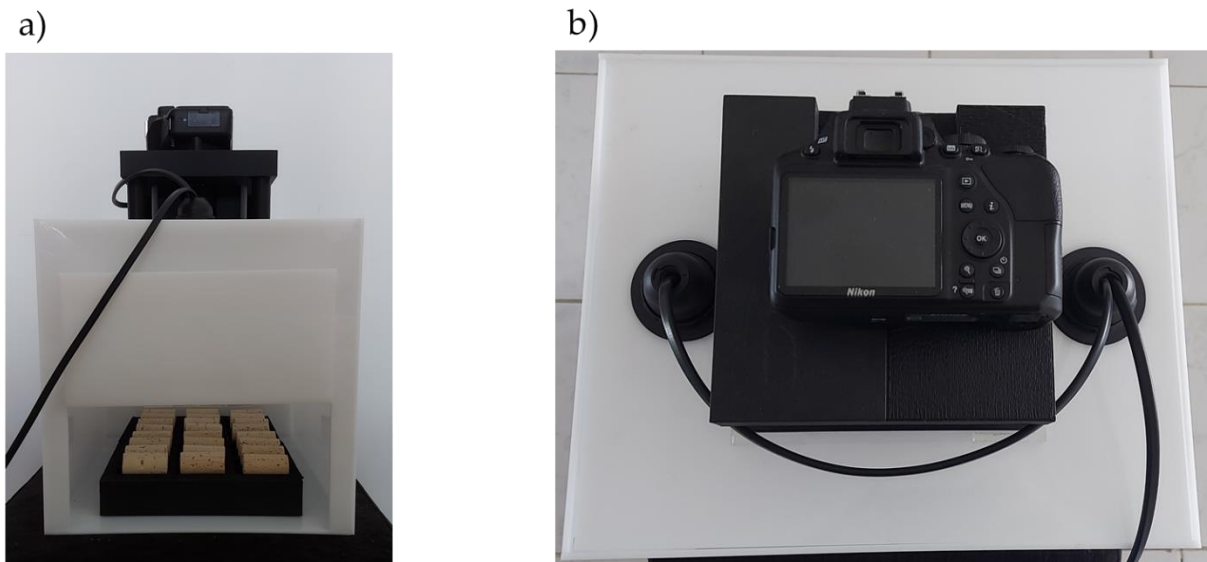


Figura 3.4 - Cabine de luz construída, onde: a) representa a vista lateral e b) a vista do topo

Como fonte de iluminação, foram utilizadas lâmpadas LED (*Light-Emitting Diode*) D65, da marca Osram, das quais resulta uma cor azul, semelhante à luz do dia, com temperatura equivalente a 6 500 K, esta sendo uma das recomendadas pela CIE para o propósito de análise colorimétrica<sup>[18]</sup>.

Como referido, os suportes foram concebidos com um desnível, de modo a criar um ângulo de 1° face ao observador, à máquina fotográfica, o que permite que as rolhas sejam fotografadas sobre condições que respeitem o padrão CIE 1931, definido para um observador colorimétrico. De acordo com este, e para a fonte de iluminação D65 considerada, o ponto branco ao qual equivale as coordenadas RGB = (1, 1, 1) é XYZ = (95,0, 100, 109), tendo sido o utilizado na conversão das coordenadas de cor para o espaço CIE L\*a\*b\*[40].

Ainda sobre a transformação para o espaço CIE L\*a\*b\*, uma vez que o valor das coordenadas provém do valor correspondente no espaço RGB, a conversão está também dependente da etapa de correção de raios gama, para transformação a partir das coordenadas R'G'B' em memória (ver Figura 2.5). Como apontado na secção 2.2.1, existem pelo menos duas normas internacionais empregues para este propósito. Neste trabalho, optou-se pelo uso da norma ITU-R BT.709-6, esta sendo a mais recente de entre as duas referidas.

Foi utilizado um luxímetro digital, da marca Prok, que permite medir a iluminância, ou densidade da intensidade luminosa, em Lux (lx, Lumen m<sup>-2</sup>). O modelo empregue tem uma faixa de medição entre 1 a 100 000 lx, com resolução de 1 lx para medições até 2 000 lx, 10 lx até 20 000 lx e 100 lx para medições entre 20 000 e 100 000 lx.

As fotografias são captadas pela máquina fotográfica, enviadas para o computador, um Lenovo IdeaPad 3 15IML05 com 8 gb de ram e processador i7-10510U, e processadas pelo software LabVIEW, versão 19.0.1f1, com os resultados representados no painel de utilizador.

## 3.2. Validação

Com o intuito de validar o processo de aquisição das coordenadas colorimétricas, foram conduzidos uma série de testes análogos aos utilizados na avaliação indireta e direta de métodos internos em ensaios de análise química<sup>[76]</sup>. De acordo com o descrito na literatura, a avaliação indireta procura determinar e expor parâmetros inerentes ao método, enquanto que a avaliação direta consiste em determinar a exatidão dos métodos de ensaio, por comparação dos resultados com valores de referência<sup>[76], [77]</sup>.

Na avaliação indireta, foi utilizada sempre a mesma rolha natural e, quando possível, a mesma face desta, com as cores representativas a resultar do uso da estratégia da Popularidade. Assim, se existirem variações nas coordenadas colorimétricas, estas podem ser associadas, principalmente, às condições de cada teste. Os testes realizados visam o estudo da<sup>[76]</sup>:

- Repetibilidade, esta sendo a precisão de um método quando efetuado em condições idênticas, com um mínimo de variações. Para esta, foram considerados 4 testes, nomeadamente:
  - Teste 1: fotografar a rolha em rápida sucessão (10 vezes);
  - Teste 2: fotografar a rolha, retirá-la do suporte e voltar a colocar na mesma posição (10 vezes);
  - Teste 3: fotografar diferentes faces da rolha (10 vezes);
  - Teste 4: fotografar a rolha nas 24 posições do suporte para faces.

- Precisão intermédia, a precisão avaliada sobre a mesma amostra quando sujeita ao mesmo método e quando definidas exatamente quais as condições a variar. Para avaliação desta, realizou-se o:
  - Teste 5: utilizar outro operário, outra pessoa, para efetuar a caracterização da cor da rolha (10 vezes);
  - Teste 6: fotografar a rolha em diferentes dias (10 vezes).
- Robustez, onde é medida a sensibilidade do método face a pequenas variações. Para esta realizou-se somente um teste, o:
  - Teste 7: fotografar a rolha sobre diferentes condições de focagem (10 vezes).

Os resultados destes testes foram representados com atenção à regra de Chebyshev, que dita que independentemente do tipo de distribuição, seja normal ou não, pelo menos 75% dos valores recolhidos irão pertencer ao intervalo,  $I$ , indicado pela equação (3.1)<sup>[78]</sup>.

$$I = \mu' \pm 2\sigma' \quad (3.1)$$

Onde:

$I$  = intervalo para uma determinada coordenada colorimétrica;

$\mu'$  = média dos valores da coordenada colorimétrica;

$\sigma'$  = desvio padrão dos valores da coordenada colorimétrica.

Calculou-se também o coeficiente de variação (CV), este sendo o quociente entre o desvio padrão e a média, e, de modo a complementar e justificar os resultados dos diferentes cenários, foi utilizado o luxímetro, referido na secção 3.1, nos testes onde este possa ser de interesse.

Foi empregue um *ColorChecker White Balance* para o balanceamento de brancos, isto é, para indicar à máquina fotográfica uma referência branca, consistente e neutra, e que permite à mesma ajustar a cor, conforme a iluminação, e devolver cores mais próximas das visualmente perceptíveis<sup>[79]</sup>. Posteriormente, a avaliação direta, direcionada à validação das cores, foi realizada tendo como material de referência uma paleta padrão com 24 cores, o modelo *Xrite ColorChecker Classic Mini*, cujas coordenadas colorimétricas foram obtidas por correspondência com o fabricante. Para caracterização das cores na paleta padrão foi empregue, novamente, a estratégia da Popularidade.

### 3.3. Base de dados

Foi construída uma base de dados com as coordenadas de cor padrão, nos espaços  $R'G'B'$  e CIE  $L^*a^*b^*$ , para 3 808 rolhas que caracterizam a cor de 8 tipos de lavações distintas. Entre estas têm-se 2 324 rolhas Naturais, 1 247 rolhas Neutrocork e 237 rolhas Twin Top, pertencentes a 93 lotes, para um total de 194 fotografias. Todas as rolhas foram fornecidas pela equipa da Divisão de Engenharia de Produto (DEP), do departamento técnico da Amorim Cork S.A., e as coordenadas padrão obtidas com recurso ao arranjo da cabine de luz e máquina fotográfica descrito na secção 3.1, e por meio da estratégia da Moda do Histograma.

Uma vez que as diferentes rolhas constituem amostras de um determinado tipo de lavação, uma população, foi empregue um nível de confiança de 95% para estabelecer as coordenadas médias. Isto dita, portanto, que há 95% de probabilidade de que as médias das coordenadas colorimétricas de todas as rolhas de uma determinada lavação, ou população, pertençam ao intervalo estabelecido para  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ [80]. Adicionalmente, e uma vez que não é conhecido o desvio padrão para nenhuma das lavações, deve ser utilizada uma distribuição de t de Student para o cálculo dos intervalos de confiança[81]. Tem-se então que os intervalos de confiança para as médias, IC (95%), das coordenadas colorimétricas dos diferentes tipos de lavação são dados pela equação (3.2).

$$IC (95\%)(J) = \bar{X} \pm t_{(5\%;r-1)} \frac{S}{\sqrt{r}} \quad (3.2)$$

Onde:

IC (95%)(I) = intervalo de confiança, com um nível de confiança de 95%, para uma coordenada J

$\bar{X}$  = média da coordenada J na amostra;

r = número de rolhas da amostra;

$t_{(5\%;r-1)}$  = valor, na tabela t de Student, para um nível de significância de 5% (nível de confiança =  $(1-0,05) \times 100\% = 95\%$ ) e r-1 graus de liberdade;

S = desvio padrão da coordenada J na amostra.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Desenvolvimento do software

O processamento das imagens de rolhas de cortiça, pelo software, requer a execução de uma série de etapas externas indicadas a laranja na Figura 4.1. Estas incorrem sobre fotografar as rolhas dispostas nos suportes, e selecionar as opções corretas para processamento das rolhas fotografadas, de entre as disponíveis na Figura 4.2.

Posteriormente, o software processa as imagens presentes no diretório, ou aquelas selecionadas pelo utilizador, de acordo com as etapas indicadas a azul na Figura 4.1, e que serão sumariamente descritas no presente capítulo.

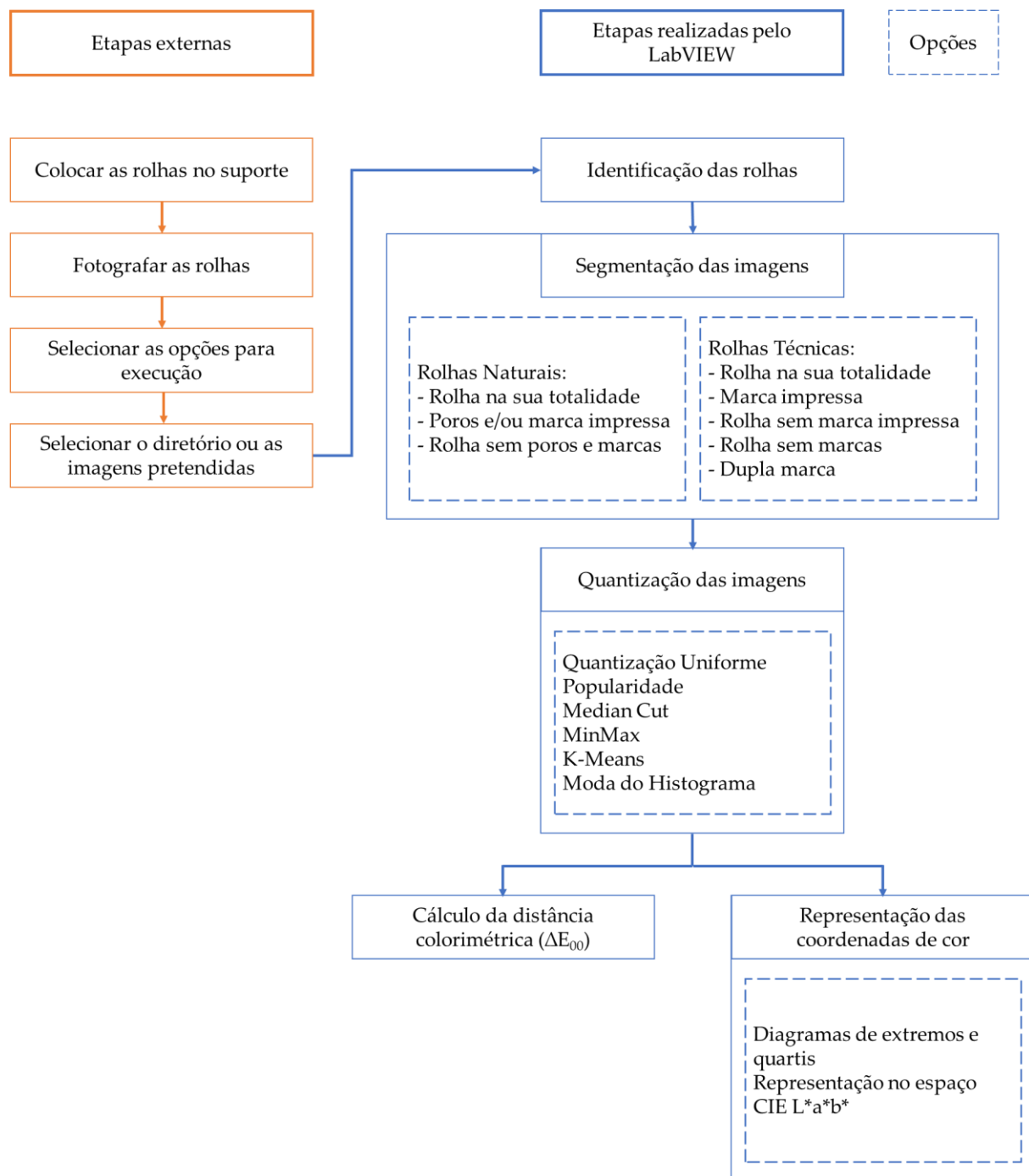


Figura 4.1 - Etapas envolvidas na recolha e processamento de imagens de rolhas

As opções de configuração disponíveis para o processamento de imagens encontram-se representadas na aba de "Configuração", na Figura 4.2. Nos "Parâmetros Gerais", o utilizador deve seleccionar qual o tipo de estratégia de caracterização de cor pretendida, tendo como opções as 6 referidas na secção 2.5 e indicadas na etapa de "Quantização das imagens" na Figura 4.1.

O utilizador deve ainda seleccionar, entre outras opções, qual o tipo de lavagem das rolhas fotografadas, para serem utilizadas as coordenadas corretas de entre as presentes na base de dados. As coordenadas, e a cor resultante destas, são também indicadas na aba de "Configuração", como demonstrado.

Caso se pretenda alterar as coordenadas padrão do tipo de lavação escolhido, o utilizador deve seleccionar a opção "Alterar", e, posteriormente, introduzir as novas coordenadas CIE L\*a\*b\*, como exemplificado na Figura 4.3. Para além da cor e coordenadas antigas, o painel de utilizador indica ainda a cor resultante das novas coordenadas. Após estas serem estabelecidas, o utilizador deve seleccionar "Aceitar", o que permite guardar as coordenadas escolhidas, na base de dados, como o novo padrão para o tipo de lavação, e desbloqueia as opções que estão desativadas na Figura 4.3, e que permitem dar continuação ao processo de caracterização da cor.

Nos "Parâmetros de Caracterização das Rolhas", e novamente dependendo do tipo de rolha, o utilizador escolhe se quer processar as diferentes secções das mesmas. No exemplo apontado na Figura 4.2 foram processadas rolhas naturais sem marca e, portanto, a opção "Processar marca?" permanece desativada. Desta escolha resulta que a imagem "Rolhas Naturais segmentadas", na Figura 4.4, é uma junção de 3 imagens, onde a primeira representa a face da rolha, a segunda os poros e a terceira a face da rolha sem poros. Em rolhas naturais e técnicas, as diferentes secções disponíveis para segmentação são as indicadas na etapa "Segmentação das imagens", na Figura 4.1.

Na Figura 4.5 estão representadas as coordenadas no espaço CIE L\*a\*b\* e a distância colorimétrica em relação ao padrão para a lavação previamente seleccionada, sendo que ambos os resultados podem ser copiados ou exportados para Microsoft Word ou Excel. A métrica utilizada é a CIEDE2000,  $\Delta E_{00}$ , uma vez que esta é a recomendada para a avaliação da distância colorimétrica, e a que apresenta a melhor correspondência com a percepção visual, algo que será posteriormente comprovado na secção 4.6.3.

Ainda sobre a Figura 4.5, a seleção prévia da opção "Reconstruir imagens?" nos "Parâmetros Gerais" (Figura 4.2), implica que a imagem "Reconstrução de rolhas" representa a reconstrução de cada face com as cores presentes na paleta de cores estabelecida, utilizando a cor preta para os tons mais escuros, e feita pelo mesmo método previamente utilizado na secção 2.5, de *Inverse Color Map* com a distância Minkowsky 5.

Na Figura 4.2 foi também seleccionada a opção "Construir histogramas?", da qual resulta a representação dos histogramas das coordenadas R', G' e B', para cada rolha, onde os pontos indicam as coordenadas da cor representativa, de acordo com a estratégia escolhida, e as setas indicam a moda de cada histograma. Neste exemplo, nota-se que há uma correspondência exata entre os pontos e as setas (as modas) dos três picos e, portanto, a cor representativa pela estratégia escolhida, a da Popularidade, seria igual à cor representativa pela estratégia da Moda do Histograma.

Por último, a aba das "Estatísticas", Figura 4.6, ilustra a posição de cada rolha no espaço CIE L\*a\*b\*, diagramas de extremos e quartis (*box plots*) para as coordenadas de cor e picos dos histogramas das diferentes rolhas analisadas. São ainda calculados fatores USP (*United States Pharmacopeia*) e de assimetria, utilizados na análise de picos em cromatografia gasosa. Se o fator USP ou de assimetria for inferior a 1, o pico da rolha é *net fronting*, se igual a 1 é simétrico e se superior a 1 é *net tailing*<sup>[82]</sup>.

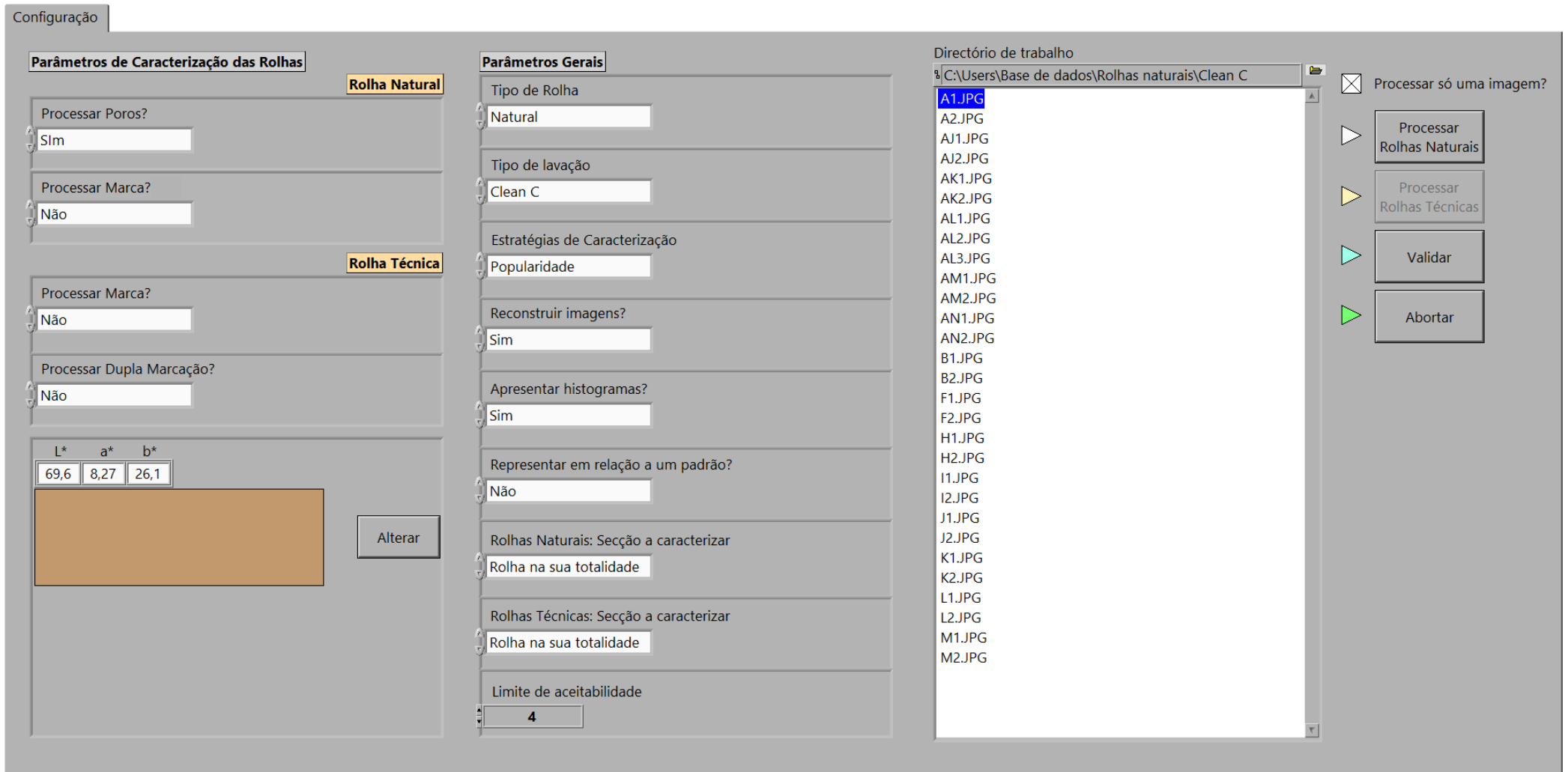


Figura 4.2 - Aba da "Configuração" no painel de utilizador

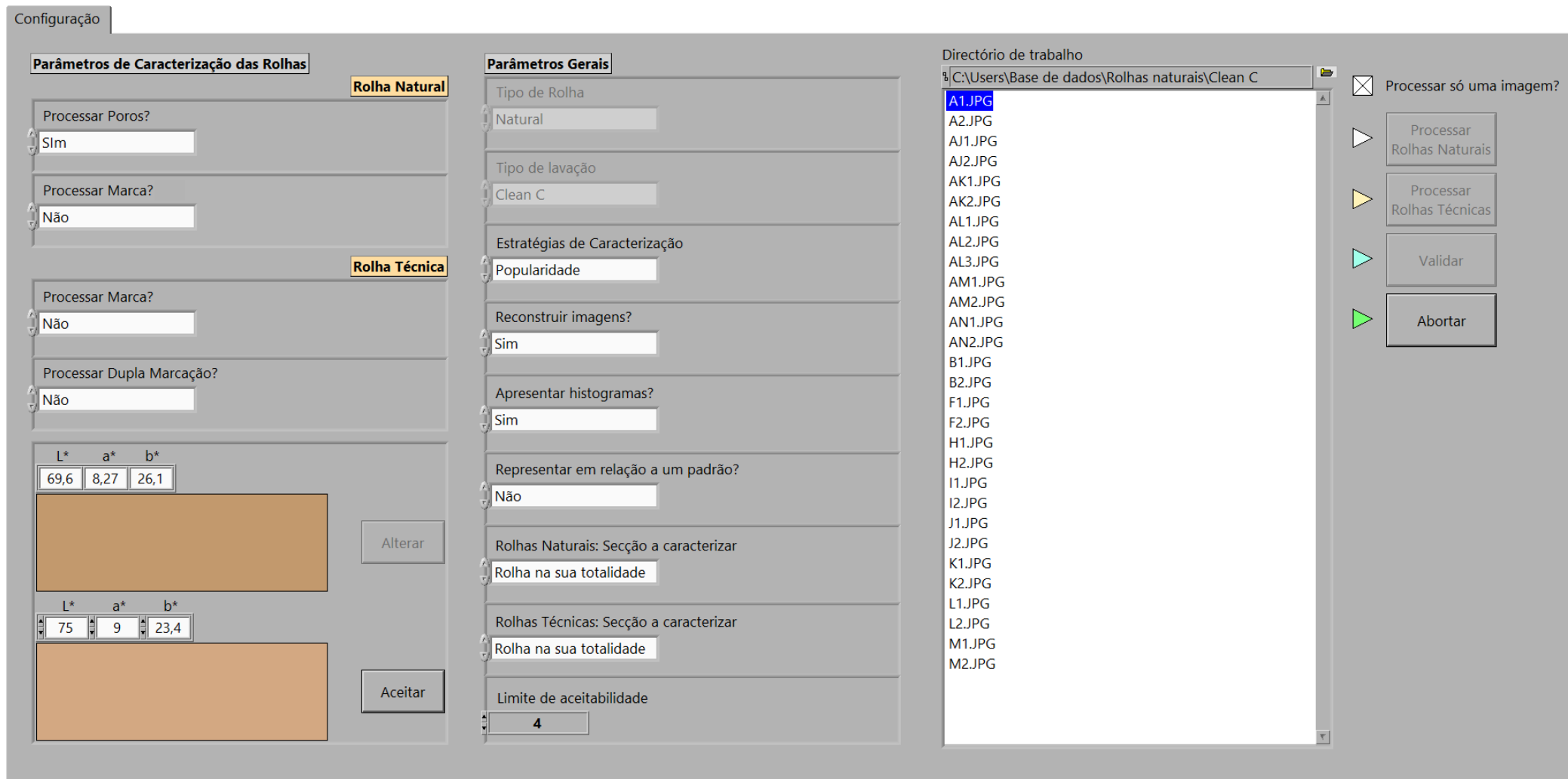


Figura 4.3 - Aba da "Configuração" no painel de utilizador quando se pretende alterar o padrão para o tipo de lavação escolhido

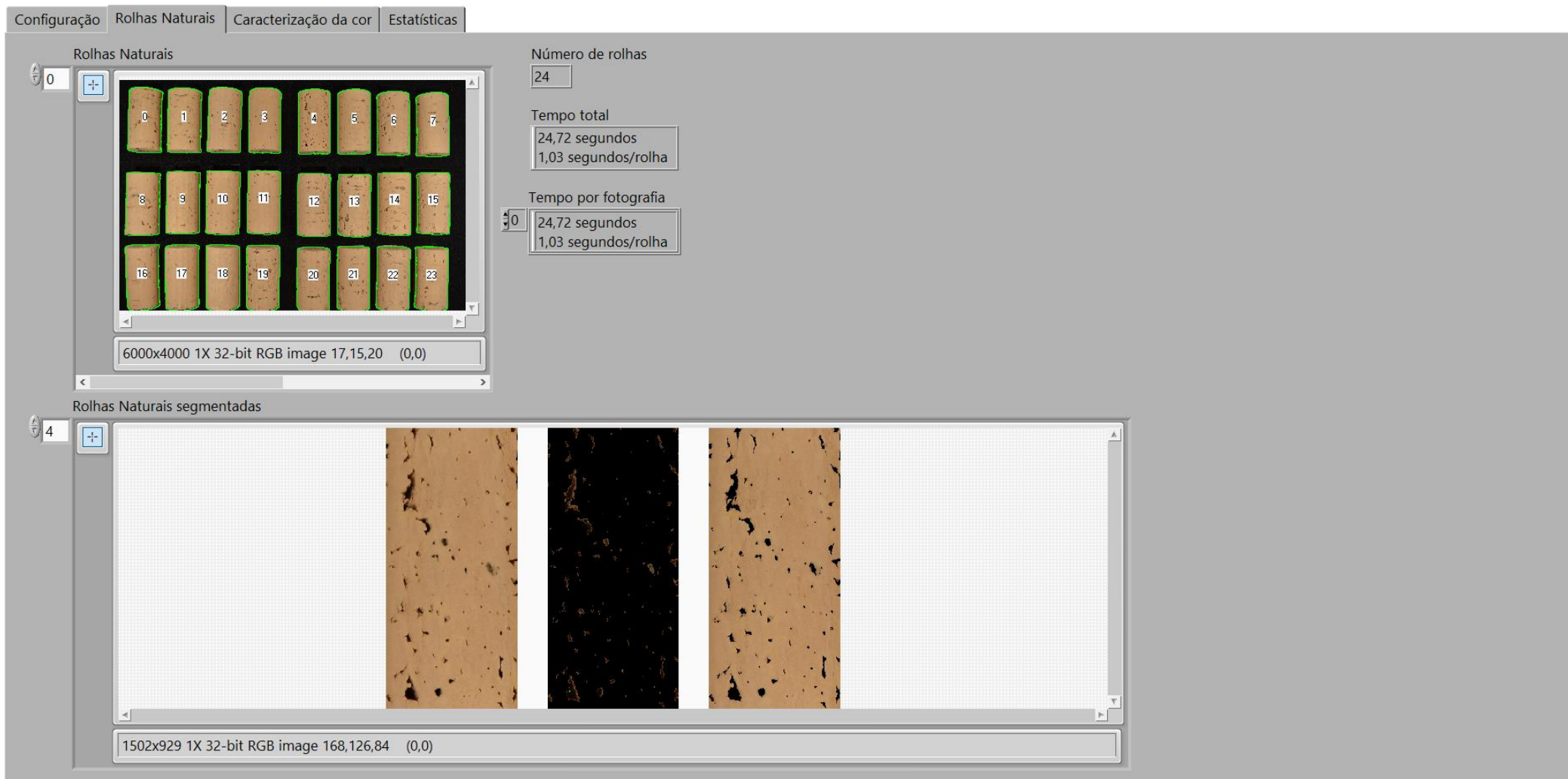


Figura 4.4 - Aba das "Rolhas Naturais" no painel de utilizador, com a representação da imagem original na figura "Rolhas Naturais" e da face de cada rolha com as diferentes secções isoladas em "Rolhas Naturais segmentadas"

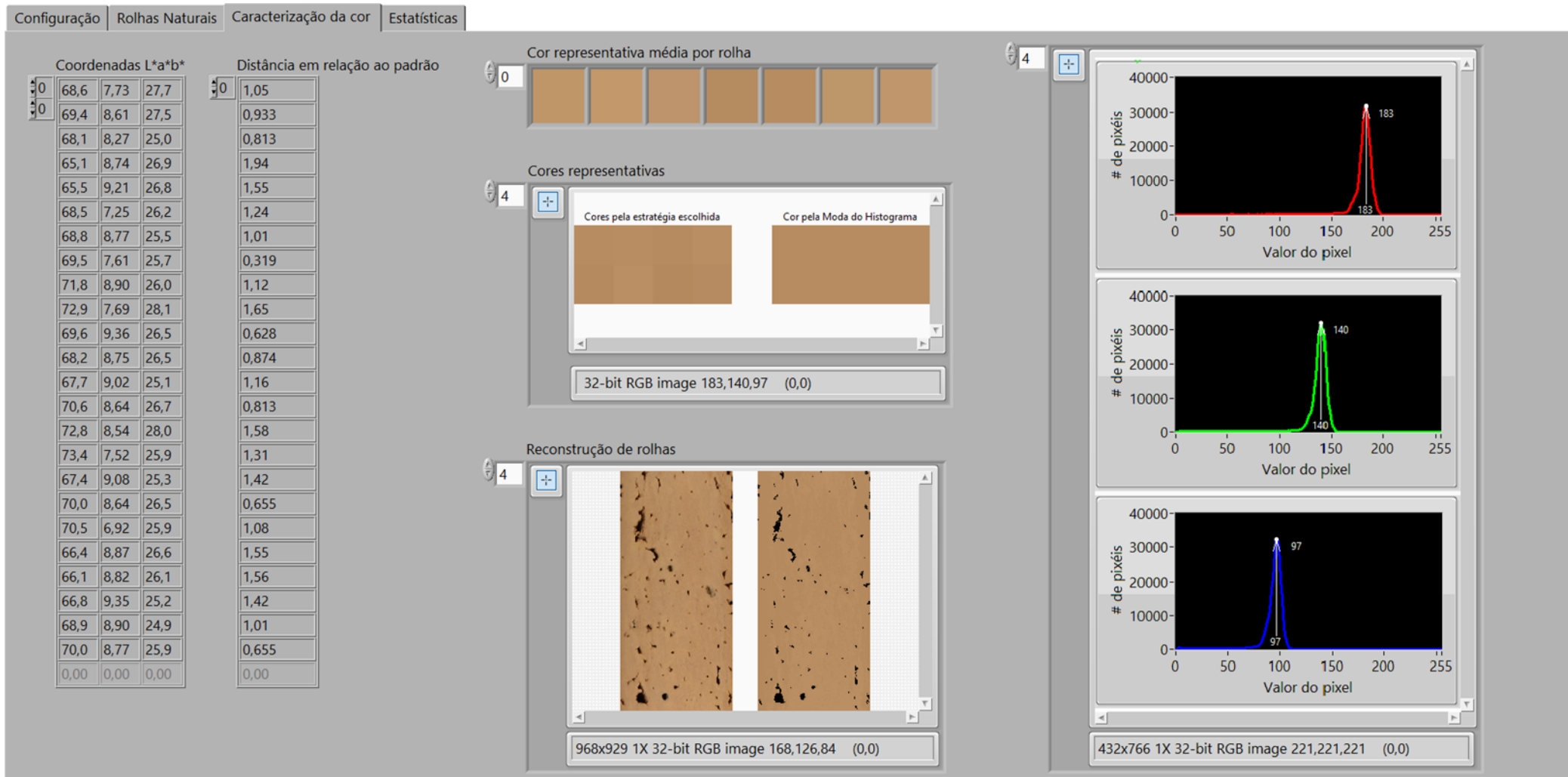


Figura 4.5 - Aba da "Caracterização da cor" no painel de utilizador, com coordenadas L\*a\*b\*, distância colorimétrica em relação ao padrão da lavação, conforme a métrica de distância seleccionada, cores representativas, reconstrução de rolhas e histogramas R'G'B' para cada rolha

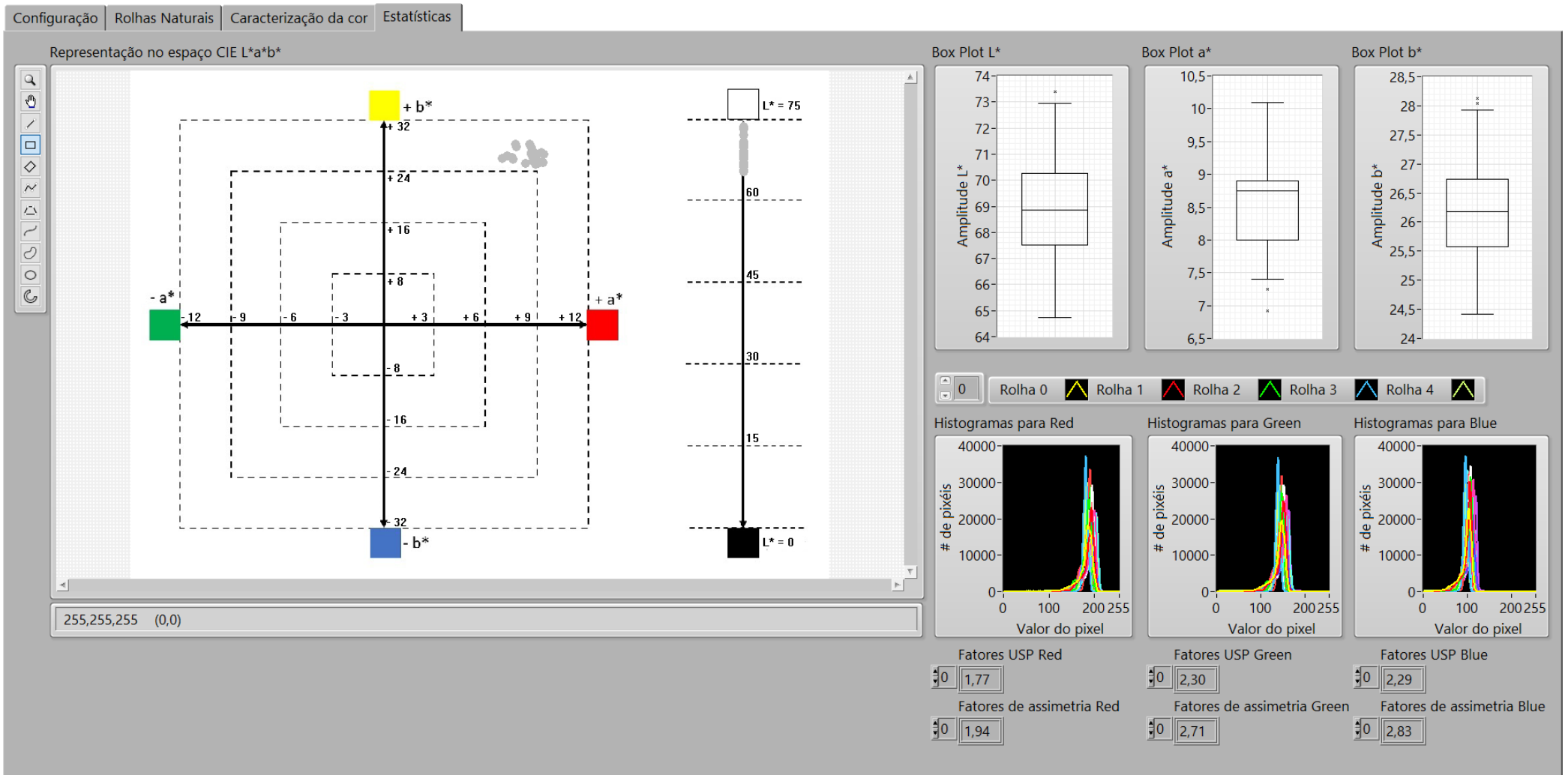


Figura 4.6 - Aba das "Estatísticas" no painel de utilizador, com representação das coordenadas de cor no espaço CIE L\*a\*b\*, diagramas de extremos e quartis para cada uma das coordenadas e histogramas R'G'B' para todas as rolhas

### 4.1.1. Identificação das rolhas

A primeira etapa realizada pelo LabVIEW, indicada na Figura 4.1, é a de identificação correta das rolhas em imagem. Esta é concretizada ao impor um limite nas coordenadas do espaço de cores HSL, que toma proveito do contraste entre a cor do suporte e a cor das rolhas de determinada lavação para formar um intervalo de coordenadas aceitáveis. Um subVI analisa os pixels que constituem a imagem e substitui por 0 aqueles que estão fora do intervalo pré-estabelecido.

O *output* do subVI é, portanto, uma imagem binária onde os pixels que representam a rolha são brancos e onde os restantes assumem a cor preta. Do produto entre esta imagem binária, com valores de 0 e 1, e a imagem original resulta uma imagem onde todos os pixels são pretos, à exceção daqueles que caracterizam as cores das rolhas (imagem c) da Figura 4.7).

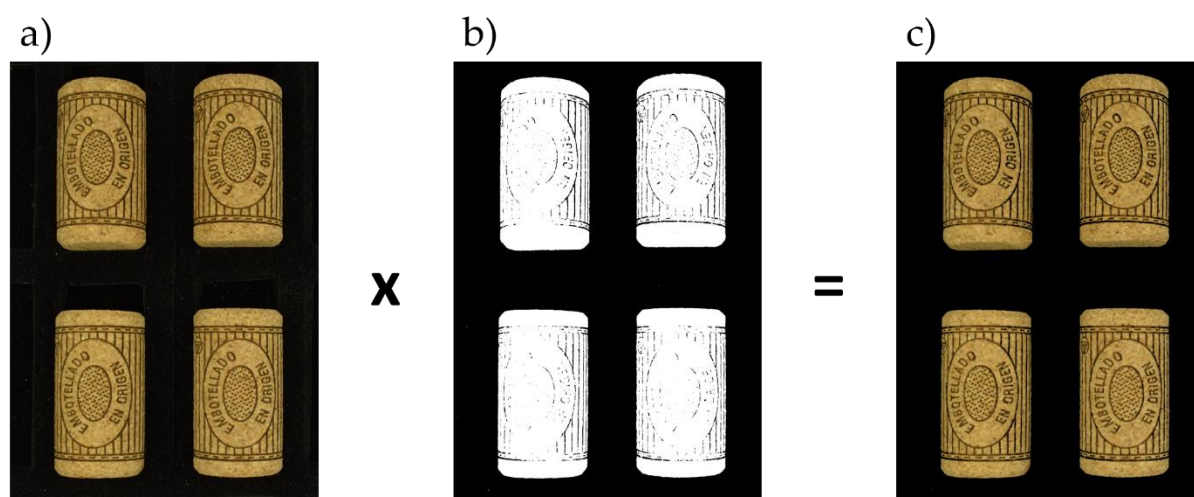


Figura 4.7 - Etapa inicial de identificação de rolhas em LabVIEW, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem binária e c) a imagem com as rolhas isoladas do suporte

Posteriormente, é utilizado um subVI da biblioteca IMAQ que recebe como *input* a imagem binária, imagem b) da Figura 4.7, e utiliza o contraste entre os valores dos pixels, entre as zonas a preto e a branco, para contar o número de rolhas e devolver as coordenadas (x, y) que representam o centro de cada. Com estas, é possível numerar as rolhas na imagem, o que facilita a identificação das mesmas por parte do utilizador.

As coordenadas centrais (x, y) são também utilizadas como *input* para outro subVI, que analisa novamente o contraste entre os valores dos pixels e cujo *output* é um conjunto de coordenadas que definem os vértices de, no caso do presente exemplo, 4 retângulos que englobam as 4 rolhas fotografadas. Estas coordenadas são então utilizadas para recortar a imagem c) da Figura 4.7 em 4 imagens que representam as faces de cada rolha.

O *output* desta primeira etapa, de identificação das rolhas, é, portanto, N imagens que representam as faces ou topos das N rolhas presentes na fotografia inicial.

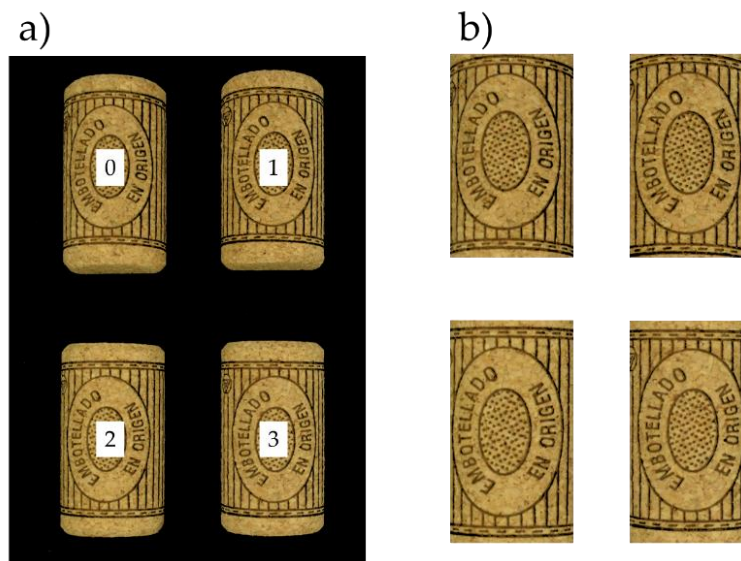


Figura 4.8 - Etapa final de identificação das rolhas em LabVIEW, onde: a) representa a imagem com as rolhas numeradas e b) as faces das diferentes rolhas

Como pode ser discernido, o processo de criar a imagem binária, ao utilizar o espaço HSL e o contraste entre as rolhas e os suportes, é crítico para o funcionamento correto do método, uma vez que as faces das rolhas presentes na imagem b) da Figura 4.8 serão as analisadas em etapas subsequentes. Então, o limite imposto deve ser tal que permita criar o contraste pretendido, independentemente do tipo de lavagem, o que por sua vez possibilita o recorte das faces. Para isto, tira-se proveito de uma das maiores vantagens do espaço HSL, indicada na Tabela 2.1, a de utilizar apenas uma das coordenadas, a coordenada acromática da luminosidade, para separar as rolhas do suporte.

Os suportes utilizados são de cor preta, e na Figura 2.7, representativa do espaço HSL, observa-se que esta tem uma luminosidade  $L = 0$ . Embora seja impossível assegurar que a cor dos suportes é perfeitamente preta ao longo de todos os pixels que os definem, estabelecer como aceitável qualquer cor com coordenada acromática  $L \in [20; 100]$  permite identificar as rolhas como os agrupamentos de pixels cujas cores pertençam ao intervalo referido.

No entanto, utilizar este intervalo para a coordenada acromática implica que alguns dos pixels que caracterizam certas secções mais escuras das rolhas, como a marca impressa, podem ser ostracizados na imagem binária. Isto é demonstrado na imagem b) da Figura 4.7, onde é evidente que determinadas partes das marcas foram erroneamente isoladas.

Como tal, e embora possa não ser imediatamente aparente, tendo em conta que a imagem a cores, a imagem c) na Figura 4.7, resulta do produto entre a imagem original e a imagem binária, as mesmas partes isoladas na imagem binária são também removidas da imagem a cores, o que retira informação sobre as cores das marcas, neste caso.

Uma vez que pode ser de interesse para o utilizador caracterizar a cor destas secções na sua totalidade, foi desenvolvido um passo adicional que visa corrigir falhas resultantes da imposição de limites no espaço HSL. O processo é representado pelo esquema da Figura 4.9, e tem como princípio básico o facto de que se uma imagem é constituída por um determinado

número de linhas de pixéis, então o primeiro e último valor numa sequência de pixéis de cor branca seriam os pontos correspondentes à extremidade esquerda e direita, respetivamente, de determinada rolha, ao longo daquela linha. Ao substituir os valores intermédios por 1, é possível garantir que não há perda de informação entre ambas as extremidades.

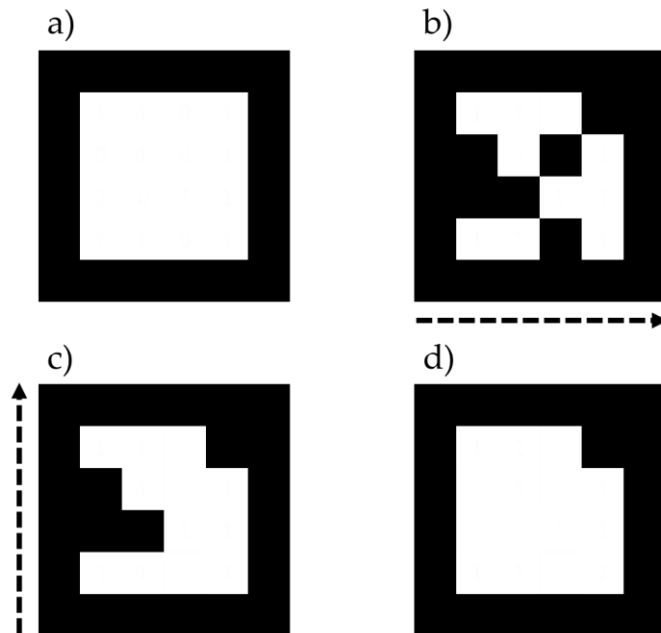


Figura 4.9 - Correção do limite imposto para identificação das rolhas, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem resultante da imposição do limite, c) a imagem após correção horizontal e d) a imagem após correção vertical

A operação é conduzida primeiro horizontalmente, da imagem b) para a imagem c), e depois verticalmente, da imagem c) para a imagem d), sobre uma imagem binária, para, essencialmente, preencher os "buracos", as regiões a preto, entre extremidades. Isto permite compensar por potenciais falhas resultantes da imposição do limite na coordenada acromática L, desde que o contorno das rolhas esteja devidamente identificado.

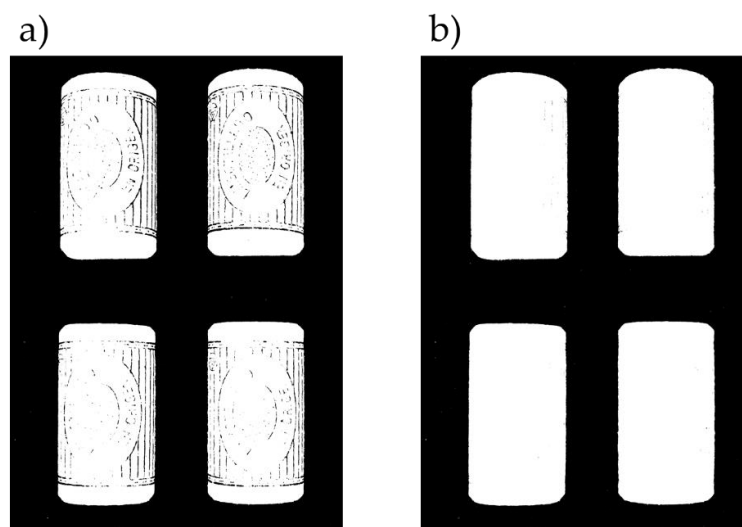


Figura 4.10 - Representação do resultado da correção do limite imposto, onde: a) representa a imagem binária original e b) a imagem após correção pelo processo proposto

A imagem binária resultante da correção seria então multiplicada pela imagem a cores original, resultando numa imagem semelhante à imagem c) da Figura 4.7, mas sem a perda de cor na marca.

Naturalmente, o processo de correção da imagem binária aumenta a complexidade do programa, embora testes realizados indiquem que o acréscimo no tempo de execução é desprezável, entre 10 a 20 milissegundos por imagem. Uma potencial alternativa seria utilizar um suporte branco, contudo foi igualmente verificado que rolhas com determinados tipos de lavação, como Clean 2000 ou Light, possuem cores demasiado próximas do branco do suporte, o que dificulta a remoção do mesmo. Mesmo quando considerados outros tipos de lavação mais escuros, a imposição de limites aceitáveis é problemática devido às sombras lançadas pelas rolhas no interior do suporte.

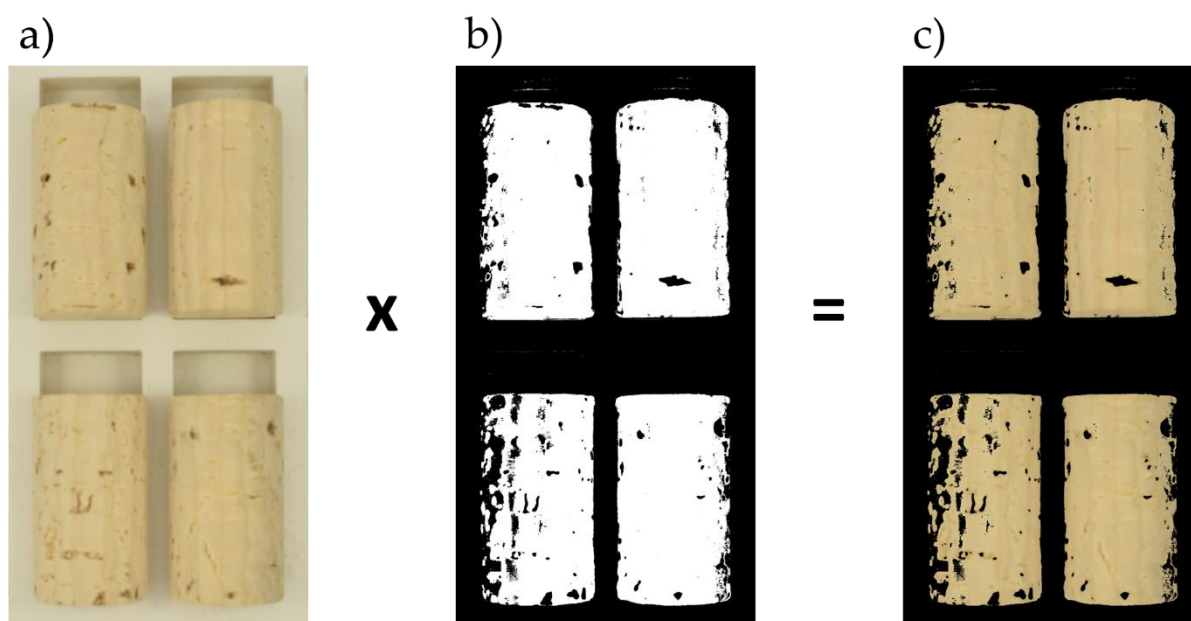


Figura 4.11 - Tentativa de identificação de rolhas com lavação Light em suporte branco, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem binária e c) a imagem com as rolhas isoladas

As imagens b) e c) na Figura 4.11 indicam que um suporte branco devolve resultados inadequados para o objetivo proposto, e obriga igualmente ao uso do passo previamente descrito para correção da imagem binária. Tem-se também que, ao contrário do verificado para o de cor preta, um suporte branco necessita de limites específicos para diferentes lavações. Suportes de outras cores, como vermelho ou verde, poderiam provocar reflexões que impactam a cor das rolhas fotografadas.

### 4.1.2. Segmentação das rolhas

As rolhas naturais e técnicas podem ser divididas em diferentes secções, sendo que pode ser de interesse para o utilizador caracterizar cada uma destas quanto à sua cor. Portanto, foram desenvolvidas uma série de estratégias, baseadas na imposição de limites em determinado espaço de cores e na subtração de imagens, que permitem isolar as secções que constituem cada tipo de rolha. O utilizador seleciona quais as secções que pretende caracterizar, pelas opções: "Rolhas Naturais: secção a caracterizar" e "Rolhas Técnicas: secção a caracterizar", disponíveis na aba das "Configurações", na Figura 4.2, e expandidas na Figura 4.12.

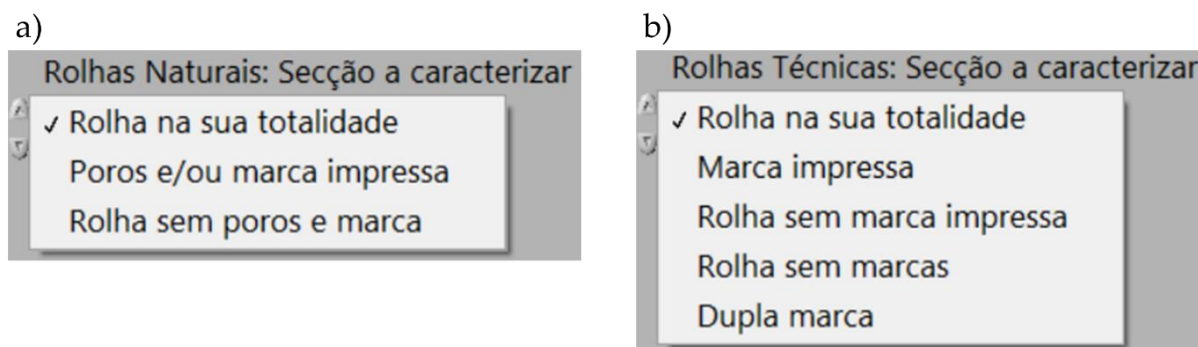


Figura 4.12 - Secções disponíveis para caracterização em: a) Rolhas Naturais e b) Rolhas Técnicas

As secções, quando segmentadas, são representadas lado a lado, como ilustrado na imagem "Rolhas Naturais segmentadas" da Figura 4.4.

#### 4.1.2.1. Segmentação de rolhas naturais

A superfície de uma rolha natural está coberta por um dado número de poros, buracos, de determinadas dimensões, conforme a classe a que esta pertence. Geralmente, os químicos utilizados no processo de lavagem, e que conferem a cor à rolha, não penetram o suficiente no interior dos poros e, portanto, estes apresentam uma cor mais escura do que o corpo da rolha. Logo, pode ser de interesse caracterizar a cor do corpo das rolhas de cortiça sem os poros ou, no caso de ensaios de investigação, caracterizar apenas a cor dos poros para, por exemplo, determinar a eficácia do processo de lavagem.

Com isto em mente, foram desenvolvidas uma série de operações, baseadas na subtração de imagens e na imposição de intervalos aceitáveis para as coordenadas, que permitem enviar, para posterior processamento, uma representação da face da rolha onde os pixels que definem os poros têm o valor de 0, ou outra onde os pixels dos poros são os únicos com um valor diferente de 0. Na etapa seguinte, de "Quantização das imagens" na Figura 4.1, quando determinada estratégia de quantização analisa o conjunto de pixels que define uma imagem, esta ignora aqueles com valor de 0 e processa apenas os restantes.

As operações e imagens resultantes da segmentação em rolhas naturais encontram-se sumariamente descritas pelo esquema da Figura 4.13.

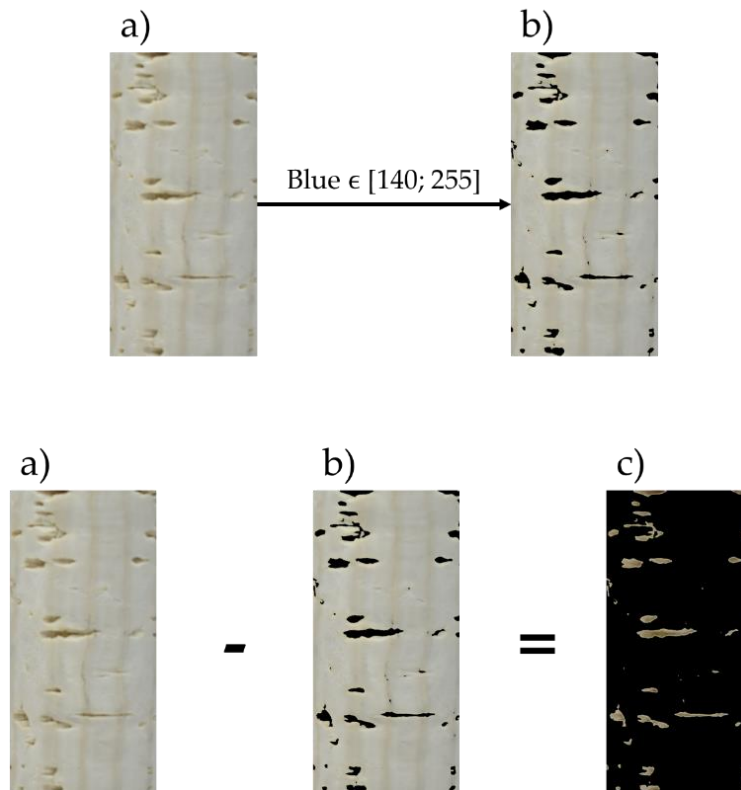


Figura 4.13 - Esquema representativo da segmentação de rolhas naturais, onde: a) representa a face da rolha, b) a face sem poros e c) os poros

O intervalo imposto no exemplo da Figura 4.13 implica que os pixéis aceitáveis são aqueles com coordenada *Blue* entre 140 e 255. Disto resulta a imagem b), representativa da face da rolha sem os poros, que pode ser subtraída à face original para obter a imagem c), representativa dos poros. Estas operações permitem ao utilizador caracterizar a cor da face, a cor da face sem os poros ou apenas a cor dos poros, conforme o objetivo pretendido. Como referido, a cor dos poros em particular pode ser uma métrica importante para ensaios que visem determinar a eficácia geral dos processos de lavação de rolhas de cortiça.

O mesmo subVI que permite contar o número de rolhas pode também ser utilizado para contar o número aproximado de poros presentes em cada face, e calcular a percentagem da área ocupada pelos mesmos, relativamente à área da face da rolha.

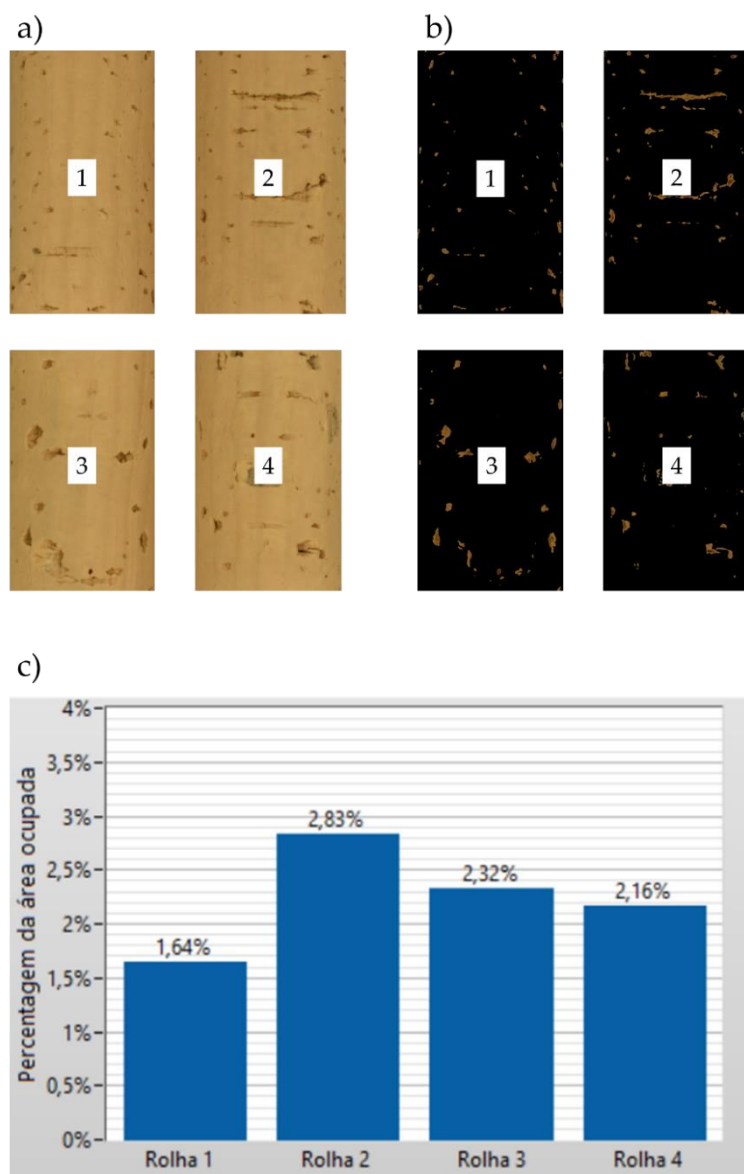


Figura 4.14 - Segmentação de poros em rolhas naturais, onde: a) representa as 4 faces das rolhas, b) os poros isolados de cada face e c) o gráfico devolvido pelo software com indicação da percentagem da superfície ocupada pelos poros, por rolha

Esta funcionalidade adicional diverge do objetivo principal de caracterização da cor, no entanto permite ao utilizador tomar decisões expeditas sobre o estado das rolhas naturais analisadas.

Outra secção importante a ser isolada é a marca impressa. Antes do embalamento e expedição das rolhas, quer naturais quer técnicas, como produto final, estas passam pelas etapas de marcação e tratamento de superfície (ver Figura 1.1). De modo a garantir que a marca impressa possui qualidade suficiente no fim do processo de marcação, e que não é afetada excessivamente pela aplicação do tratamento de superfície, esta deve ser igualmente isolada e caracterizada. Se a cor da marca for registada no início e fim de cada processo, o utilizador pode verificar se, por exemplo, a marca perdeu intensidade, o que iria implicar um valor de  $L^*$  superior no fim, ou se sofreu outras alterações que provoquem diferenças significativas na sua cor.

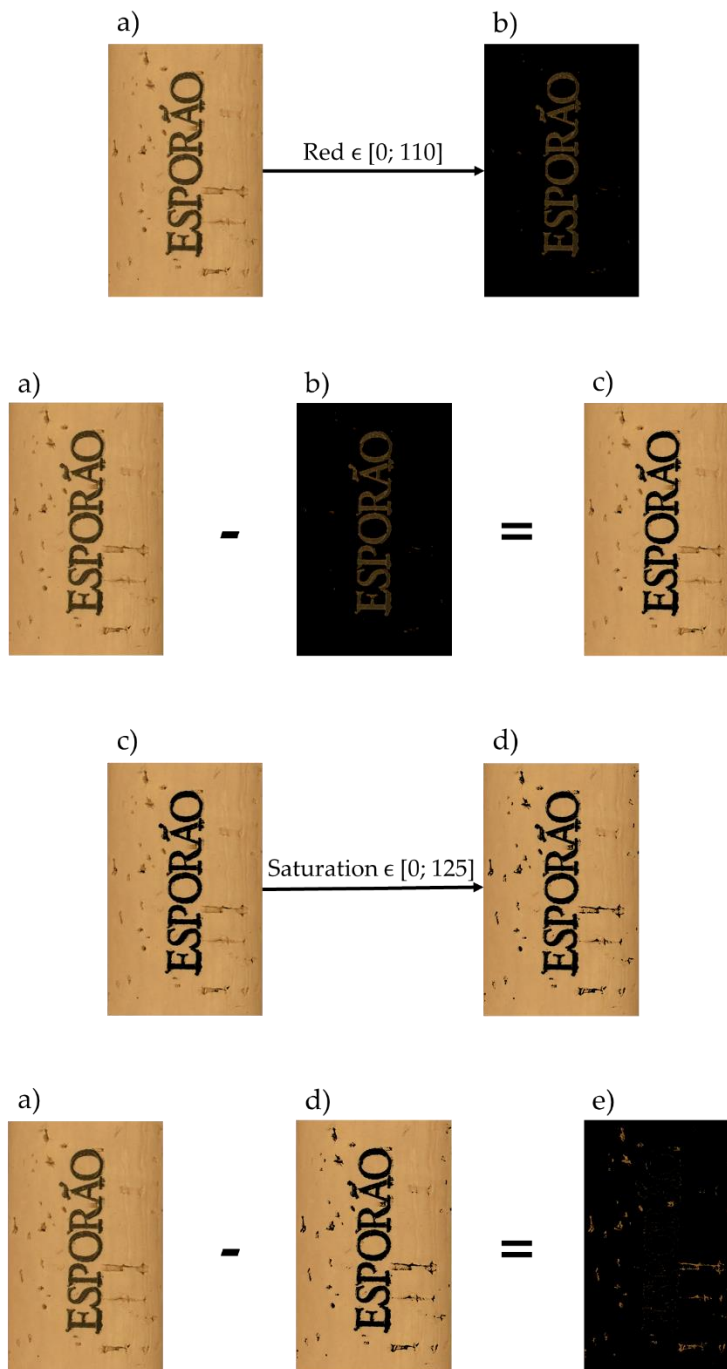


Figura 4.15 - Esquema representativo da segmentação de rolhas naturais, onde: a) representa a face da rolha, b) a marca impressa, c) a face sem marca impressa, d) a face sem marca e poros e e) os poros

O limite imposto nas coordenadas da imagem a), na Figura 4.15, permite isolar a marca impressa. Contudo esta segmentação não é "perfeita", uma vez que não abrange parte dos pixels que descrevem o contorno da marca. Consequentemente, estes pixels estão presentes na imagem resultante para os poros, imagem e), o que poderia impactar a caracterização da cor dos mesmos, embora que de forma reduzida.

É possível o uso de um limite menos restrito para remover a marca, contudo este implicaria que determinados pixels que caracterizam a cor dos poros seriam aceites na imagem da marca e, como tal, a imagem final dos poros iria perder informação colorimétrica.

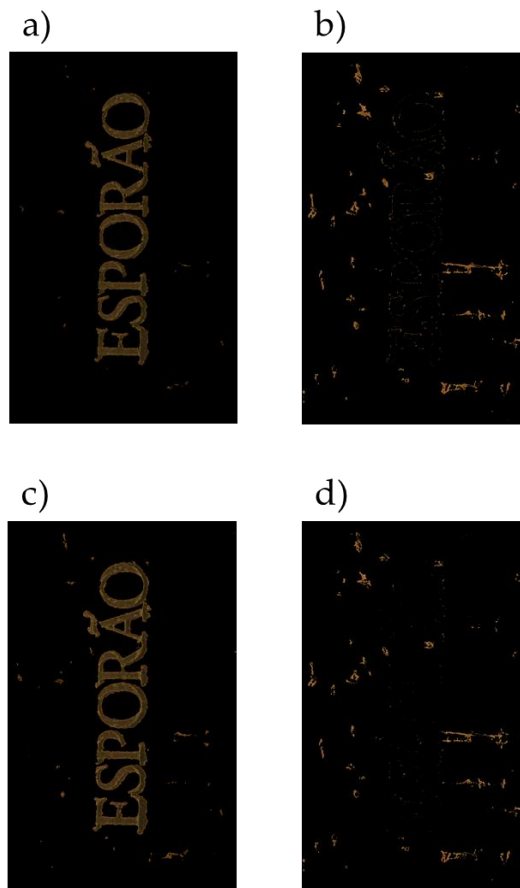


Figura 4.16 - Representação de diferentes limites para a segmentação da marca, onde:  
a) representa a marca impressa para um limite  $Red \in [0; 110]$ , b) os poros para um limite  $Red \in [0; 110]$ ,  
c) a marca impressa para um limite  $Red \in [0; 120]$  e d) os poros para um limite  $Red \in [0; 120]$

A Figura 4.16 indica que, e como teorizado, os pixéis que formam o contorno da marca são menos evidentes quando o limite é menos restrito, imagem d), mas, como consequência os pixéis que definem parte dos poros estão presentes na imagem c).

Assim, ambas as figuras, Figura 4.15 e Figura 4.16, denotam que é possível isolar as duas secções, com alguns ajustes cuidadosos nos limites impostos que beneficiam uma em detrimento da outra. No entanto, isto pode requerer intervenção e tomada de decisões por parte do utilizador. Então, se for necessário um elevado nível de escrutínio para a cor dos poros e da marca, a segmentação e caracterização da cor dos poros deve ser feita antes da etapa de marcação, isto para minimizar a necessidade de intervenção e evitar a sobreposição de pixéis de secções diferentes.

#### 4.1.2.2. **Segmentação de rolhas técnicas**

No decorrer do seu processo produtivo, as rolhas técnicas podem ser sujeitas a um processo do qual resulta o que é chamado de dupla marcação, que são linhas criadas para simular os veios existentes na cortiça natural. Etapas subsequentes do processo produtivo podem provocar o desgaste da dupla marcação e, portanto, é de interesse caracterizar a cor da mesma.

Para isto, emprega-se a mesma lógica que na segmentação de rolhas naturais, que consiste em isolar progressivamente cada uma das diferentes secções, começando pela marca impressa, quer por intervalos impostos quer pela subtração de imagens. Uma vez que rolhas técnicas não têm poros ou outras secções visivelmente mais escuras, cujas cores são próximas das da marca, os problemas de sobreposição observados no caso das rolhas naturais não se verificam.

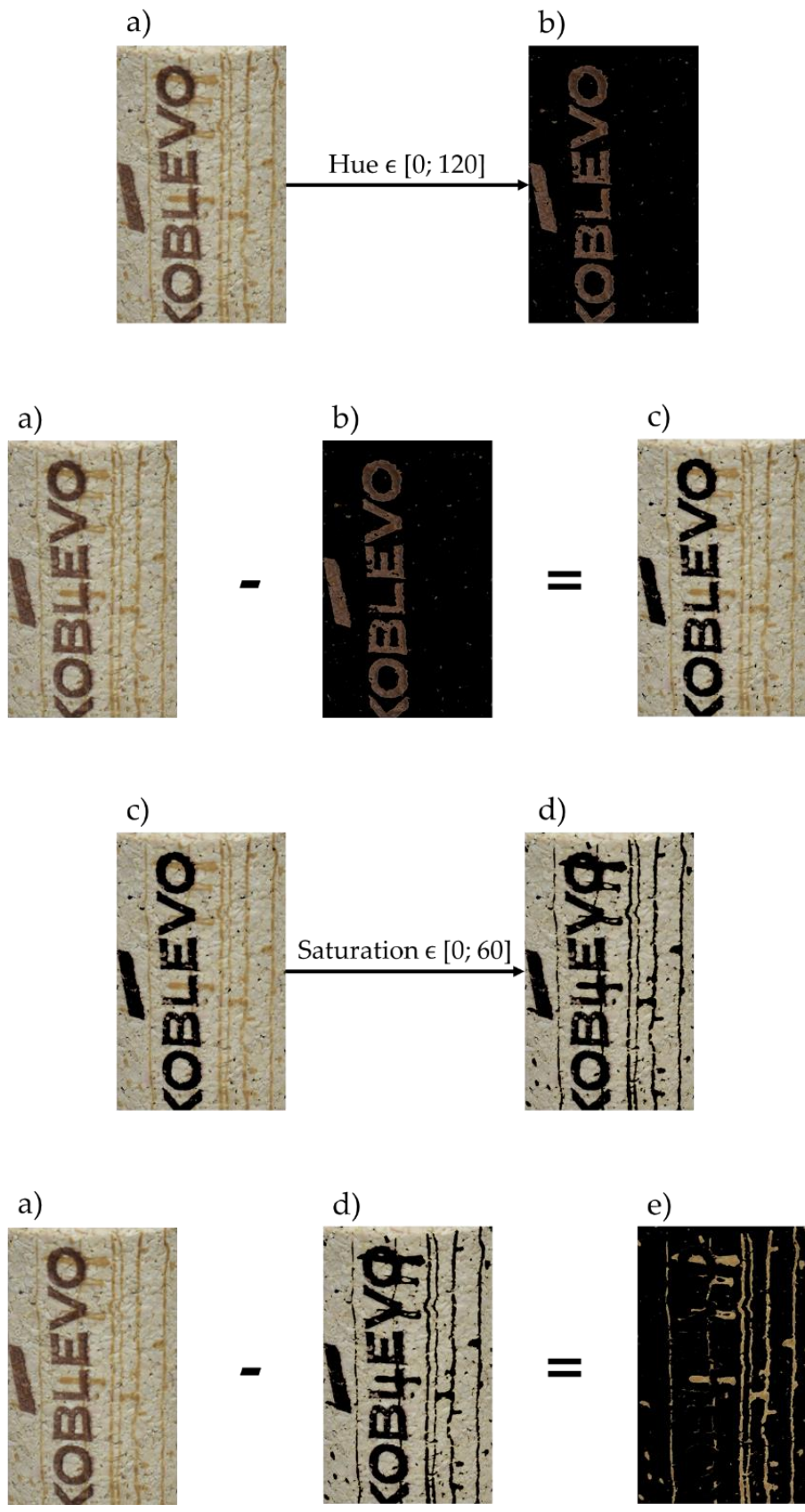


Figura 4.17 - Esquema representativo da segmentação de rolhas técnicas, onde: a) representa a face da rolha, b) a marca impressa, c) a face sem marca impressa, d) a face sem marcas e e) a dupla marcação

### 4.1.3. Quantização das imagens

A caracterização da cor das diferentes secções de cada rolha é feita com recurso às estratégias de quantização abordadas na secção 2.5. A secção referida denota também algumas das desvantagens das diferentes estratégias, que serão agora demonstradas no contexto do trabalho desenvolvido.

Para efeitos de comparação, o número de cores pretendido para a paleta de cores foi estabelecido como o mínimo comum a todas as estratégias, equivalente a 8 cores, excetuando o caso particular da estratégia da Moda do Histograma que, como referido na secção 2.5.6, devolve apenas uma cor representativa. Para as restantes estratégias, a cor representativa foi calculada como sendo a média das coordenadas de cor no espaço R'G'B'.

A face da rolha analisada está indicada na imagem b) da Figura 4.18. Esta tem 2 741 981 pixéis e 8 306 cores distintas.

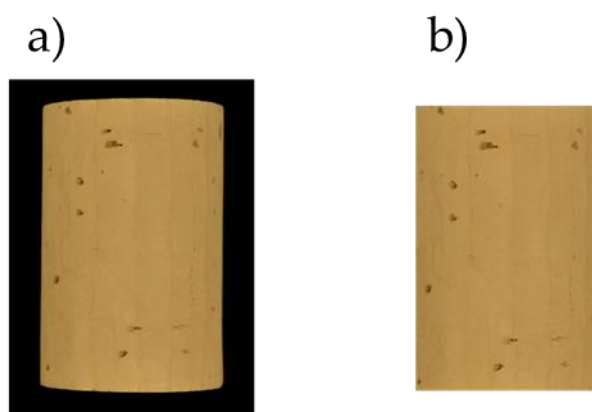


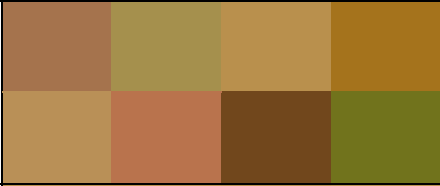
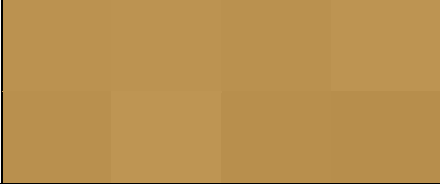

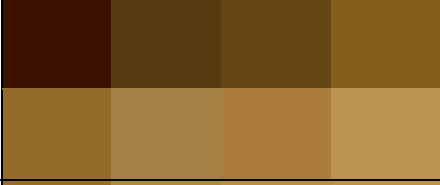
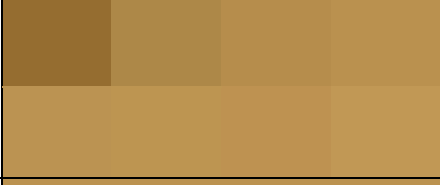

Figura 4.18 - Rolha utilizada para demonstrar os resultados das estratégias de quantização, onde:  
a) representa a totalidade da rolha e b) a face analisada

É de notar que este subcapítulo trata apenas de apresentar os resultados visuais de cada um dos algoritmos e comparar brevemente a qualidade das paletes de cores formadas. Neste contexto, uma paleta de boa qualidade seria uma onde todas as cores aparentam existir na rolha.

A secção 4.5.1 é onde as estratégias são analisadas e comparadas, após uma análise detalhada e com uma maior ênfase em tempos de execução e variabilidade observável na caracterização da cor.

Sendo assim, a Tabela 4.1 representa resumidamente os resultados obtidos pelas estratégias implementadas na quantização da imagem b) da Figura 4.18.

Tabela 4.1 - Resultados da quantização da face de uma rolha pelas diferentes estratégias de quantização

Estratégia	Paleta de cores	Cor representativa
<b>Quantização Uniforme</b>		L* = 65,9 a* = 6,20 b* = 37,2
<b>Popularidade</b>		L* = 66,8 a* = 5,92 b* = 36,7
<b>Median Cut</b>		L* = 65,9 a* = 5,93 b* = 37,1
<b>MinMax</b>		L* = 48,1 a* = 8,33 b* = 34,2
<b>K-Means</b>		L* = 65,2 a* = 5,88 b* = 37,1
<b>Moda do Histograma</b>		L* = 66,9 a* = 6,05 b* = 37,6

A Tabela 4.1 indica claramente que tanto a estratégia da Quantização Uniforme como a MinMax devolvem paletes de má qualidade, o que é particularmente evidente no caso da Quantização Uniforme, onde a paleta apresenta pelo menos 5 cores distintas de qualquer tom que aparente estar presente na face da rolha. Este é o efeito referido na secção 2.5.1, onde foi ilustrado que as cores na paleta resultam apenas da combinação das médias das diferentes regiões, não sendo necessariamente associadas a pixéis na imagem, e, como tal, podem não ser uma boa representação de cores que existam efetivamente na rolha. Todavia, estas foram ainda utilizadas na obtenção da cor representativa, e, uma vez que as coordenadas  $L^*a^*b^*$  desta são próximas das indicadas pelas restantes estratégias, pode ser dito que a Quantização Uniforme devolve resultados aceitáveis, apesar da fraca qualidade da paleta num contexto convencional de quantização e reconstrução de imagens.

Já no caso da estratégia MinMax, a paleta é formada apenas com cores que pertencem à face da rolha. Porém, uma vez que estas são escolhidas a partir das cores mais distantes do seu centroide inicial, a paleta é efetivamente constituída pelos casos extremos, englobando tanto os tons mais escuros como os mais claros, mas com uma predisposição para tons mais escuros, uma vez que estes são os que apresentam uma maior diferença colorimétrica. Como tal, a média das cores na paleta resulta numa cor representativa notavelmente mais escura do que a apresentada por outras estratégias de quantização, particularmente quando os poros não são devidamente removidos. Assim, a cor indicada pela estratégia MinMax na Tabela 4.1 não deve ser considerada como uma verdadeira cor representativa da rolha.

A presença dos poros na imagem b) da Figura 4.18 produz um efeito mais notável no caso da estratégia MinMax, mas também tem influência sobre as cores nas paletas formadas pelas restantes estratégias, à exceção da estratégia da Popularidade e da Moda do Histograma. Como demonstrado pela Tabela 4.1, todas as estratégias, excetuando as duas referidas, têm pelo menos uma cor na paleta que é notoriamente mais escura que as restantes, que seria a cor que melhor representa a dos poros, de acordo com a estratégia em questão. Como consequência, a cor representativa da rolha para as quatro estratégias, e que resulta da média das cores na paleta, apresenta-se mais escura do que a cor representativa nas duas restantes, o que é demonstrado pelo valor mais baixo para a coordenada  $L^*$ .

Então, o potencial benefício da estratégia da Popularidade e da Moda do Histograma é evidente. Em situações onde a rolha seja excessivamente porosa, onde os poros não tenham sido devidamente segmentados ou onde a marca impressa ocupe uma área considerável da superfície da rolha, estas duas devem ser as estratégias consideradas para a caracterização da cor, uma vez que seriam as únicas cujas cores representativas não seriam afetadas pelas cores mais escuras dos poros ou da marca.

#### 4.1.4. Cálculo da distância colorimétrica

A distância colorimétrica é tida como a distância entre a cor representativa de cada uma das rolhas na imagem e a cor padrão para o tipo de lavação analisado, cujas coordenadas estão presentes na base de dados. Como indicado na Figura 4.1, esta é calculada pela métrica  $\Delta E_{00}$ .

Tendo em conta a variabilidade inerente das cores das rolhas, mesmo das pertencentes ao mesmo tipo de lavação, seria inapropriado classificar como inaceitáveis aquelas que estão apenas acima do limite de perceptibilidade de  $\Delta E_{00} = 1,30$  indicado na secção 2.4, uma vez que o método deve acomodar alguma margem para a diferença entre cores. Portanto, a tomada de decisões pela distância colorimétrica deve ser feita com base num limite de aceitabilidade.

Assim que for determinado um limite apropriado, a distância colorimétrica poderia ser utilizada para indicar as rolhas cuja distância ao padrão é superior ao limite imposto. As rolhas aceitáveis estariam delineadas a verde no painel de utilizador, e as inaceitáveis a vermelho, como exemplificado na Figura 4.19.

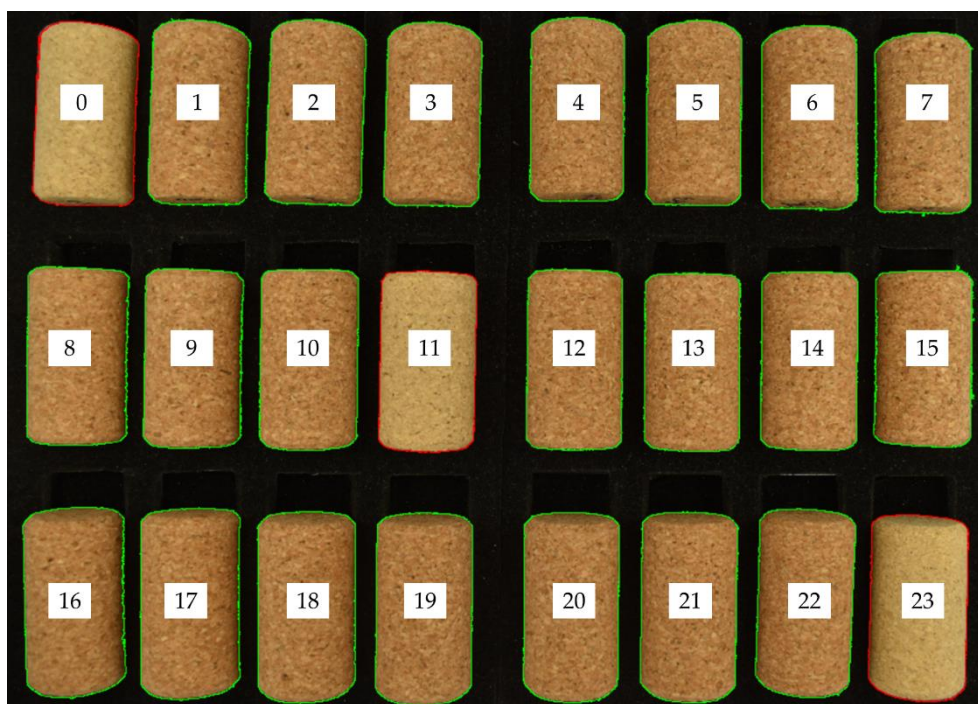


Figura 4.19 - Exemplo da tomada de decisões por cálculo da distância colorimétrica ao padrão Clean 0

A Figura 4.19 ilustra um conjunto de 21 rolhas Clean 0 e 3 rolhas Clear, as rolhas 0, 11 e 23. Dentro do conjunto Clean 0, a distância máxima ao padrão pré-estabelecido é de  $\Delta E_{00} = 1,71$ . A distância entre rolhas Clear e o padrão Clean 0 é superior a  $\Delta E_{00} = 6,50$ . Então, com o limite de aceitabilidade indicado na Figura 4.2, de 4 unidades, é possível distinguir corretamente as rolhas Clear, que são então demarcadas a vermelho.

O valor de 4 unidades pode ser demasiado leniente para ser considerado como um verdadeiro limite de aceitabilidade para rolhas de lavação Clean 0, tendo sido utilizado apenas para exemplificar a tomada de decisões com base na distância colorimétrica. A aplicação correta desta funcionalidade, num contexto intra-lavagem, requer a determinação de limites de aceitabilidade apropriados, através da comparação extensa entre coordenadas de rolhas padrão e de rolhas que estejam no limiar do que é considerado como aceitável para um observador humano. Ou seja, requer a recolha de coordenadas colorimétricas e a observação visual de um elevado número de rolhas, para cada tipo de lavagem.

#### 4.1.5. Representação das coordenadas de cor

A representação visual das coordenadas de cor das rolhas fotografadas pode ser feita por meio de diagramas de extremos e quartis, como os indicados na Figura 4.6, e que permitem representar a variabilidade dentro de cada coordenada colorimétrica.

A Figura 4.6 ilustra ainda uma forma alternativa de representar a variabilidade da amostra, através da representação das coordenadas no espaço CIE  $L^*a^*b^*$ . Para isto, uma vez que o LabVIEW não possui nenhuma forma convencional de apresentar a posição de um determinado número de pontos no interior de um espaço de cores, foi considerada uma outra

abordagem com base numa imagem pré-construída para este propósito em particular, e numa série de estratégias para sobrepor pontos sobre a imagem.

No exemplo apontado pela Figura 4.6, as coordenadas de cor de cada rolha são representadas de acordo com a sua posição no espaço CIE  $L^*a^*b^*$ . Contudo, se o utilizador seleccionar "Sim" na opção "Representar em relação a um padrão?", indicada na Figura 4.2, as coordenadas podem igualmente ser representadas em termos da sua diferença ao padrão estabelecido para o tipo de lavação analisado. Se for este o caso, a imagem resultante seria a indicada pela Figura 4.20.

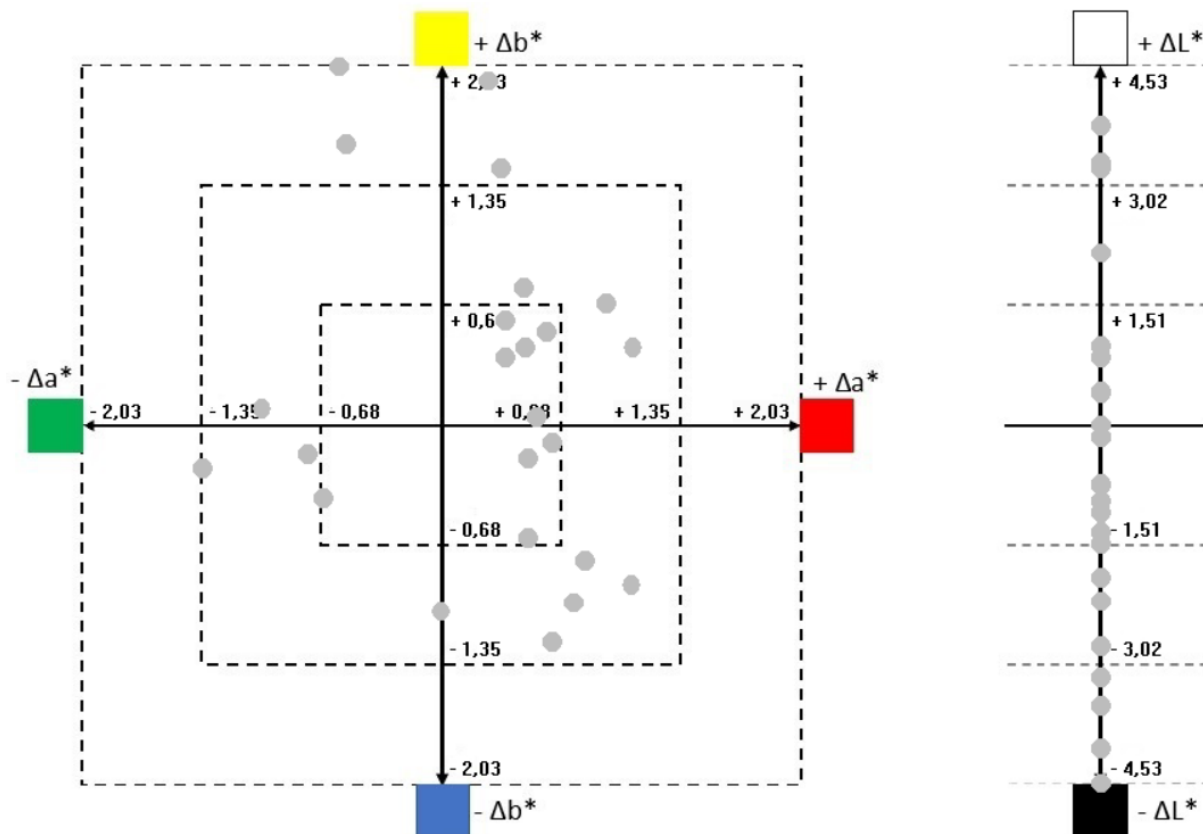


Figura 4.20 - Representação das coordenadas de cor em termos da diferença entre a cor de cada rolha e o padrão para a lavação Clean C, este sendo  $L^*a^*b^* = (69,6, 8,27, 26,1)$

A representação no espaço CIE  $L^*a^*b^*$  pode ainda ser utilizada para comparar visualmente os resultados de diferentes lavações e a dispersão relativa entre rolhas de cada tipo, atendendo que não haja variabilidade excessiva dentro das amostras. No exemplo indicado pela Figura 4.21 são representadas 5 rolhas com lavações Clean 0, N101, Clean 2000 e Light, e as posições que estas ocupam no espaço de cores.

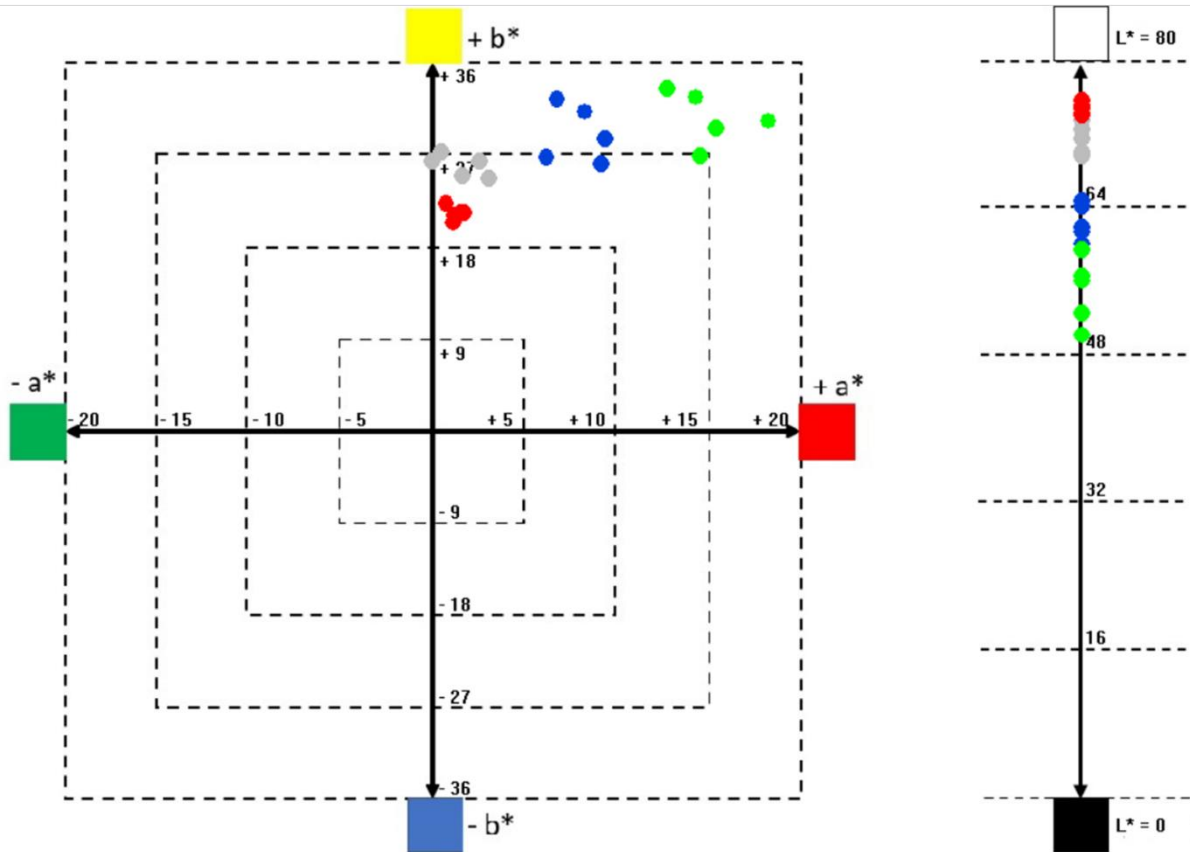
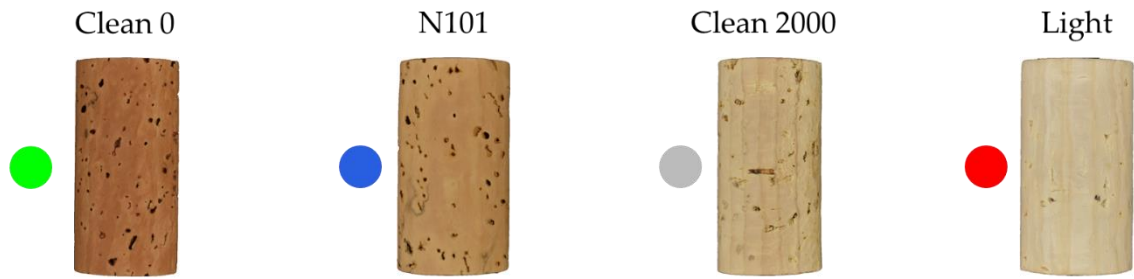


Figura 4.21 - Uso do espaço de cores CIE  $L^*a^*b^*$  na representação das coordenadas de cor de rolhas de diferentes lavagens

## 4.2. Desenvolvimento do método

No desenvolvimento do método, utilizou-se uma rolha natural, a mesma que foi posteriormente empregue para a validação do método, e foram realizados testes com o propósito de determinar quais as condições de operação ideais para a aquisição de imagens.

Primeiramente, procurou-se confirmar a estabilidade da iluminação no interior da cabine de luz, na premissa de que se a intensidade luminosa proveniente das fontes de iluminação, das lâmpadas LED, oscilasse significativamente com o tempo, então isto iria impactar a cor das rolhas. Para testar esta possibilidade, a rolha teste foi fotografada a partir do momento em que a cabine é ligada, em intervalos de 10 minutos e durante 90 minutos, e caracterizada quanto à sua cor, com os resultados representados na Figura 4.22. Simultaneamente, foi também empregue o luxímetro para registar a iluminância numa posição fixa da cabine, igualmente de 10 em 10 minutos.

0 min	10 min	20 min	30 min	40 min
L* = 71,2	L* = 67,7	L* = 66,7	L* = 66,7	L* = 66,5
a* = 5,52	a* = 6,08	a* = 6,82	a* = 6,82	a* = 6,29
b* = 38,7	b* = 34,1	b* = 32,6	b* = 32,6	b* = 32,5

50 min	60 min	70 min	80 min	90 min
L* = 66,3	L* = 66,3	L* = 66,3	L* = 66,3	L* = 65,9
a* = 6,75	a* = 6,48	a* = 6,48	a* = 6,48	a* = 6,41
b* = 32,2	b* = 32,1	b* = 32,1	b* = 32,1	b* = 31,6

Figura 4.22 - Evolução das cores representativas da rolha ao longo do tempo de operação da cabine

Como demonstrado pela Figura 4.22, quando a rolha é fotografada imediatamente após as lâmpadas LED da cabine serem ligadas, a cor resultante é notoriamente distinta da verificada após apenas 10 minutos. A figura denota ainda que, ao longo do tempo de operação considerado, existe um decréscimo gradual nos valores de L\* e b\*.

Assumindo que fotografar a mesma face da rolha num curto intervalo de tempo não provoca diferenças significativas, algo que será posteriormente confirmado nos testes 1 e 2 da secção 4.3.1, então pode ser presumido que a variação observada é, de alguma forma, consequência do relativamente longo tempo entre fotografias.

Dito isto, o único fator que pode sofrer alterações ao longo do tempo de operação da cabine, e que impactaria a cor da rolha, é a intensidade luminosa por área de superfície da mesma, ou seja, a iluminância. Assim, os resultados da medição desta, com o luxímetro, foram representados em conjunto com os valores para L\*, a\* e b\*, ao longo do tempo de teste.

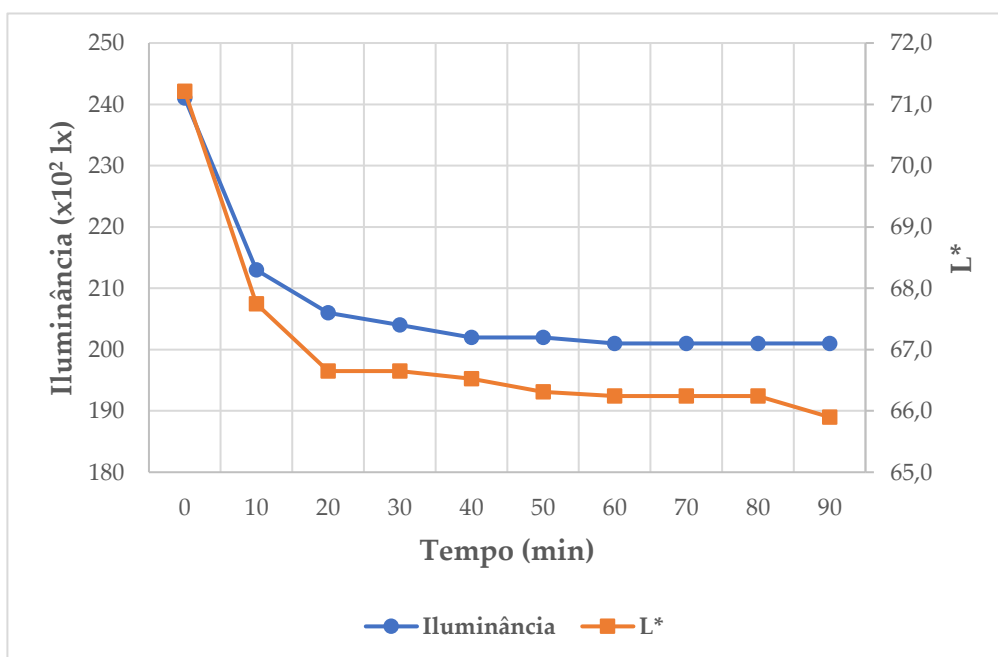


Figura 4.23 - Representação da iluminância e coordenada colorimétrica L\*, em função do tempo

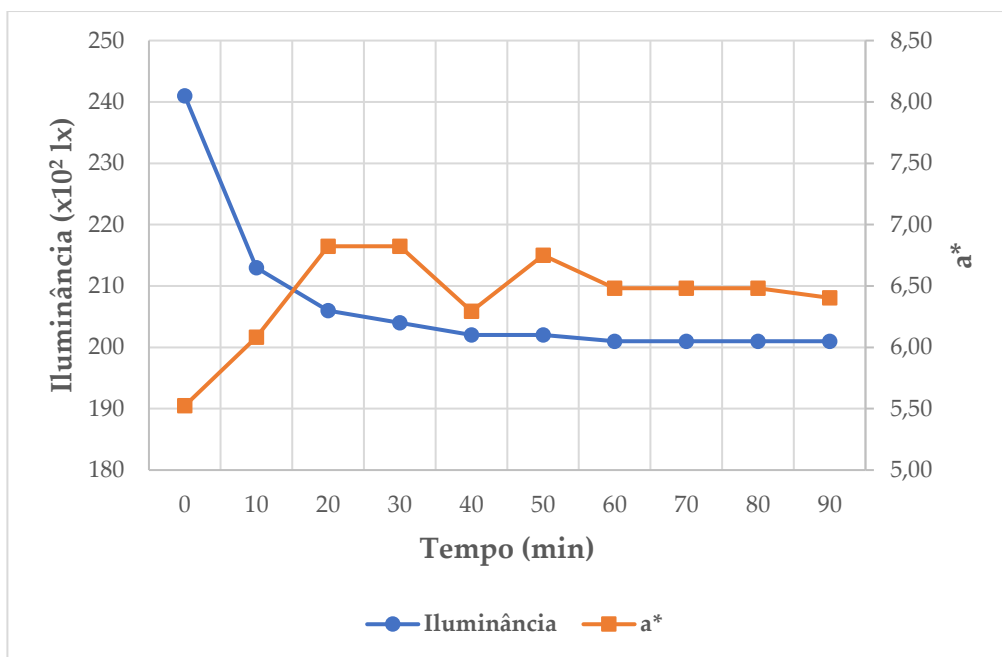


Figura 4.24 - Representação da iluminância e coordenada colorimétrica  $a^*$ , em função do tempo

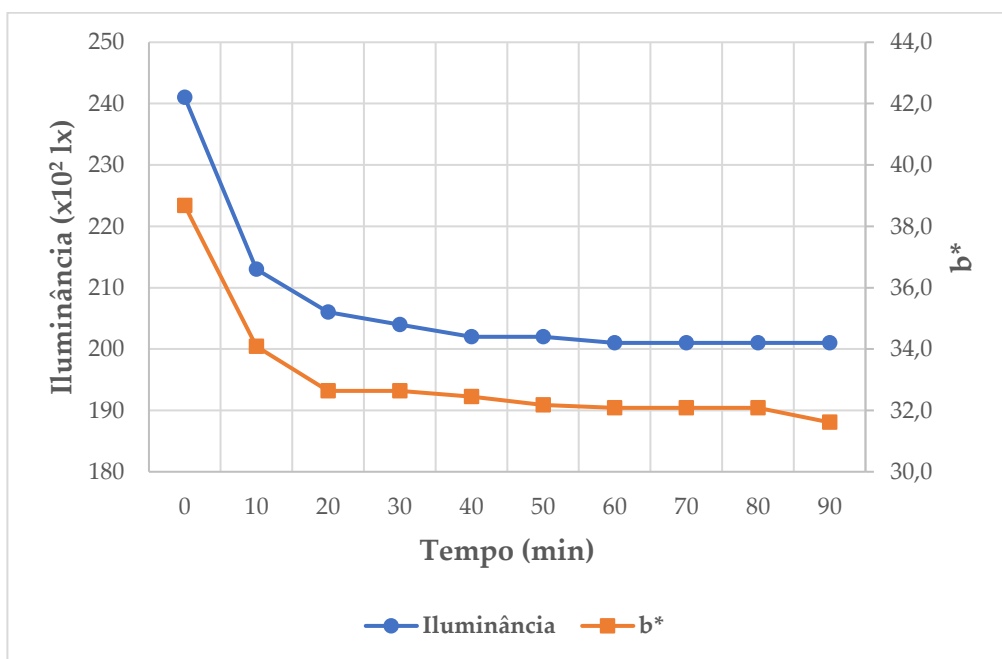


Figura 4.25 - Representação da iluminância e coordenada colorimétrica  $b^*$ , em função do tempo

A representação gráfica dos valores de iluminância permite concluir que esta diminui progressivamente dentro dos primeiros 60 minutos, até atingir o que aparenta ser um estado estacionário, aos 20 100 lx. Aqui, é importante delinear que, e como referido na secção 3.1, uma vez que a faixa de medição é entre os 20 000 lx e 100 000 lx, a resolução do luxímetro é de apenas 100 lx, e, portanto, é possível que estejam a ocorrer variações abaixo dos 100 lx e que não são detetadas pelo aparelho.

Na secção 3.1 foi também referido que as lâmpadas utilizadas são do tipo LED. Uma das principais vantagens destas, quando comparadas com lâmpadas incandescentes,

fluorescentes ou outras, é o facto de atingirem imediatamente o brilho máximo no momento em que são ligadas<sup>[83], [84]</sup>. Contudo, um estudo conduzido na literatura indicou que, de entre 5 tipos de lâmpadas LED estudadas, todas verificavam uma diminuição no fluxo luminoso em 25 000 horas de funcionamento, e 3 destas 5 sofriam variações notáveis dentro das primeiras horas, inclusive lâmpadas da mesma marca e temperatura que as utilizadas, lâmpadas Osram com temperatura de 6 500 K<sup>[85]</sup>.

Tem-se então que os dados indicados pelo luxímetro aparentam estar em concordância com o observado para a maior parte das lâmpadas analisadas na literatura, ou seja, a iluminância resultante das lâmpadas é inversamente proporcional ao tempo de operação, sendo, portanto, máxima no momento em que estas são ligadas.

No que toca à relação entre a iluminância e as coordenadas colorimétricas, os valores recolhidos para  $L^*$  e para  $b^*$  apresentam a mesma correlação positiva forte com os valores da iluminância, com  $R = 0,996$  e  $R^2 = 0,992$ . Isto é evidente por análise da Figura 4.23 e Figura 4.25, onde é notável que ambas as coordenadas seguem a tendência verificada para a iluminância. Já a relação com  $a^*$ , Figura 4.24, não é tão notória, com um  $R = -0,824$  e  $R^2 = 0,679$ .

Assim, esta experiência permite concluir que, a partir do momento inicial em que a cabine é ligada, a iluminância tende a diminuir, partindo do seu valor máximo, e, como consequência, a cor aparente da rolha fica progressivamente mais escura,  $L^*$  mais baixo, e mais azul,  $b^*$  mais baixo, (ver Figura 2.8). O impacto em  $a^*$  menos evidente, mas aparenta ser inversamente proporcional até certo ponto. Quando é atingindo o estado estacionário para a iluminância, aos 60 minutos, os valores das coordenadas colorimétricas estabilizam.

Para o objetivo de controlo de qualidade da cor das rolhas, pode não ser irrealista requerer um tempo de espera de 60 minutos até ao início das primeiras análises, de modo a permitir que a iluminância atinja o aparente estado estacionário. Contudo, isto não é estritamente necessário, uma vez que a variação na cor é mais evidente nos primeiros 10 minutos, e menos notória a partir dos 20 minutos. A distância  $\Delta E_{00}$  entre as coordenadas colorimétricas para  $t = 10$  min e  $t = 90$  min é  $\Delta E_{00} = 1,35$ , enquanto a distância entre as coordenadas para  $t = 20$  min e  $t = 90$  min é  $\Delta E_{00} = 0,562$ , abaixo de qualquer limite de perceptibilidade. Como tal, pode ser benéfico iniciar operações a partir dos 20 minutos, ao invés de 60 minutos, dependendo do nível de escrutínio nos limites de aceitabilidade impostos.

Então, esta experiência permitiu concluir que, antes de serem iniciadas operações com a cabine de luz, é necessário um tempo de espera de, pelo menos, 20 minutos. Esta convenção foi adotada nos restantes testes realizados, inclusive os referentes à validação do método, na secção 4.3.

Numa experiência posterior, procurou-se determinar se ter a porta da cabine aberta ou fechada provoca diferenças notáveis nas coordenadas colorimétricas. Para isto, a rolha foi fotografada com a porta da cabine aberta e fechada, na 1<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 8<sup>a</sup> coluna de cada uma das 3 filas, resultando, portanto, num total de 18 fotografias. As cores representativas resultantes são indicadas na Figura 4.26, e a distância colorimétrica entre pares de uma mesma fila é indicada na Tabela 4.2.

	1ª coluna		4ª coluna		8ª coluna	
	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Aberta
1ª fila	L* = 64,8 a* = 5,84 b* = 33,3	L* = 63,1 a* = 5,52 b* = 33,4	L* = 66,3 a* = 6,75 b* = 32,2	L* = 64,8 a* = 6,51 b* = 32,0	L* = 66,9 a* = 6,78 b* = 32,3	L* = 66,5 a* = 6,29 b* = 32,5
2ª fila	L* = 66,9 a* = 6,37 b* = 32,9	L* = 65,0 a* = 6,52 b* = 34,3	L* = 67,0 a* = 6,78 b* = 32,3	L* = 65,6 a* = 6,58 b* = 32,8	L* = 70,4 a* = 5,95 b* = 34,0	L* = 69,3 a* = 6,12 b* = 34,0
3ª fila	L* = 62,1 a* = 6,13 b* = 32,2	L* = 59,6 a* = 6,09 b* = 32,4	L* = 64,4 a* = 6,95 b* = 31,9	L* = 62,6 a* = 6,51 b* = 32,8	L* = 66,5 a* = 6,29 b* = 32,5	L* = 65,6 a* = 6,58 b* = 32,8

Figura 4.26 - Cores representativas para uma rolha nas diferentes filas e colunas, com a porta da cabine de luz aberta e fechada

Tabela 4.2 - Distância  $\Delta E_{00}$  entre os pares de cores representativas para uma rolha nas diferentes filas e colunas, com a porta da cabine de luz aberta e fechada

Fila	1ª coluna	4ª coluna	8ª coluna
1ª	0,756	0,640	0,450
2ª	0,954	0,640	0,446
3ª	1,09	0,955	0,432

Como ilustrado na Figura 4.26, em todas as filas e ao longo das 3 colunas consideradas, a cor representativa da rolha é influenciada pelo estado da porta. Se esta estiver aberta, a cor representativa é sempre mais escura do que quando a porta está fechada. A distância  $\Delta E_{00}$  entre pares indica também que quanto mais próxima a rolha estiver da última coluna, ou seja, quanto mais longe estiver da porta, menor é a diferença entre cores representativas. Em contraste, quanto mais próxima esta estiver da porta, maior a diferença entre cores representativas.

Tendo em conta que o interior da cabine é branco, a conclusão lógica dita que ter a porta aberta diminui o efeito de reflexão da luz na cabine e, conseqüentemente, resulta em cores representativas mais escuras para a rolha. Esta conclusão é suportada pelos resultados do luxímetro, que indicam que, quando a porta está aberta, a iluminância é, em média, 1 100 lx mais baixa. Então, embora a diferença entre cores representativas possa não ser particularmente significativa, dependendo do limite de aceitabilidade imposto, os resultados aqui apontados indicam que, na presente versão da cabine de luz, as rolhas devem ser fotografadas com a porta fechada.

No decorrer desta experiência, foi também observado um fenómeno merecedor de particular atenção. Como demonstrado na Figura 4.26, a cor da rolha apresenta tons distintos entre as diferentes filas e, inclusive, entre diferentes colunas na mesma fila. A tendência observada aparenta indicar que, para um mesmo estado da porta, aberta ou fechada, as cores representativas são sempre mais escuras na primeira coluna, e ficam progressivamente mais claras ao longo da fila, atingindo, portanto, uma luminosidade máxima na última coluna, com o maior valor de  $L^*$ . Isto sugere que existe uma variação notável na iluminância ao longo das diferentes posições do suporte, o que, se existir, seria um indicador de que a luz não é igualmente distribuída ao longo da cabine. Para confirmar esta hipótese, foi concebido um teste na validação do método, o teste 4 na secção 4.3.1, que aprofunda sobre esta assunção.

Após ter-se verificado que é necessário o tempo de espera de pelo menos 20 minutos, e que as fotografias devem ser tiradas com a porta da cabine fechada, procedeu-se então à determinação dos parâmetros ideais para a máquina fotográfica. Para isto, foi novamente realizado o ponto branco da máquina, sobre as condições referidas, e foi empregue a paleta de cores padrão mencionada na secção 3.2.

Os parâmetros ideais de funcionamento da câmara, em termos de velocidade de obturador, abertura e ISO, foram determinados iterativamente como sendo aqueles que devolvessem a menor média das distâncias colorimétricas, de acordo com a métrica  $\Delta E_{00}$ , entre as 24 coordenadas colorimétricas devolvidas pelo método e as 24 coordenadas tabeladas na paleta padrão. Isto é, os valores escolhidos foram aqueles que permitiram a melhor correspondência visual entre as cores devolvidas pelo método e as cores reais. Deste procedimento resultou que a velocidade do obturador deve ser estabelecida como  $1/320$  s, a abertura da câmara como  $f/5,6$  e o ISO como 100.

A distância focal é outro parâmetro manualmente ajustável na máquina fotográfica, podendo assumir valores entre 18 mm a 55 mm, isto para a objetiva utilizada, referida na secção 3.1 e que vem com o modelo base Nikon D3500. Esta é diretamente responsável pelo nível de ampliação, pelo *zoom*, sendo que quanto maior a distância focal, maior o nível de ampliação<sup>[86]</sup>. Contudo, na versão atual do protótipo, a distância focal deve ser mantida fixa, aos 24 mm, uma vez que este é o nível de ampliação máximo que permite fotografar a totalidade do suporte, e uma distância focal menor significaria menos pixels para caracterizar cada rolha.

Em suma, as diferentes experiências conduzidas permitiram concluir que, para o funcionamento correto do método, quaisquer fotografias devem ser captadas, no mínimo, 20 minutos após a cabine ser ligada, com a porta fechada e com a velocidade do obturador, abertura, ISO e distância focal da máquina fotográfica estabelecidos como  $1/320$  s,  $f/5,6$ , 100 e 24 mm, respetivamente.

### 4.3. Validação do método

Pelos motivos expostos na secção 4.2, os testes de avaliação indireta e direta foram realizados sobre as condições determinadas como ideias para o funcionamento do método.

#### 4.3.1. Avaliação indireta

Para avaliação indireta, foram realizados os testes previamente mencionados na secção 3.2, e relembrados abaixo, cujos resultados encontram-se sumariamente representados na Tabela 4.3.

- Testes de repetibilidade:
  - Teste 1: fotografar a rolha em rápida sucessão (10 vezes);
  - Teste 2: fotografar a rolha, retirá-la do suporte e voltar a colocar na mesma posição (10 vezes);
  - Teste 3: fotografar diferentes faces da rolha (10 vezes);
  - Teste 4: fotografar a rolha nas 24 posições do suporte para faces.
- Testes de precisão intermédia:
  - Teste 5: utilizar outro operário, outra pessoa, para efetuar a caracterização da cor da rolha (10 vezes);
  - Teste 6: fotografar a rolha em diferentes dias (10 vezes).
- Teste de robustez:
  - Teste 7: fotografar a rolha sobre diferentes condições de focagem (10 vezes).

Tabela 4.3 - Resumo dos resultados obtidos para os diferentes testes direcionados à avaliação indireta do método

Teste	Intervalo para coordenadas colorimétricas (coeficiente de variação)		
	L*	a*	b*
<b>Repetibilidade</b>			
1	66,8±0,2 (0,156%)	6,91±0,44 (3,21%)	32,8±0,3 (0,406%)
2	66,9±0,1 (0,117%)	6,82±0,33 (2,44%)	32,6±0,6 (0,957%)
3	66,5±1,4 (1,06%)	7,05±0,80 (5,78%)	33,3±0,8 (1,25%)
4	66,4±3,7 (2,82%)	6,11±0,87 (7,53%)	32,6±1,3 (1,98%)
<b>Precisão intermédia</b>			
5	66,6±1,1 (0,806%)	6,56±0,42 (3,28%)	32,7±0,7 (1,12%)
6	67,4±1,4 (1,05%)	6,26±0,49 (4,83%)	32,7±0,9 (1,43%)
<b>Robustez</b>			
7	66,5±0,3 (0,215%)	7,04±0,47 (3,37%)	32,6±0,4 (0,570%)

Se os valores indicados na Tabela 4.3 forem sujeitos aos mesmos padrões que os expectáveis de um método analítico num laboratório de análises químicas então, tendo em conta que o CV em todos os casos está abaixo dos 10% recomendados pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), pode ser dito que o método se mostrou repetível, robusto e devolveu resultados aceitáveis de precisão intermédia para todos os testes<sup>[76]</sup>.

A Tabela 4.3 denota também que os testes que induziram, consistentemente, a maior variação nas coordenadas colorimétricas foram os testes 3 e 4, direcionados ao estudo da re-  
petibilidade.

Sobre o teste 3, ao fotografar outras faces é expectável que existam diferenças nas coordenadas colorimétricas, uma vez que a rolha não é homogénea em termos de cor. Contudo, a variabilidade observada não é agreste o suficiente para resultar em cores claramente distintas.

Os resultados do teste 3 foram ainda comparados com os fornecidos pela DEP, referentes à caracterização da cor por meio do colorímetro. Com este, foram caracterizadas 10 rolhas, com 6 picagens por rolha, e foram calculadas as médias dos CV para  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , resultantes da caracterização de cada uma das rolhas. Estas são representadas na Tabela 4.4, em conjunto com os valores obtidos pela caracterização com o método.

Tabela 4.4 - Coeficientes de variação médios indicados pelo colorímetro e pelo método na caracterização da cor de diferentes faces de uma rolha

Método	Coeficiente de variação		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$
<b>Colorímetro</b>	3,01%	13,4%	6,47%
<b>Método</b>	1,06%	5,78%	1,25%

A Tabela 4.4 indica, portanto, que o método devolve resultados mais estáveis na caracterização da cor de uma rolha, isto devendo-se à forma como o colorímetro é empregue na recolha das coordenadas colorimétricas. Uma vez que este recolhe apenas as coordenadas de um determinado ponto na rolha, uma picagem, não há garantias de que a cor neste ponto é a mais abundante, quanto mais uma que possa ser considerada como representativa. Isto porque qualquer objeto heterogéneo pode conter entre milhares a milhões de cores diferentes e, como tal, o uso do colorímetro para fazer picagens numa rolha é análogo a escolher aleatoriamente 6 cores de entre as milhares ou milhões disponíveis, e utilizar a média destas como cor representativa. Naturalmente, tendo em conta a escolha aleatória destas 6 cores, é expectável que haja considerável variabilidade nas coordenadas colorimétricas da rolha analisada.

Em contraste, o método proposto emprega estratégias próprias para a recolha das cores mais significativas na face ou topo das rolhas. Isto implica que, mesmo quando são fotografadas diferentes faces de uma rolha, o método devolve múltiplas cores representativas com coordenadas colorimétricas muito semelhantes, ou até idênticas, o que reduz a variabilidade.

Tem-se então que o único teste, de entre os realizados, que apresenta variações que podem ser consideradas como significativas é o teste 4. Contudo, estas variações não são inesperadas, isto porque, e como referido na secção 4.2, este teste foi conduzido para aprofundar os resultados previamente observados durante a determinação do impacto resultante de fotografar a rolha com a porta do protótipo aberta e fechada.

Dito isto, as cores representativas e coordenadas colorimétricas resultantes para cada uma das 24 posições do suporte para faces são ilustradas na Figura 4.27.

L* = 65,3 a* = 5,33 b* = 33,2	L* = 67,6 a* = 5,43 b* = 33,1	L* = 66,7 a* = 5,84 b* = 32,7	L* = 66,6 a* = 6,82 b* = 32,6	L* = 66,1 a* = 5,94 b* = 31,9	L* = 65,5 a* = 6,03 b* = 32,6	L* = 66,1 a* = 5,80 b* = 32,6	L* = 66,3 a* = 5,49 b* = 32,2
L* = 65,9 a* = 6,11 b* = 33,1	L* = 68,9 a* = 5,92 b* = 32,8	L* = 68,0 a* = 5,92 b* = 32,7	L* = 66,9 a* = 6,64 b* = 33,0	L* = 67,0 a* = 6,78 b* = 32,3	L* = 68,4 a* = 6,51 b* = 33,6	L* = 70,1 a* = 5,87 b* = 33,6	L* = 70,2 a* = 5,45 b* = 33,9
L* = 61,8 a* = 6,35 b* = 31,8	L* = 64,2 a* = 5,96 b* = 32,4	L* = 64,5 a* = 5,91 b* = 32,0	L* = 64,4 a* = 6,39 b* = 31,7	L* = 64,5 a* = 6,62 b* = 31,5	L* = 65,6 a* = 6,45 b* = 32,0	L* = 67,0 a* = 6,78 b* = 32,3	L* = 65,9 a* = 6,40 b* = 31,6

Figura 4.27 - Cores representativas da face de uma mesma rolha ao longo das 24 posições do suporte para faces

Como demonstrado, a cor representativa da rolha aparenta ser impactada pela posição do suporte que esta ocupa. Quando a rolha está localizada na primeira coluna, ela apresenta uma cor distintamente mais escura do que a cor observada em posições seguintes da mesma fila, o que se traduz num valor mais baixo para a coordenada acromática  $L^*$ . Tem-se também que, quando a rolha é fotografada na segunda fila ela aparenta ser mais clara, com um valor de  $L^*$  superior, e quando é fotografada na última fila aparenta ser mais escura, valor de  $L^*$  inferior. Estes resultados estão em concordância com os observados previamente na Figura 4.26 da secção 4.2. A Figura 4.27 sugere ainda que a primeira fila aparenta ser a mais uniforme em termos de cor.

A Tabela 4.5 representa os intervalos calculados para as coordenadas colorimétricas, novamente pela regra de Chebyshev (equação (3.1)) para a primeira, segunda e terceira fila na sua totalidade, e quando são removidos os valores da primeira coluna.

Tabela 4.5 - Intervalos estabelecidos para as coordenadas colorimétricas nas diferentes filas, com e sem os valores da primeira coluna

Fila	Fila completa			Sem os valores da primeira coluna		
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$
1 <sup>a</sup>	66,3±1,3	5,84±0,88	32,6±0,8	66,4±1,2	5,91±0,85	32,5±0,7
2 <sup>a</sup>	68,2±2,9	6,15±0,85	33,1±1,0	68,5±2,5	6,16±0,90	33,1±1,0
3 <sup>a</sup>	64,7±2,8	6,36±0,56	31,9±0,6	65,1±1,9	6,36±0,59	31,9±0,6

Os valores apresentados na Tabela 4.5 corroboram o que é visualmente perceptível na Figura 4.27, e o que já foi previamente referido, ao denotar que, independentemente de se a primeira coluna é ou não considerada, quando a rolha está na segunda fila ela é, em média, mais clara e apresenta uma menor variação na sua cor. Em contraste, quando esta é fotografada na última fila, apresenta uma cor mais escura.

A Tabela 4.5 denota ainda que a coordenada  $L^*$  representa a maior fonte de variação, e confirma que há uma menor variação nas cores da primeira fila, ou seja, que estas são mais uniformes. Quando são removidos os valores da primeira coluna, e como expectável, o desvio padrão de  $L^*$  diminui.

É importante notar que o presente teste foi conduzido de forma a fotografar aproximadamente a mesma face da rolha ao longo das diferentes posições, uma vez que seria impossível garantir que é fotografada exatamente a mesma secção desta face. Assim, é expectável alguma variação nas coordenadas colorimétricas como resultado de processar diferentes ângulos da face. Tem-se também que, como indicado pelos resultados do teste 1 na Tabela 4.3, somente fotografar a mesma secção da mesma face já resulta em variações, embora reduzidas, nas coordenadas de cor. No entanto, as variações intra e inter-fila no teste 4 são maiores do que as observáveis no teste 3, onde já foram efetivamente fotografadas diferentes faces de uma rolha.

O teste 4 indica, portanto, a possibilidade da existência de um desequilíbrio na distribuição da luz no interior da cabine. Esta hipótese é corroborada por testes adicionais conduzidos com o luxímetro, que indicam diferentes resultados quando este é colocado nas diferentes posições ao longo de cada fila, com uma tendência para um aumento na iluminância ao longo das colunas, como indicado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Medições do luxímetro em diferentes colunas de cada fila

Fila	1 <sup>a</sup> coluna (x100 lx)	4 <sup>a</sup> coluna (x100 lx)	8 <sup>a</sup> coluna (x100 lx)
1 <sup>a</sup>	193	208	210
2 <sup>a</sup>	224	231	232
3 <sup>a</sup>	195	201	204

Diferenças evidentes para cores representativas entre filas, e até entre colunas da mesma fila, como as indicadas na Figura 4.27, são problemáticas porque iriam acrescentar à variabilidade observada nas coordenadas colorimétricas de amostras pertencentes aos diferentes tipos de lavação. Como consequência, e dependendo do limite de aceitabilidade imposto na etapa de tomada de decisões, pode resultar uma de duas situações:

- Se o limite de aceitabilidade for demasiado leniente, rolhas com cores não conformes que estejam localizadas em posições favoráveis, como na fila do meio, podem ser classificadas como aceitáveis;
- Se o limite de aceitabilidade for demasiado restrito, rolhas com cores conformes que estejam localizadas em posições desfavoráveis, como na primeira coluna ou na terceira fila, podem ser classificadas como inaceitáveis.

Numa tentativa de minimizar a variabilidade foram testadas outras configurações para as fontes de iluminação, com 4 lâmpadas em cada canto da cabine ou com lâmpadas de fabricantes diferentes, contudo nenhuma destas resultou em melhorias significativas. Então, e embora a variação nas coordenadas colorimétricas esteja dentro de limites aceitáveis para métodos analíticos, os resultados indicados pelo teste 4 permitem concluir que, na versão atual da cabine, a distribuição de luz no interior é o maior ponto de incerteza.

### 4.3.2. Avaliação direta

Para avaliação direta do método, foi utilizado como material de referência a paleta padrão com 24 cores referida previamente na secção 3.2, e indicada na imagem a) da Figura 4.28. Com esta, e pela mesma lógica que a empregue na identificação das rolhas na secção 4.1.1, o software identifica corretamente as regiões que englobam cada uma das cores na paleta padrão, delimitadas a verde na imagem b) da Figura 4.28. A avaliação direta pode ser repetida, como forma de validação, com o posicionamento da paleta no interior da cabine, e seleção da opção "Validar", na Figura 4.2.

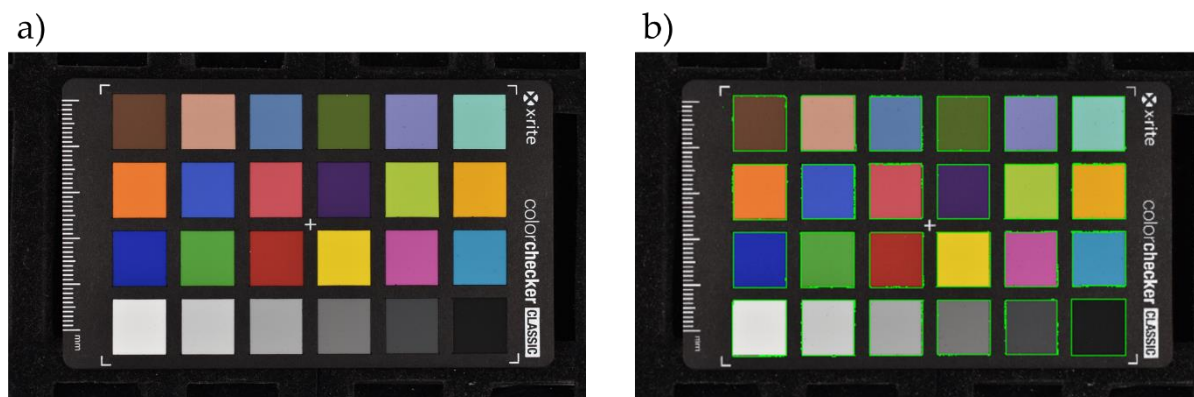


Figura 4.28 - Paleta de cores padrão utilizada para validação, onde: a) representa a fotografia original e b) a fotografia com as cores identificadas pelo software

As zonas que englobam as cores são então recortadas, para formar imagens, e processadas pelo software.

De acordo com os critérios impostos na validação de uma solução comercial com uma função semelhante, isto é, que caracteriza igualmente a cor de objetos com base em fotografias, considerou-se que as cores estão validadas quando o desvio padrão ( $\sigma$ ) da média ( $\mu$ ) das 24 distâncias colorimétricas é inferior a 5<sup>[87]</sup>. A métrica de distância escolhida é a CIEDE2000, uma vez que, e como referido na secção 2.4, esta é a recomendada pela CIE para propósitos de avaliação da distância entre cores.

Tem-se ainda que, novamente à semelhança do verificado no tratamento de rolhas, as coordenadas colorimétricas médias de cada zona são resultantes do processamento através de uma das estratégias de quantização abordadas e, portanto, há que considerar a fiabilidade da estratégia utilizada.

Os resultados da validação pelas diferentes estratégias foram ainda comparados com os indicados pelo colorímetro, quando este é igualmente aplicado para retirar as coordenadas colorimétricas das cores na paleta padrão. Estes resultados encontram-se representados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Valor médio e desvio padrão das distâncias CIEDE2000 entre as 24 cores na paleta padrão e os resultados devolvidos pelas estratégias de quantização e pelo colorímetro (1/2)

	Quantização Uniforme	Popularidade	Median Cut
$\mu$	2,52	2,52	2,49
$\sigma$	1,34	1,37	1,34

Tabela 4.7 - Valor médio e desvio padrão das distâncias CIEDE2000 entre as 24 cores na paleta padrão e os resultados devolvidos pelas estratégias de quantização e pelo colorímetro (2/2)

	MinMax	K-Means	Moda do Histograma	Colorímetro
$\mu$	3,46	2,45	2,50	3,67
$\sigma$	1,92	1,42	1,35	1,65

Como indicado, e independentemente da estratégia de quantização escolhida, tanto o método como o colorímetro apresentam um desvio padrão,  $\sigma$ , abaixo do limite imposto de 5 unidades e, como tal, podem ser considerados como validados, de acordo com os critérios estabelecidos para a solução comercial referida. Tem-se também que, à exceção dos da estratégia MinMax, os valores devolvidos pelas diferentes estratégias são semelhantes entre si e, portanto, qualquer uma destas pode ser utilizada para validação.

Os resultados indicados na Tabela 4.7 sugerem ainda que, independentemente da estratégia de quantização utilizada, novamente excetuando a MinMax, o método desenvolvido é mais exato e mais preciso do que o colorímetro. Mais exato porque devolve cores mais próximas das cores reais, o que é confirmado pelas menores médias para a distância colorimétrica, e mais preciso porque tem um menor desvio padrão para estas mesmas médias.

A estratégia MinMax apresenta a maior média e desvio padrão, de entre as 6 estratégias implementadas, devido às razões expostas na secção 4.1.3, onde foi referido que as cores representativas nesta são as mais distantes do centroide inicial, o que aumenta a variação das coordenadas colorimétricas.

Os resultados da avaliação direta demonstram ainda uma oportunidade para melhoria do método proposto, isto porque, e apesar deste poder ser visto como validado de acordo com o critério estabelecido, os valores médios das distâncias colorimétricas estão claramente acima do limite de perceptibilidade de 1,30 para a distância CIEDE2000, referido na secção 2.4. Assim, é seguro dizer que, em média, as cores devolvidas pelo método são notoriamente distintas das cores reais, embora sejam visualmente mais próximas do que as indicadas pelo colorímetro.

Outra consideração importante é a posição da paleta padrão na cabine de luz. No teste 4, da secção 4.3.1, foi concluído que a cor da rolha é influenciada pela sua posição no suporte. Como tal, é lógico assumir que as coordenadas devolvidas para a paleta padrão seriam igualmente influenciadas pela posição ocupada pela mesma.

A paleta ocupa aproximadamente 4 colunas de cada fila do suporte para faces, ou seja, ocupa meia fila. Então, para validação das coordenadas nas diferentes posições, esta foi fotografada 2 vezes por cada fila do suporte, na 1ª e 2ª metade de cada uma das 3 filas, para um total de 6 fotografias. A estratégia de quantização utilizada foi a da Popularidade, e o valor médio e desvio padrão das 24 distâncias colorimétricas é representado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Valor médio e desvio padrão das distâncias CIEDE2000 entre as 24 cores na paleta padrão e os resultados indicados em cada metade de cada fila do suporte

Fila	1ª metade		2ª metade	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
1ª	2,49	1,31	2,60	1,33
2ª	2,56	1,35	2,65	1,32
3ª	2,75	1,29	2,70	1,25

A Tabela 4.8 indica que, à semelhança do verificado no teste 4, existe alguma variação nas coordenadas colorimétricas intra e inter-fila. Isto deve em parte ser associado ao ato de fotografar a paleta num curto intervalo de tempo, o que, como verificado no teste 1 e teste 2 da secção 4.3.1, provoca uma ligeira variação nas coordenadas colorimétricas e como tal iria afetar os resultados da métrica CIEDE2000.

No entanto, mesmo sobre estas condições, os resultados devolvidos encontram-se abaixo do limite de 5 unidades imposto para o desvio padrão. Sendo assim, apesar da diferença de cores indicada pelo teste 4, pode ser concluído que as coordenadas colorimétricas devolvidas pelo software são válidas para qualquer posição do suporte, se este estiver sujeito ao mesmo nível de escrutínio que o da solução comercial referida. Tem-se também que, tendo em conta que os valores da média e desvio padrão mantêm-se inferiores, as coordenadas colorimétricas são ainda mais exatas e precisas do que as indicadas pelo colorímetro.

A validação com a paleta padrão pode ainda ser utilizada para garantir que o protótipo continua a funcionar corretamente. Se este for implementado no terreno, ao efetuar a validação 1 vez por dia, por exemplo, e representar o valor obtido para a média e/ou desvio padrão numa carta de controlo, o utilizador consegue verificar se o método se encontra dentro de controlo estatístico. Caso não se encontre, isto seria uma indicação de que o protótipo deve ser enviado para manutenção.

#### 4.4. Base de dados de Rolhas de Cortiça

A base de dados foi construída, após validação, com as amostras de rolhas referidas na secção 3.3, e o IC para as coordenadas colorimétricas médias dos diferentes tipos de lavação estabelecido de acordo com a equação (3.2), e indicado abaixo na Tabela 4.9.

É importante relembrar que, e como demonstrado na Figura 4.3, qualquer uma das coordenadas padrão indicadas pode ser editada na aba da "Configuração".

Tabela 4.9 - Cores representativas e IC (95%) para as médias das coordenadas colorimétricas de diferentes tipos de rolhas e lavações (1/2)














Tipo de Rolha	Lavação	Padrão	N° de	
			Rolhas	Lotes
Natural	Clean 0 	$L^* = 59,0 \pm 0,5$ $a^* = 13,7 \pm 0,3$ $b^* = 29,3 \pm 0,2$	288	6
	Clean 2000 	$L^* = 73,2 \pm 0,3$ $a^* = 1,77 \pm 0,23$ $b^* = 26,3 \pm 0,3$	269	6
	Clean C 	$L^* = 69,6 \pm 0,2$ $a^* = 8,27 \pm 0,07$ $b^* = 26,1 \pm 0,1$	876	18
	Light 	$L^* = 77,5 \pm 0,3$ $a^* = 0,703 \pm 0,109$ $b^* = 20,7 \pm 0,2$	287	6
	N101 	$L^* = 65,0 \pm 0,3$ $a^* = 8,22 \pm 0,21$ $b^* = 28,4 \pm 0,2$	384	8
	Nature 	$L^* = 65,4 \pm 0,7$ $a^* = 9,26 \pm 0,41$ $b^* = 31,2 \pm 0,4$	48	1
	Pré-Light 	$L^* = 75,8 \pm 0,4$ $a^* = 0,908 \pm 0,202$ $b^* = 22,8 \pm 0,4$	172	4

Tabela 4.9 - Cores representativas e IC (95%) para as médias das coordenadas colorimétricas de diferentes tipos de rolhas e lavações (2/2)

Tipo de Rolha	Lavação	Padrão	N° de	
			Rolhas	Lotes
Neutrocork	Clean 0 	$L^* = 57,5 \pm 0,3$ $a^* = 13,7 \pm 0,2$ $b^* = 28,3 \pm 0,2$	163	5
	Clean 2000 	$L^* = 76,8 \pm 0,3$ $a^* = -0,761 \pm 0,127$ $b^* = 21,9 \pm 0,3$	110	3
	Clear 	$L^* = 70,0 \pm 0,1$ $a^* = 2,88 \pm 0,07$ $b^* = 26,6 \pm 0,1$	930	28
	Nature 	$L^* = 68,2 \pm 0,5$ $a^* = 9,30 \pm 0,21$ $b^* = 29,8 \pm 0,2$	44	1
Twin Top	Clean 2000 	$L^* = 76,4 \pm 0,6$ $a^* = -0,144 \pm 0,233$ $b^* = 22,9 \pm 0,5$	33	1
	Clear 	$L^* = 65,6 \pm 0,3$ $a^* = 6,20 \pm 0,20$ $b^* = 27,9 \pm 0,2$	204	6

## 4.5. Tempos de execução

As fotografias, o *input* para o software, têm uma resolução equivalente à da máquina fotográfica, de 24,78 MP. Após a etapa inicial de identificação das rolhas, o LabVIEW processa apenas as imagens correspondentes à face ou topo de cada rolha na imagem inicial.

Quando são fotografadas 24 faces, ou 40 topos, cada rolha é caracterizada por centenas de milhares de pixels e, portanto, o número total de pixels analisados é, em média, entre 8 a 12 milhões por imagem com 24 faces, e 5 a 7 milhões por imagem com 40 topos, dependendo do tamanho das rolhas na amostra. Para a caracterização da cor das 24 faces apresentadas na imagem "Rolhas Naturais", da Figura 4.4, por exemplo, o software processou 10 731 542 pixels.

Isto serve como indicação da quantidade de dados que teriam de ser processados por cada conjunto de rolhas, o que, naturalmente, impacta o tempo total necessário para a recolha das coordenadas colorimétricas. No entanto, se o objetivo é efetuar a caracterização da cor da forma mais expedita possível, é importante considerar o tempo de execução de todas as etapas descritas na Figura 4.1.

O tempo necessário para a realização das etapas externas descritas, quer na captura de 24 faces quer na captura de 40 topos, é entre 40 segundos e 1 minuto, contudo pode ser dito que este é inevitável para qualquer sistema que caracterize as cores das rolhas em modo descontínuo, uma vez que seria sempre necessário organizar rolhas nalgum tipo de suporte, de modo a facilitar a captura de imagens, fotografá-las e selecionar opções como o tipo de rolha ou tipo de lavação.

Existem determinadas melhorias que poderiam ser feitas para reduzir o tempo destas etapas, como a aquisição de uma máquina compatível com o LabVIEW. Esta iria permitir implementar um botão para fotografar as rolhas, diretamente no painel de utilizador, evitando assim o ato de carregar fisicamente no disparador da máquina. As fotografias resultantes seriam também analisadas sem a necessidade de selecionar o diretório ou a imagem a processar.

No que compete às etapas realizadas pelo software, indicadas a azul na Figura 4.1, o tempo médio necessário para cada encontra-se representado na Tabela 4.10, indicativa da caracterização da cor de 24 faces, e na Tabela 4.11, referente à caracterização da cor de 40 topos. As etapas estão apresentadas de forma sequencial, como demonstradas na Figura 4.1, ou seja:

1. Identificação das rolhas;
2. Segmentação das rolhas;
3. Quantização das imagens;
4. Cálculo da distância colorimétrica ( $\Delta E_{00}$ );
5. Representação das coordenadas de cor.

Tabela 4.10 - Tempo médio necessário para a execução das etapas realizadas pelo software na caracterização da cor de 24 faces

Etapa	1	2	3	4	5	Total
Tempo	6,28E-1 s	1,65 s	2,41E-2 s a 2 min e 32 s	1,80E-3 s	2,50E-2 s	2,33 s a 2 min e 34 s

Tabela 4.11 - Tempo médio necessário para a execução das etapas realizadas pelo software na caracterização da cor de 40 topos

Etapa	1	2	3	4	5	Total
<b>Tempo</b>	4,92E-1 s	2,21 s	2,31E-2 s a 1 min e 24 s	1,50E-3 s	2,20E-2 s	<b>2,32 s a 1 min e 27 s</b>

Para recolha dos resultados apresentados foram desativadas determinadas opções indicadas na Figura 4.2, não críticas para a obtenção das coordenadas de cor, tais como a reconstrução das imagens originais ou a construção dos histogramas de cores para cada uma das rolhas. Em suma, os valores apresentados correspondem ao tempo estritamente necessário para a caracterização da cor de 24 faces ou 40 topos de rolhas de cortiça naturais, sem marcação, e para segmentação dos poros.

Ambas as tabelas indicam que o tempo total necessário para a caracterização da cor das 24 faces ou 40 topos varia entre meros segundos a minutos. A causa principal desta variação vem da etapa 3, de quantização das imagens por meio de uma das estratégias implementadas, uma vez que diferentes estratégias possuem tempos de execução distintos.

No entanto, não basta apenas escolher como ideal a estratégia mais expedita, isto porque, como demonstrado nas secções 2.5 e 4.1.3, as diferentes estratégias devolvem cores representativas distintas. A escolha da estratégia ideal, para um determinado objetivo, será abordada com maior detalhe na secção 4.5.1.

#### 4.5.1. Comparação das estratégias de quantização

Na secção 4.3.2 foi demonstrado que todas as estratégias devolvem cores cujas coordenadas colorimétricas podem ser consideradas como válidas, sem diferenças significativas nos resultados, excetuando os da estratégia MinMax. Contudo a secção 4.1.3 denota também que estas não são igualmente apropriadas para a caracterização da cor da face de uma rolha, particularmente quando os poros ou marcas não foram devidamente segmentados.

Tem-se então que, uma vez que as coordenadas colorimétricas são válidas independentemente da estratégia escolhida, a estratégia de quantização ideal, de entre as 6, deve ser uma que ofereça um equilíbrio entre resultados aceitáveis na caracterização da cor de uma rolha e tempo necessário para a execução da mesma. Isto porque, e como indicado na Tabela 4.10 e Tabela 4.11, a etapa de quantização das imagens, a etapa 3, pode ser a mais morosa na caracterização da cor de 24 faces ou 40 topos, dependendo da estratégia escolhida.

Então, para permitir a comparação entre as diferentes estratégias, a Tabela 4.12 indica o tempo ocupado por cada uma na caracterização da cor de 24 faces. Nesta, as estratégias estão organizadas por ordem decrescente, da mais lenta à mais rápida.

Tabela 4.12 - Tempo médio necessário para a execução de cada uma das diferentes estratégias na caracterização da cor de 24 faces

K-Means	Median Cut	Quantização Uniforme	MinMax	Popularidade	Moda do Histograma
2 min e 32 s	11,1 s	10,0 s	3,03 s	1,98 s	2,41E-2 s

A estratégia K-Means apresenta-se como significativamente mais lenta do que qualquer outra estratégia implementada. Uma vez que esta não oferece benefícios óbvios na caracterização da cor das rolhas de cortiça, pode ser concluído que não é apropriada para o objetivo pretendido.

O mesmo pode ser dito das estratégias Median Cut e da Quantização Uniforme. Estas podem ser classificadas como intermédias, em termos de tempo, mas tendo em conta que, e como demonstrado na Tabela 4.1, sofrem da mesma desvantagem que a estratégia K-Means, em termos de devolverem cores representativas influenciadas pelas cores mais escuras na imagem, são igualmente inapropriadas.

Como esperado, a estratégia MinMax é mais lenta do que a da Popularidade, dado que a solução discutida na secção 2.5.4, a de escolher como centroide inicial a cor mais frequente de cada imagem, de forma a minimizar a variabilidade da estratégia, implica a construção do histograma de cores completo para cada face. Isto significa que o tempo de execução do algoritmo é essencialmente o tempo de execução da estratégia base somado ao tempo de execução da estratégia da Popularidade. Tem-se também que, e novamente como exposto pela Tabela 4.1, a estratégia MinMax é a pior em termos do efeito que as cores mais escuras na imagem têm sobre a cor representativa final. Então, esta é também inadequada para a caracterização expedita e objetiva da cor das rolhas.

Os resultados indicados na Tabela 4.1 e Tabela 4.12 ditam, portanto, que a estratégia da Popularidade e a da Moda do Histograma são as mais apropriadas para a caracterização da cor das rolhas de cortiça, tanto de forma objetiva como expedita. Estas são as mais rápidas e as únicas que não são influenciadas pelas cores mais escuras dos poros ou da marcação.

Tendo em conta que a estratégia da Moda do Histograma requer a construção de um histograma de cores para cada uma das coordenadas R'G'B', poderia ser lógico assumir que esta iria ser pelo menos 3 vezes mais lenta que a da Popularidade. Tomando como exemplo a imagem b) da Figura 4.18, esta tem 2 741 981 pixéis, logo o algoritmo tem de processar  $2\,741\,981 \times 3 = 8\,225\,943$  valores R'G'B', enquanto a estratégia da Popularidade processa apenas os pixéis. No entanto, e como referido na secção 2.2, um pixel é definido por 32 bits, e cada coordenada R'G'B' é codificada por apenas 8 bits. Realizar operações sobre valores codificados em 8 bits, que ocupam  $\frac{1}{4}$  do espaço em memória, é mais expediente do que fazer o mesmo sobre valores codificados em 32 bits. Por este motivo, a estratégia da Moda do Histograma é 99% mais rápida do que a da Popularidade.

Uma desvantagem da estratégia da Moda do Histograma é que esta não garante que a cor resultante da junção das modas dos picos R'G'B' é uma que exista na imagem da face da rolha, enquanto a estratégia da Popularidade recolhe ativamente as 8 cores mais frequentes na imagem, e devolve a cor representativa que resulta da média destas.

Contudo, uma vez que ambas as estratégias devolvem cores indistinguíveis, e por vezes idênticas, a decisão de escolher uma em vez da outra depende somente do objetivo e do nível de escrutínio imposto. Para monitorização e controlo do processo, onde podem ser analisadas dezenas de imagens, centenas de rolhas, de uma só vez, utilizar a estratégia da Moda do Histograma seria benéfico, uma vez que esta é a mais económica em termos de tempo. Por outro lado, em aplicações onde seja necessário um maior escrutínio sobre as coordenadas colorimétricas, como em ensaios de investigação, a estratégia da Popularidade seria a mais apropriada.

## **4.6. Casos de estudo**

Durante o desenvolvimento deste trabalho, a equipa da DEP sugeriu diversos casos de estudo, com o propósito de determinar as limitações do método e os potenciais benefícios da sua aplicação. O presente capítulo trata da descrição do objetivo e resultados obtidos para cada um destes casos.

### **4.6.1. Segmentação do boleado nas rolhas**

O boleado é a zona próxima das arestas no topo e na base de cada rolha que, por vezes, pode assumir uma cor mais clara como resultado do processo de topejamento, na etapa de retificação dimensional (ver Figura 1.1). Uma vez que é de interesse garantir que a cor da rolha é a mais homogénea possível, diferenças notáveis entre a cor do corpo ou topo e a cor do boleado devem ser evitadas.

Com a imposição de limites apropriados, o software consegue segmentar e caracterizar a cor destas secções. Esta funcionalidade é exemplificada na Figura 4.29, onde o boleado é corretamente isolado em 4 rolhas, com as cores representativas médias e coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  representadas na Tabela 4.13.

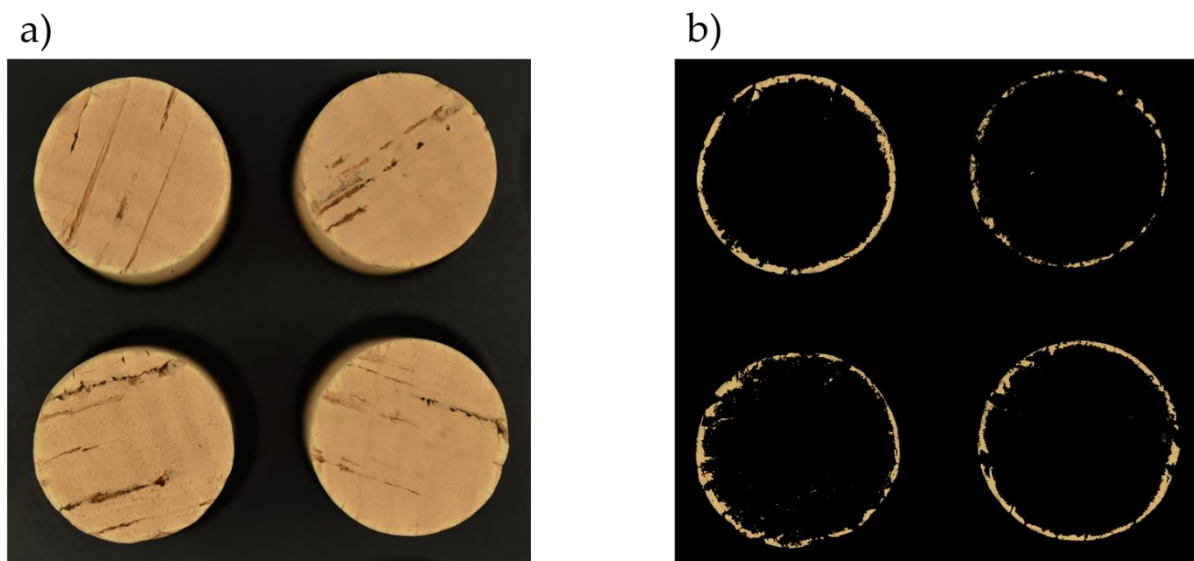


Figura 4.29 - Segmentação do boleado em rolhas naturais, onde: a) representa o topo na sua totalidade e b) o boleado segmentado

Tabela 4.13 - Cores representativas e coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  médias para o topo das rolhas naturais e para o boleado, e distância  $\Delta E_{00}$  entre elas

Topo das rolhas	Boleado	$\Delta E_{00}$
$L^* = 67,7$ $a^* = 10,3$ $b^* = 31,6$	$L^* = 74,2$ $a^* = 5,93$ $b^* = 35,0$	4,77

A Tabela 4.13 indica que existe uma diferença evidente entre as coordenadas colorimétricas médias, com um  $\Delta E_{00} = 4,77$ , permitindo confirmar que o processo de isolar o boleado do topo das rolhas, como demonstrado na Figura 4.29, devolve resultados apropriados.

Contudo, esta operação não pode ser considerada como estável. Os limites são demasiado restritos para aplicação consistente, e qualquer variação remove ou acrescenta pixéis que podem ou não pertencer ao boleado, isto para as rolhas exemplo fornecidas.

Para segmentar o boleado na Figura 4.29, foi utilizado o espaço HSL e os limites  $H \in [26; 255]$ ,  $S \in [0; 93]$  e  $L \in [135; 255]$ . Os resultados da segmentação do topo de 11 rolhas com estes e com outros limites são indicados na Figura 4.30. Testes realizados confirmam que o canal da tonalidade, H, é o mais eficiente para discernir a diferença de cor no boleado e, portanto, este foi o alterado na obtenção das diferentes imagens.

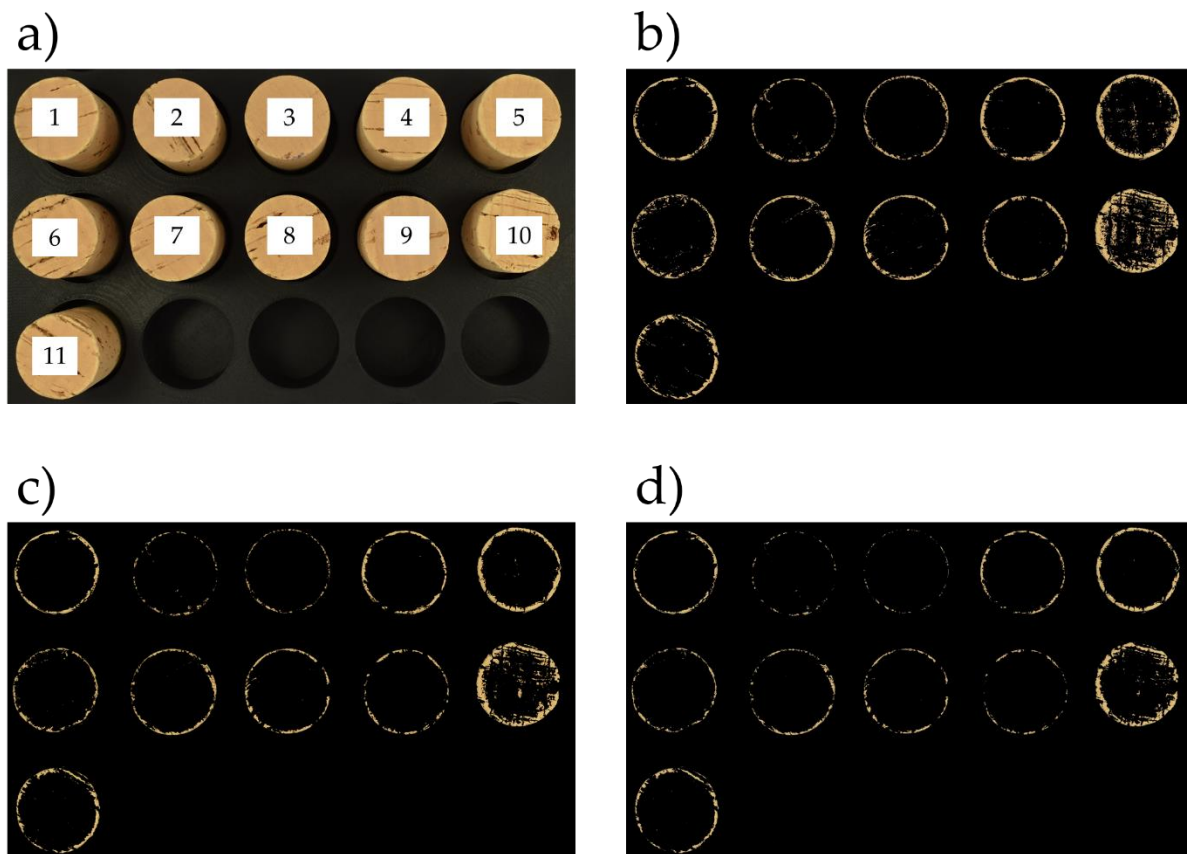


Figura 4.30 - Segmentação do boleado em 11 rolhas, onde: a) representa a imagem original, b) a imagem sujeita aos limites  $H \in [26; 255]$ ,  $S \in [0; 93]$  e  $L \in [135; 255]$ , c) a imagem sujeita aos limites  $H \in [27; 255]$ ,  $S \in [0; 93]$  e  $L \in [135; 255]$  e d) a imagem sujeita aos limites  $H \in [28; 255]$ ,  $S \in [0; 93]$  e  $L \in [135; 255]$

Como demonstrado, os limites que devolvem uma segmentação apropriada para a Figura 4.29 não isolam devidamente o boleado da rolha 10, na imagem b) da Figura 4.30. Uma vez que alguns dos pixels que definem a cor do topo desta continuam visíveis, estes iriam influenciar a cor representativa que, supostamente, representaria o boleado da rolha em questão.

Incrementos mínimos de 1 unidade na coordenada H, dos quais resultam as imagens c) e d), permitem remover alguns dos pixels que caracterizam os topos, sendo que, na imagem d), o boleado da rolha já está adequadamente isolado. Contudo, este aumento de apenas duas unidades no limite imposto para a tonalidade é suficiente para remover parte da informação de cor em algumas das restantes rolhas, particularmente nas rolhas 2, 3 e 9, que apresentam comparativamente poucos pixels que possam ser utilizados para definir as cores dos boleados.

Assim, com o presente caso de estudo pode ser concluído que, embora o método possa ser utilizado para isolar a cor do boleado nas rolhas, esta funcionalidade deve ser empregue com particular atenção. Idealmente, de modo a garantir uma segmentação apropriada para todas ou para a maior parte das rolhas, o utilizador teria de alterar manualmente os limites de cada uma das fotografias onde a cor do boleado fosse de interesse, ou arriscar a inclusão de parte da cor dos topos.

Para tomar ainda algum proveito desta funcionalidade, poderia ser imposto um único limite, para cada tipo de lavação, e estabelecidas como inaceitáveis, ou merecedoras de análise particular, rolhas cujos boleados apresentassem um determinado número de pixels pertencentes ao limite imposto. Se, após imposição do limite, a imagem que define o boleado de uma dada rolha tivesse um número reduzido de pixels, então a conclusão seria que a cor do boleado, se este existir, é semelhante ou indistinguível da cor do topo. Em contraste, se uma rolha tiver demasiados pixels na imagem que representaria o boleado, então esta deve ser analisada para verificar a existência de diferenças notáveis.

#### 4.6.2. Diferenciar rolhas de lotes distintos

Foram fornecidas duas amostras de rolhas classificadas como R10S, 6 rolhas naturais e 6 rolhas técnicas, e duas amostras de rolhas classificadas como SF, com 6 rolhas naturais e 11 rolhas técnicas. O propósito era avaliar a diferença de cores na marcação entre rolhas R10S e SF do mesmo tipo.

A olho nu, as amostras aparentavam ser visualmente distintas, com as rolhas SF a apresentarem frequentemente uma marca impressa mais desvanecida, particularmente no caso das rolhas naturais.

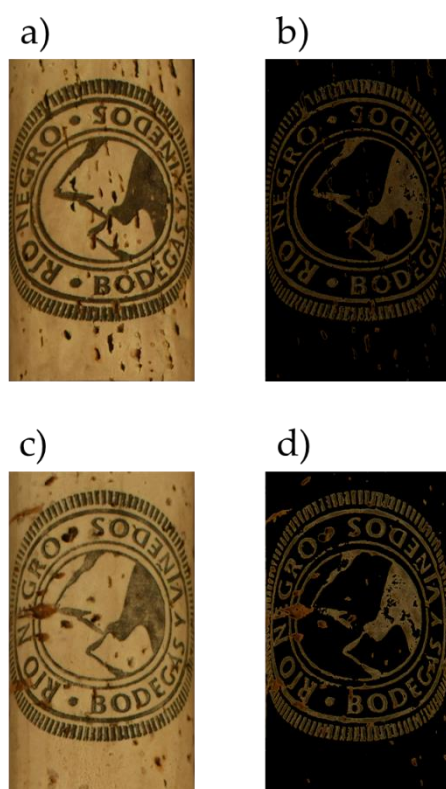


Figura 4.31 - Exemplo das faces e marcas de rolhas naturais R10S e SF, onde: a) representa a face de uma rolha R10S, b) a marca de uma rolha R10S, c) a face de uma rolha SF e d) a marca de uma rolha SF



Figura 4.32 - Exemplo das faces e marcas de rolhas técnicas R10S e SF, onde: a) representa a face de uma rolha R10S, b) a marca de uma rolha R10S, c) a face de uma rolha SF e d) a marca de uma rolha SF

As amostras foram analisadas pelo método para recolha das coordenadas colorimétricas. Uma vez que as rolhas SF aparentam ter uma marca mais desvanecida, é expectável que estas apresentem um tom mais claro. Se for este o caso, as marcas destas rolhas devem, em média, ter valores superiores para a coordenada acromática de luminosidade,  $L^*$ , no espaço CIE  $L^*a^*b^*$ . Assim, optou-se por representar os valores da coordenada acromática em função dos valores de ambas as coordenadas cromáticas,  $a^*$  e  $b^*$ .

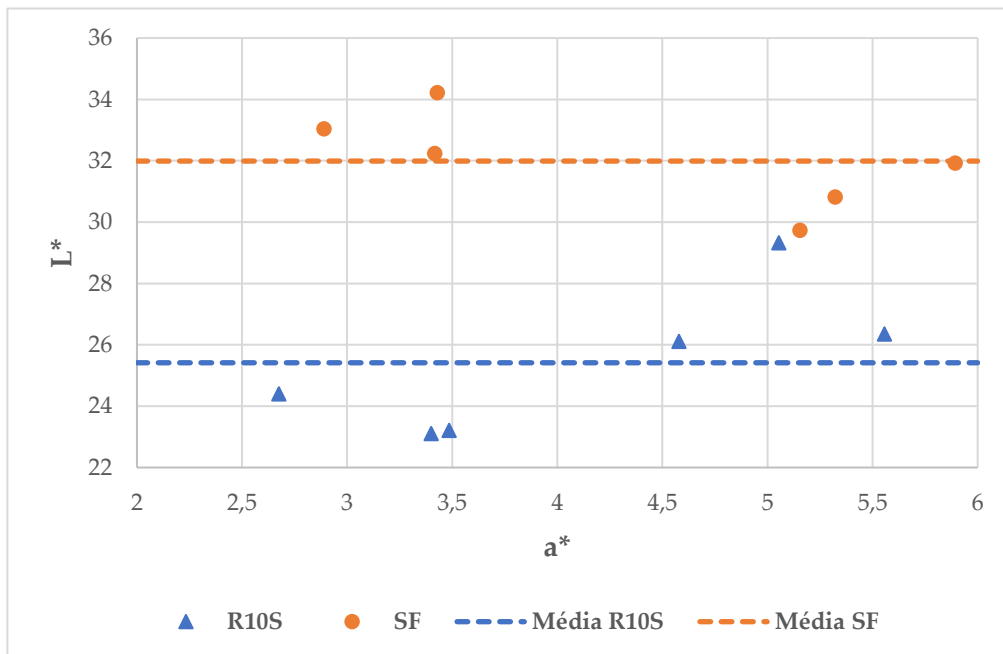


Figura 4.33 -  $L^*$  em função de  $a^*$  para a marcação das rolhas naturais R10S e SF

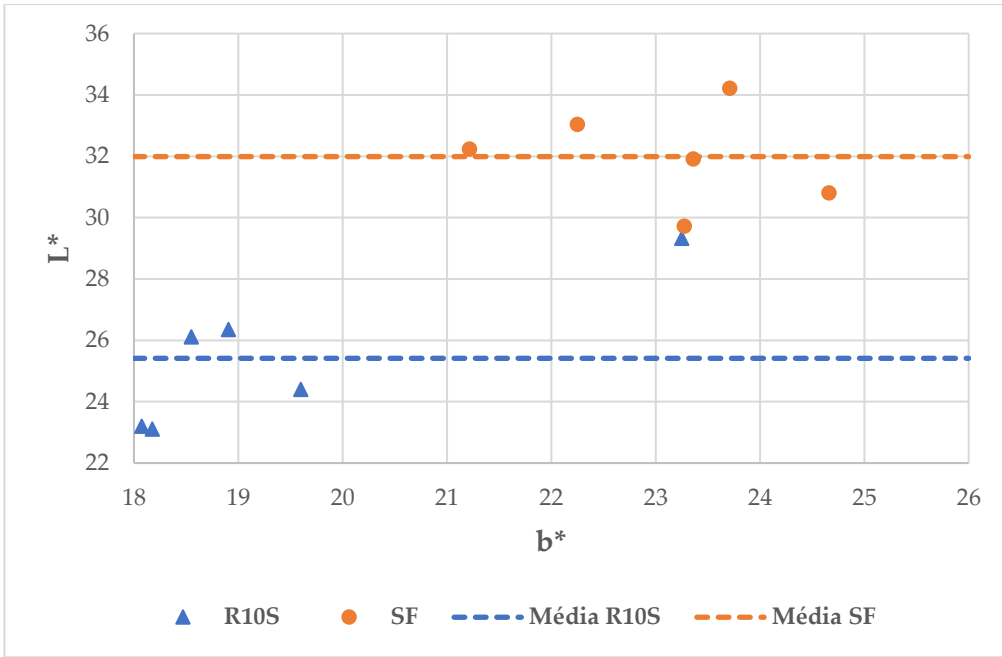


Figura 4.34 - L\* em função de b\* para a marcação das rolhas naturais R10S e SF

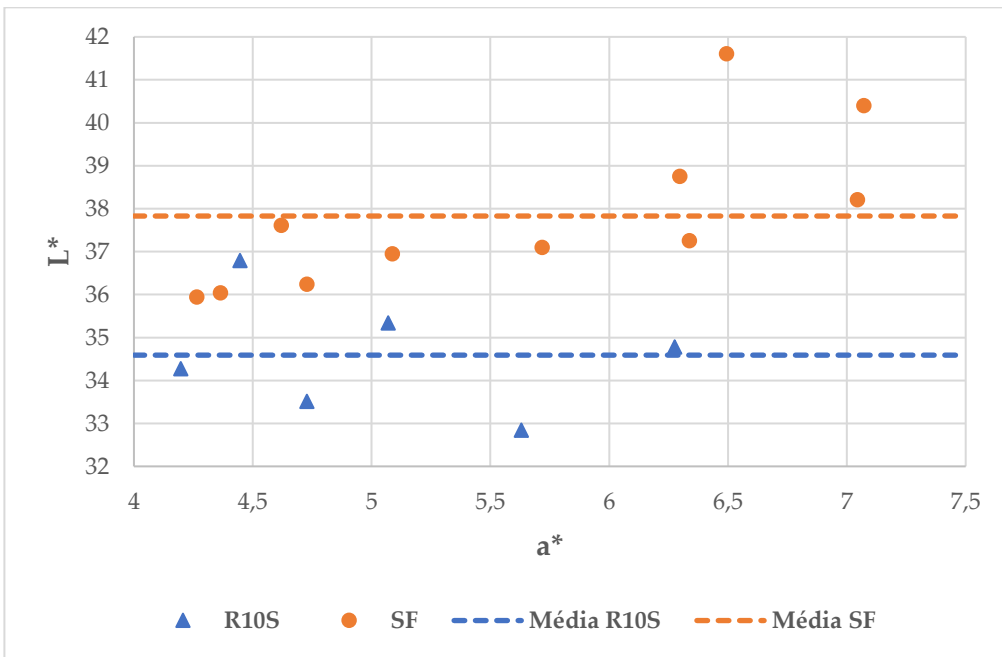


Figura 4.35 - L\* em função de a\* para a marcação das rolhas técnicas R10S e SF

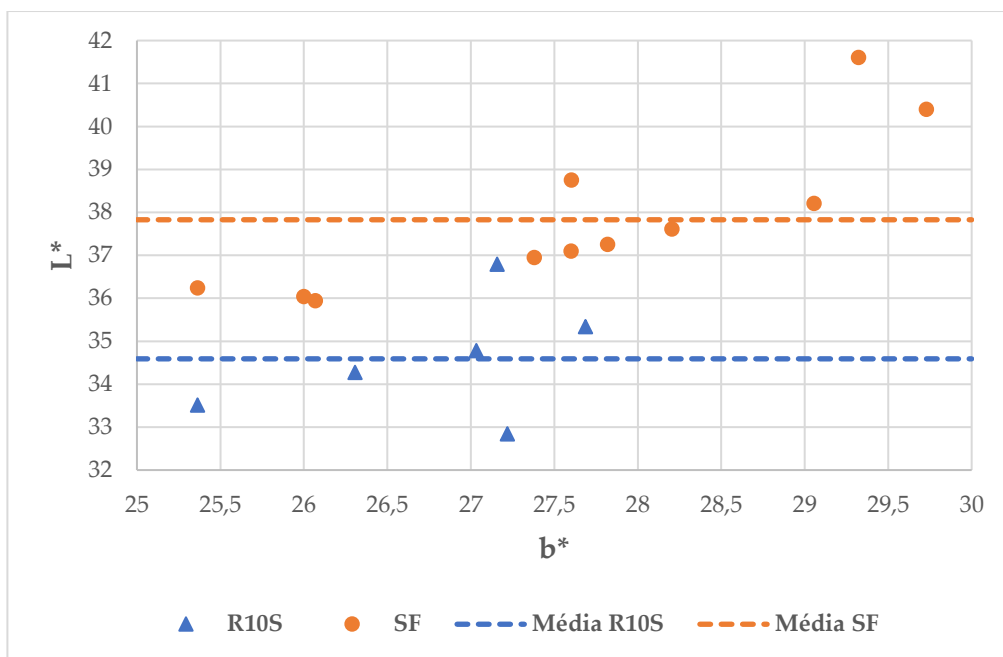


Figura 4.36 - L\* em função de b\* para a marcação das rolhas técnicas R10S e SF

Como teorizado, as rolhas SF apresentam, em média, um valor mais elevado para L\*, tanto em rolhas naturais como técnicas, o que serve para confirmar que a cor da marcação nestas é menos intensa. Tem-se ainda que, e como referido, esta diferença é mais evidente no caso das marcas em rolhas naturais, onde a distância entre médias é superior. Para acentuar esta conclusão, a Tabela 4.14 ilustra as cores representativas e as coordenadas colorimétricas para as rolhas R10S e SF, calculadas, novamente, de acordo com a regra de Chebyshev indicada pela equação (3.1).

Tabela 4.14 - Cores representativas, intervalo para coordenadas colorimétricas e distância colorimétrica entre rolhas R10S e SF

Tipo de rolha	R10S	SF	$\Delta E_{00}$
<b>Natural</b>	L* = 25,5±4,4 a* = 4,16±2,00 b* = 19,4±3,5	L* = 32,0±2,9 a* = 4,35±2,24 b* = 23,1±2,1	3,13
<b>Técnica</b>	L* = 34,6±2,5 a* = 5,06±1,39 b* = 26,8±1,5	L* = 37,8±3,4 a* = 5,63±2,02 b* = 27,7±2,6	1,45

A Tabela 4.14 demonstra claramente que existem diferenças notáveis entre as amostras R10S e SF para o mesmo tipo de rolhas, com a marca das rolhas SF a apresentar um tom notoriamente mais claro. A distância colorimétrica entre as cores representativas é  $\Delta E_{00} = 3,13$  para rolhas naturais e  $\Delta E_{00} = 1,45$  para rolhas técnicas, ambas acima do limite de perceptibilidade de 1,30 unidades indicado na secção 2.4. Estes resultados correspondem com a perceção visual e apoiam a conclusão de que há uma maior diferença entre marcações no caso das rolhas naturais.

Em suma, pode então ser dito que o método indica adequadamente que existem diferenças entre as amostras. Tendo em conta a dissemelhança observável na Figura 4.31 e Figura 4.32, esta conclusão pode ser considerada como evidente mesmo sem a realização de testes, isto porque se existem diferenças que podem ser captadas pela máquina fotográfica, e facilmente identificadas por observação das imagens resultantes, então tendo em conta que o software analisa os pixéis destas imagens é expectável que este consiga também detetar as diferenças.

A verdadeira dificuldade para um caso de estudo deste género estaria, portanto, em situações onde a desigualdade é vagamente perceptível a olho nu, logo pode não ser tão facilmente traduzida em fotografias devido a, por exemplo, limitações na resolução das mesmas. Se as diferenças não forem captadas pelos pixéis das imagens, então estas não seriam identificadas pelo software.

#### **4.6.3. Evolução da cor da marca ao longo da etapa de marcação**

O último caso de estudo abordado trata de caracterizar a evolução da marca ao longo da etapa de marcação. Ao todo, foram fotografadas e analisadas 1 797 rolhas, pertencentes a 16 lotes distintos, numerados, por conveniência, de 1 a 16, com o propósito de verificar a existência de diferenças notáveis na cor da marca.

É de notar que, na altura em que estava a ser desenvolvido o presente caso de estudo, a equipa da DEP na Amorim Cork S.A. realizou um inquérito interno de prova cega sobre esta etapa, onde, após inspeção visual das amostras pertencentes aos 16 lotes, 27 observadores responderam às seguintes perguntas sobre o estado da marcação nas rolhas:

- P1: A intensidade varia ao longo da marcação?
- P2: A marcação está esborratada e com sujidade?

Ambas as perguntas foram aplicadas tanto às marcas impressas no corpo como às impressas no topo das rolhas, para aquelas que tivessem o seu topo marcado, e, portanto, o inquérito tinha um total de 4 perguntas. Cada observador atribuía uma pontuação numa escala de 1 a 5, onde 1 indica "muito" e 5 "nada", e tinha a opção de escrever observações sobre o estado do lote.

Fortuitamente, a realização deste inquérito coincidiu com a etapa final de desenvolvimento do método, onde já era possível caracterizar a cor da marca nas amostras. Isto permitiu, portanto, comprovar se existe uma relação entre os resultados devolvidos pelo mesmo e as pontuações dadas pelos observadores no caso da P1.

As amostras foram retiradas de lotes que englobam diversos tipos de rolhas, lavações e processos de impressão da marca. Para um mesmo lote, podem existir diferentes amostras que representam rolhas recolhidas antes da execução da marcação, e rolhas correspondentes à evolução desta etapa. Assim, um conjunto de amostras pertencentes ao mesmo lote compreende, por exemplo, 1 amostra de rolhas sem marcação e 3 amostras representativas do início, meio e fim da etapa de marcação.

Neste contexto, o início, meio e fim da etapa diz respeito ao número de rolhas marcadas, onde cada conjunto de 1 000 rolhas é identificado como 1 Milheiro de rolhas (ML). Então, no início da etapa de marcação podem ter sido marcados 1 ML, no meio 10 ML e no fim 100 ML, por exemplo.

Tendo em conta que o objetivo proposto era analisar a evolução da cor na marca, amostras representativas de rolhas sem marca podem ser desprezadas. Contudo, estas foram igualmente fotografadas caso, no futuro, seja de interesse realizar outro tipo de testes que visem, por exemplo, avaliar se a marcação provoca diferenças significativas na cor do corpo das rolhas.

Assim, das 1 797 rolhas fotografadas, 334 representam rolhas que não foram sujeitas a qualquer uma das etapas. As restantes 1 463 rolhas encontram-se distribuídas como denotado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Lotes fotografados e características principais dos mesmos

Lote	Tipo de rolha	Lavação	Processo de marcação	Nº de rolhas
1	Neutrocork	Clear	Tinta	68
2	Neutrocork	Clear	Tinta	72
3	Neutrocork	Clear	Tinta	65
4	Neutrocork	Clear	Tinta	67
5	Neutrocork	Clear	Tinta	72
6	Neutrocork	Clear	Tinta	72
7	Neutrocork	Clear	Tinta	103
8	Neutrocork	Clean C	Tinta	72
9	Neutrocork	Clear	Tinta	76
10	Colmatada	ACQ Rosa	Tinta	142
11	Natural	Light	Tinta	144
12	Spark	Sem lavação	Fogo	108
13	Spark	Sem lavação	Fogo	96
14	Spark	Sem lavação	Fogo	72
15	Spark	Sem lavação	Fogo	90
16	Aglomerada	Nature	Tinta	144

As amostras foram analisadas pelo método, o que permitiu retirar, entre outros dados, as cores representativas e coordenadas colorimétricas médias para as marcas de cada lote. De modo a quantificar a diferença visual entre amostras representativas do início e fim da etapa de marcação, recorreu-se às métricas de distância colorimétrica abordadas na secção 2.4, que são igualmente representadas na Tabela 4.16, em conjunto com as médias dos resultados para P1 na prova cega.

Tabela 4.16 - Cores representativas, médias para P1 e resultados da distância colorimétrica entre início e fim da etapa de marcação, por diferentes métricas (1/2)

Lote	Início	Fim	P1	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{00}$	Min5	Chev
1	L* = 28,6 a* = 4,94 b* = 24,4	L* = 28,8 a* = 4,77 b* = 24,5	4,75	0,262	0,184	1,15	1,00
2	L* = 35,4 a* = 3,98 b* = 30,0	L* = 35,2 a* = 4,11 b* = 30,6	4,91	0,601	0,256	1,15	1,00
3	L* = 25,9 a* = 2,06 b* = 19,9	L* = 25,8 a* = 1,73 b* = 20,4	5,00	0,604	0,471	1,15	1,00
4	L* = 30,4 a* = 3,86 b* = 27,7	L* = 29,3 a* = 3,29 b* = 27,3	4,61	1,27	0,646	3,14	3,00
5	L* = 35,7 a* = 6,56 b* = 30,3	L* = 36,0 a* = 6,66 b* = 29,6	5,00	0,752	0,362	2,02	2,00
6	L* = 27,0 a* = 9,94 b* = 21,9	L* = 27,2 a* = 9,82 b* = 21,4	5,00	0,588	0,294	2,01	2,00
7	L* = 26,0 a* = 9,57 b* = 21,9	L* = 25,8 a* = 9,38 b* = 21,4	5,00	0,581	0,276	1,15	1,00
8	L* = 32,7 a* = 4,82 b* = 22,9	L* = 32,1 a* = 4,42 b* = 21,9	4,88	1,18	0,592	2,01	2,00
9	L* = 28,2 a* = 7,70 b* = 35,1	L* = 28,0 a* = 7,58 b* = 34,7	5,00	0,418	0,164	1,00	1,00
10	L* = 40,4 a* = 5,50 b* = 24,4	L* = 37,8 a* = 4,73 b* = 23,1	4,09	2,97	1,39	8,36	8,00
11	L* = 38,7 a* = 0,40 b* = 22,6	L* = 36,2 a* = 0,55 b* = 21,9	4,48	2,58	1,12	6,98	6,00
12	L* = 24,7 a* = 6,72 b* = 16,4	L* = 29,8 a* = 9,83 b* = 18,8	3,25	6,44	3,43	17,3	17,0
13	L* = 25,0 a* = 6,02 b* = 16,9	L* = 29,5 a* = 7,55 b* = 18,3	4,22	4,04	1,99	11,3	11,0

Tabela 4.16 - Cores representativas, médias para P1 e resultados da distância colorimétrica entre início e fim da etapa de marcação, por diferentes métricas (2/2)

Lote	Início	Fim	P1	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{00}$	Min5	Chev
14	L* = 28,8 a* = 8,59 b* = 18,9	L* = 30,3 a* = 10,6 b* = 18,9	3,96	2,46	1,93	5,01	5,00
15	L* = 30,2 a* = 8,47 b* = 20,0	L* = 29,8 a* = 8,75 b* = 19,3	4,80	0,823	0,573	2,01	2,00
16	L* = 42,8 a* = 10,5 b* = 28,0	L* = 41,6 a* = 10,3 b* = 26,9	4,30	1,63	0,741	3,45	3,00

Puramente por inspeção visual das cores representativas, a Tabela 4.16 permite teorizar que as rolhas Neutrocork, os lotes 1 a 9, apresentam a menor diferença entre a cor inicial e final da marca impressa. Pode também ser dito que, à exceção do lote 15, as rolhas Spark com marcação a fogo, os lotes 12, 13 e 14, apresentam algumas das maiores discrepâncias entre o início e o fim da etapa de marcação, o que sugere a possibilidade de que este tipo de rolhas, ou este método de impressão da marca, deixa a cor da marcação mais vulnerável a alterações.

Ao comparar os resultados das diferentes métricas de distância colorimétrica com a pontuação média para P1, é possível indicar qual destas tem a melhor correspondência com a percepção visual. Sobre isto, é importante notar que, uma vez que a prova cega avalia a diferença de cores numa escala de 1 a 5, onde, e como referido, 1 representaria uma diferença óbvia, ou "muito", e 5 uma diferença inexistente, ou "nada", é expectável que os resultados desta tenham uma correlação negativa com os resultados das métricas de distância colorimétrica. Ou seja, deve ser observada uma relação inversamente proporcional, onde quanto maior a pontuação na P1, menor o resultado de uma determinada métrica. Esta assunção é confirmada na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Relação entre resultados da prova cega para P1 e métricas de distância colorimétrica na etapa de marcação

Métricas	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{00}$	Min5	Chev
<b>Correlação (R)</b>	-0,932	-0,950	-0,905	-0,908
<b>Coefficiente de determinação (R<sup>2</sup>)</b>	0,870	0,903	0,819	0,824

A Tabela 4.17 indica, portanto, que todas as métricas apresentam a correlação negativa expectável e resultados que podem ser considerados como satisfatórios, com um coeficiente de determinação de, no mínimo 0,819. Desta é possível retirar também que a métrica que melhor representa as diferenças entre cores é a  $\Delta E_{00}$ , o que sugere que esta é a escolha preferencial para avaliar a distância colorimétrica, de acordo com os resultados deste inquérito de prova cega.

Contudo, é importante também considerar a falta de variedade nas pontuações dos diferentes lotes, e como isto pode influenciar a percepção da exatidão das fórmulas de distância colorimétrica aplicadas. Como demonstrado na Tabela 4.16, a menor pontuação dada pelos observadores, no inquérito da prova cega, é de 3,25 para o lote 12, e, inclusive, só há outro lote, o lote 14, com uma pontuação abaixo de 4. Uma vez que os lotes eram avaliados numa escala de 1 a 5, é evidente que há uma falta de amostras representativas de "maus" lotes. Então, os resultados indicados na Tabela 4.17, embora encorajadores, podem ser colocados em causa, devido à falta de lotes com pontuações abaixo de 4. Seria necessário realizar outro inquérito com mais lotes, "bons" e "maus", de modo a obter uma distribuição mais equilibrada de pontuações, o que iria permitir dados suficientemente variados para estudar verdadeiramente a correlação entre as métricas de distância colorimétrica e a visão humana.

As cores representativas devolvidas pelo software para determinados lotes podem também ser validadas, em parte, através dos comentários fornecidos pelos observadores e pertinentes à diferença de cor da marca entre o início e fim do processo de marcação. Estes são representados na Tabela 4.18, transcritos das observações no inquérito da prova cega.

Tabela 4.18 - Cores representativas e observações dadas pelos observadores e referentes a determinados lotes na etapa de marcação

Lote	Início	Fim	Observações
10	L* = 40,4 a* = 5,50 b* = 24,4	L* = 37,8 a* = 4,73 b* = 23,1	"A amostra inicial está menos intensa do que a final." "Na amostra do fim as letras ficam mais "negrito"."
12	L* = 24,7 a* = 6,72 b* = 16,4	L* = 29,8 a* = 9,83 b* = 18,8	"Apresenta mais intensidade no início que no fim."
13	L* = 25,0 a* = 6,02 b* = 16,9	L* = 29,5 a* = 7,55 b* = 18,3	"É notória uma diminuição ligeira de intensidade na amostra inicial (mais intensa) e a amostra final." "Início mais escuro que o fim." "Nota-se alguma diferença de tonalidade, rolhas mais carregadas no início da marcação."
14	L* = 28,8 a* = 8,59 b* = 18,9	L* = 30,3 a* = 10,6 b* = 18,9	"Início mais escuro que o fim." "Nota-se a mesma diferença de tonalidade do início para o fim." (mesma diferença que a do comentário ao lote 13 que diz: "Nota-se alguma diferença de tonalidade, rolhas mais carregadas no início da marcação.")
16	L* = 42,8 a* = 10,5 b* = 28,0	L* = 41,6 a* = 10,3 b* = 26,9	"A intensidade não varia muito mas é fraca logo de início." "A amostra inicial está com uma intensidade menor que a final." "A quantidade de tinta é um pouco escassa, havendo uma variação entre as duas fases." "Parecem mais intensas no fim da marcação."

Embora o número total de comentários sobre a cor da marcação seja reduzido, apenas 12, todos coincidem com as diferenças visuais indicadas pelas cores representativas de cada lote, o que é ainda outra prova substancial a favor da validade das cores representativas devolvidas pelo método.



## CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O controlo de qualidade da cor das rolhas de cortiça é um tema de importância para a indústria corticeira, pois permite assegurar a aderência a um determinado padrão visual de cor, estabelecido para o tipo de lavação em questão, o que confere uniformidade às rolhas produzidas. Com isto em mente, o objetivo principal deste trabalho foi, portanto, o desenvolvimento de um método que permita efetuar o controlo de qualidade da cor das rolhas de cortiça, quer naturais quer técnicas, de forma objetiva e expedita.

O método consiste num protótipo de uma cabine de luz, com iluminação interior D65, e suportes modelados e impressos em 3D para a máquina fotográfica, 24 faces de rolhas e 40 topos de rolhas. Esta componente física é acompanhada pela interface gráfica, desenvolvida em LabVIEW, onde as imagens de rolhas são processadas, com recurso aos espaços de cor RGB, HSL e CIELAB. As cores representativas de cada rolha são selecionadas através de uma das 6 estratégias de quantização de imagens programadas, estas sendo a estratégia da Quantização Uniforme, Popularidade, Median Cut, MinMax, K-Means e Moda do Histograma. Foram ainda implementadas 4 métricas de distância colorimétrica, nomeadamente a distância Euclidiana CIELAB, a distância CIEDE2000, a distância Minkowsky 5 e a distância Chebyshev, que permitem atribuir um valor numérico à diferença observável entre as cores das rolhas analisadas e a cor padrão para o tipo de lavação em questão.

Durante o desenvolvimento do método, chegou-se à conclusão de que, para permitir o funcionamento correto do mesmo, devem ser observadas determinadas condições. As rolhas devem ser fotografadas após um tempo de espera de, pelo menos, 20 minutos após a cabine ser ligada, para permitir a estabilização da iluminância proveniente das lâmpadas, e com a porta da cabine fechada. A distância focal deve ser mantida como 24 mm, de modo a fotografar a totalidade dos suportes, e, após uso dos materiais apropriados para garantir a fidelidade de cores em fotografias, mais concretamente o *ColorChecker White Balance* para balanceamento de brancos, concluiu-se ainda que a velocidade do obturador deve ser 1/320 s, a abertura deve ser f/5,6 e o ISO deve ser 100, sendo estes os parâmetros que oferecem a melhor correspondência entre as coordenadas devolvidas pelo método, e as tabeladas para as 24 cores presentes na paleta padrão utilizada.

Realizou-se a validação do método, onde foi comprovado que as coordenadas colorimétricas, as cores, devolvidas são válidas de acordo com os testes conduzidos para a avaliação indireta e direta de métodos analíticos, o que reforça a afirmação de que o método desenvolvido permite a caracterização objetiva da cor de rolhas de cortiça. Contudo, os resultados destas duas vertentes de avaliação, avaliação indireta e direta, revelaram também a existência de pontos de melhoria na versão atual da cabine de luz.

Na avaliação indireta, foram realizados testes de repetibilidade, precisão intermédia e robustez, tendo-se obtido coeficientes de variação (CV) médios de 2,29%, 2,09% e 1,39%, respetivamente. Os testes demonstraram a influência que a iluminação tem sobre as coordenadas colorimétricas, e apontaram ainda para desigualdades na distribuição de luz no interior da cabine. Isto é particularmente evidente no teste 4, de repetibilidade, onde a mesma face da rolha foi fotografada ao longo das 24 posições do suporte para faces, tendo-se verificado uma diferença notória na cor, mais concretamente na coordenada acromática  $L^*$ , entre estas.

A desigualdade na iluminação afeta a caracterização da cor e, conseqüentemente, induz uma maior variabilidade nas coordenadas colorimétricas das rolhas analisadas, podendo provocar resultados erróneos na etapa de tomada de decisões, onde o software é empregue para indicar quais as rolhas, se algumas, é que estão acima de um determinado limite de aceitabilidade.

Contudo, no teste conduzido para a avaliação direta do método, onde as coordenadas colorimétricas resultantes da caracterização das 24 cores na paleta padrão foram comparadas com as tabeladas, foi comprovado que as cores são válidas independentemente da posição ocupada no suporte, de acordo com os critérios estabelecidos para uma solução comercial que desempenha funções semelhantes. Isto indica que, apesar da diferença observável entre posições, esta não aparenta ser suficiente para invalidar a caracterização da cor pelo método proposto.

O teste de avaliação direta denotou ainda uma oportunidade para melhoria na cabine de luz, atendendo à distância colorimétrica CIEDE2000 média, pela estratégia da Moda do Histograma, de 2,50 entre as cores devolvidas e as tabeladas, o que indica que estas são notoriamente distintas das presentes na paleta padrão. Uma vez que, no desenvolvimento do método, já foram definidas as condições apropriadas para garantir a fidelidade das cores, pode então ser presumido que a diferença nas coordenadas colorimétricas é consequência da iluminação interior, e que isto deve ser, novamente, um ponto de atenção em versões subsequentes da cabine.

Porém, e independentemente da estratégia de quantização utilizada, os valores obtidos para as distâncias CIEDE2000 médias são inferiores ao 3,67 conseguido pelo colorímetro, quando este foi igualmente aplicado na caracterização das cores da paleta padrão. Tem-se também que, à exceção da estratégia MinMax, os resultados obtidos para os valores de desvio padrão da distância CIEDE2000, pelas diferentes estratégias, são também inferiores ao do colorímetro, de 1,65. Isto permite, portanto, afirmar que as coordenadas colorimétricas devolvidas pelo método são mais exatas e precisas do que as indicadas pelo colorímetro.

No que compete à caracterização expedita da cor, no seu estado atual e com um computador portátil Lenovo IdeaPad 3 15IML05 com 8 gb de ram e processador i7-10510U, o sistema proposto é capaz de caracterizar 24 faces em 2,33 segundos e 40 topos em 2,32 segundos, quando utilizada a estratégia de caracterização mais expediente, a estratégia da Moda do Histograma, com o mínimo de *input* necessário por parte do utilizador. Em contraste, um operador experiente que utilize o colorímetro requer cerca de 30 segundos por rolha, ou 12 minutos por 24 rolhas, e deve ter o cuidado de evitar picagens em zonas demasiado heterogéneas e que iriam afetar a média das coordenadas colorimétricas. Assim, o método mostra-se superior ao colorímetro em termos de economia de tempo, sendo 309 vezes mais rápido, e como tal, tendo em conta que o sistema é de fácil operação e os resultados são relativamente simples de interpretar, o mesmo operador responsável pela caracterização da cor com o colorímetro pode facilmente aumentar o seu *output* diário de resultados.

A comparação entre as 6 estratégias de quantização, em termos de velocidade de processamento e qualidade das cores representativas resultantes, permitiu ainda concluir que, para o objetivo proposto de caracterização objetiva e expedita, as estratégias da Moda do Histograma e da Popularidade são as mais apropriadas. Uma vez que estas devolvem cores próximas e, por vezes, idênticas, sugere-se que a estratégia da Moda do Histograma, sendo a mais expediente, seja utilizada para monitorização e controlo do processo, e que a estratégia da Popularidade, que devolve cores que existem garantidamente nas imagens de rolhas, seja empregue para propósitos que requeiram uma análise mais minuciosa, como ensaios de investigação.

Foram realizados 3 casos de estudo distintos. No primeiro, procurou-se identificar e caracterizar a cor do boleado, que, a olho nu, apresentava-se visualmente distinta da cor das faces e topos das rolhas. Sobre este, demonstrou-se que, com a imposição de limites nas coordenadas de cor, o software é capaz de isolar o boleado nas rolhas, tendo devolvido uma distância colorimétrica CIEDE2000 igual a 4,77 entre a cor no boleado e a cor no topo. Contudo, esta funcionalidade requer intervenção cuidadosa por parte do utilizador, para seleção dos limites apropriados.

No segundo caso de estudo, foram fornecidas 2 amostras de rolhas naturais e 2 amostras de rolhas técnicas, de lotes distintos, e o objetivo era avaliar a diferença de cores na marcação entre lotes do mesmo tipo de rolhas, sendo que, a olho nu, as marcas eram visualmente distintas. Para isto, foram retiradas as cores representativas das marcas nos diferentes lotes, e foi calculada a distância CIEDE2000 entre estas. Em rolhas naturais, a distância CIEDE2000 entre os lotes era de 3,13, e em rolhas técnicas, a distância CIEDE2000 era de 1,45, o que permite confirmar que, se existem diferenças entre rolhas que são visíveis a olho nu e que podem ser captadas pela máquina fotográfica, então o método consegue adequadamente detetar e quantificar estas diferenças.

No terceiro caso de estudo, procurou-se avaliar a evolução da marca ao longo do processo de marcação, em 16 lotes, ao calcular a distância colorimétrica, pelas 4 métricas implementadas, entre cores representativas da marca no início e no fim do processo. Os resultados das 4 métricas foram comparados com os devolvidos por um inquérito de prova cega, onde o objetivo era igualmente quantificar a diferença na marcação dos 16 lotes. Verificou-se que, de entre as 4 métricas implementadas, a CIEDE2000 é a que devolve os resultados mais próximos dos do inquérito de prova cega, tendo indicado um  $R^2 = 0,903$ . À semelhança do verificado nos casos de estudo anteriores, estes resultados permitem confirmar que o método consegue quantificar adequadamente diferenças entre cores, e que oferece uma boa correlação com o que é visualmente perceptível.

Este último caso de estudo procurou apenas avaliar as diferenças resultantes do decorrer da etapa de marcação, no entanto, o método pode igualmente ser utilizado para comparar, por exemplo, marcas produzidas em diferentes unidades industriais ou através de diferentes processos de impressão. Isto reforça os potenciais benefícios de um sistema que permita a caracterização objetiva da cor de uma determinada secção em rolhas naturais ou técnicas, algo que é impossível de replicar com o colorímetro.

Em suma, há oportunidades para melhoria do método desenvolvido, particularmente no lado do hardware, no protótipo. Porém, mesmo no seu estado corrente, quando comparado com os métodos atualmente empregues para o controlo de qualidade da cor, quer por inspeção visual quer pelo colorímetro, o método proposto oferece mais funcionalidades e uma caracterização mais exata, precisa e expedita, com um elevado potencial para crescimento, se for permitido o desenvolvimento das vertentes técnicas e se fornecido o *input* adequado por parte dos utilizadores no terreno. Assim, e tendo em conta os resultados apresentados, pode ser dito que o objetivo inicial deste trabalho foi alcançado, e que o produto final se apresenta como um potencial concorrente ao colorímetro, o método atualmente em uso para o controlo objetivo da cor das rolhas de cortiça em regime descontínuo.

Em termos de perspetivas para trabalho futuro, a prioridade imediata deve incorrer sobre a uniformização da iluminação no interior da cabine, de modo a reduzir a variabilidade observável entre posições do suporte. Isto através do estudo de outras configurações para a fonte de iluminação, ou de outras fontes que não as lâmpadas utilizadas, como fitas de LED.

Posteriormente, será então possível o desenvolvimento de limites de aceitabilidade adequados para as rolhas de diferentes lavações. A implementação de um limite de aceitabilidade abrangente já permite identificar corretamente as rolhas com cores mais aberrantes, ou rolhas pertencentes a outro tipo de lavagem. No entanto, para conduzir análises intra-lavagem de forma adequada, será necessário implementar limites de aceitabilidade mais restritos, isto através da caracterização da cor de um número considerável de rolhas, e cálculo da distância colorimétrica ao padrão estabelecido para a lavagem em questão. Apenas com a extensa comparação entre estes resultados e os indicados pela perceção visual, através de, por exemplo, inquéritos de prova cega sobre as diferenças de cor, é que será possível estabelecer limites de aceitabilidade apropriados.

O método, e mais especificamente a interface de utilizador, requer ainda contacto com usuários no terreno, para que o feedback sobre a sua utilização possa ser usado para melhorias subsequentes, direcionadas à aplicação do mesmo para o propósito de monitorização e controlo do processo ou para ensaios de investigação. Uma destas melhorias poderia ser, por exemplo, a implementação de métodos de controlo estatístico para as coordenadas de cor, como cartas de controlo.

Outra melhoria incorre sobre a aquisição de uma máquina fotográfica compatível com o LabVIEW, para que pudesse ser implementado um botão, diretamente na interface de utilizador, que permitisse fotografar as rolhas no interior de forma remota. Isto iria eliminar a necessidade de focagem manual, simplificando e automatizando, parcialmente, o processo de caracterização da cor.

Dito isto, o objetivo a curto prazo consiste em implementar este sistema no terreno. Caso isto seja feito, e devolva resultados satisfatórios, o próximo grande passo, o objetivo a longo prazo, será o da caracterização da cor em tempo real. Com a previamente referida câmara integrada, o funcionamento deste novo protótipo seria semelhante ao das máquinas empregues para a escolha eletrónica. Porém, e embora este já seja relativamente expediente, seria ainda necessário otimizar o código desenvolvido, de modo a corresponder às restrições impostas em termos de tempo de processamento, por cada rolha.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] European Cork Federation, “Código Internacional das Práticas Rolheiras.” 2020.
- [2] A. R. Rebelo, “Desenvolvimento e validação de um método analítico de caracterização de tratamentos de superfície em rolhas de cortiça,” Universidade de Aveiro, 2019 (Dissertação de Mestrado).
- [3] R. B. Rei, “Melhoria do processo de lavagem das rolhas de cortiça,” Universidade de Aveiro, 2015 (Dissertação de Mestrado).
- [4] Amorim Cork, “THE ART OF CORK.” Acedido a: 10 de Fevereiro de 2021. [Online]. Disponível em: [https://www.amorim.com/xms/files/Documentacao/EN\\_Arte\\_Cortica\\_2011.pdf](https://www.amorim.com/xms/files/Documentacao/EN_Arte_Cortica_2011.pdf).
- [5] Amorim Cork, “Matéria-Prima e Processo Industrial.” <https://www.amorimcork.com/pt/a-cortica-e-o-vinho/materia-prima-e-processo-productivo/> (acedido a 7 de Agosto de 2021).
- [6] D. Marques, “Desenvolvimento de um Modelo de Otimização da Produção na Indústria Corticeira,” Universidade do Porto, 2017 (Dissertação de Mestrado).
- [7] P. M. Santos, “Otimização do processo de lavagem em rolhas de cortiça,” Universidade de Aveiro, 2012 (Dissertação de Mestrado).
- [8] D. J. Oliveira, “Implementação de Dry Soak em Rolhas de Cortiça,” Universidade do Porto, 2016 (Dissertação de Mestrado).
- [9] Amorim Cork, “Naturity e Xpür: as tecnologias anti-TCA mais inovadoras, ecológicas e eficientes do mundo.” <https://www.amorim.com/pt/projetos/naturity-e-xpur-as-tecnologias-anti-tca-mais-inovadoras-ecologicas-e-eficientes-do-mundo/4407/> (acedido a 24 de Novembro de 2021).
- [10] Amorim Cork, “Ndtech E Ndtech Efervescente.” <https://www.amorimcork.com/pt/a-cortica-e-o-vinho/ndtech-e-ndtech-efervescente/> (acedido a 24 de Novembro de 2021).
- [11] National Instruments, “G Programming Reference Manual.” 1998, [Online]. Disponível em: <https://www.ni.com/pdf/manuals/321296b.pdf>.
- [12] K. M. Hussain, R. A. Zepherin, M. S. Kumar, and S. Abirami, “Conversion of Single Image into 3D Depth Image using NI-LabVIEW,” *Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng.*, vol. 04, no. 03, pp. 1244–1248, Mar. 2015, doi: 10.15662/IJAREEIE.2015.0403010.
- [13] National Instruments, “Benefits of Programming Graphically in LabVIEW.” <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/13/benefits-of-programming>

- graphically-in-ni-labview.html (accedido a 7 de Agosto de 2021).
- [14] National Instruments, "IMAQ Vision for LabVIEW User Manual." 2004, [Online]. Disponível em: <https://www.ni.com/pdf/manuals/371007a.pdf>.
  - [15] O. Alata and L. Quintard, "Is there a best color space for color image characterization or representation based on Multivariate Gaussian Mixture Model?," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 113, no. 8, pp. 867–877, Ago. 2009, doi: 10.1016/J.CVIU.2009.03.001.
  - [16] G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Second Edi. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
  - [17] K. N. Plataniotis and R. Lukac, *Color Image Processing : Methods and Applications*, First Edit. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006.
  - [18] M. D. Fairchild, *Color Apperance Models*, Third Edit. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
  - [19] N. S. Hart, "Photopigments," *Encycl. Neurosci.*, pp. 3148–3151, Nov. 2009, doi: 10.1007/978-3-540-29678-2\_4570.
  - [20] K. N. Plataniotis and A. N. Venetsanopoulos, *Color Image Processing and Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000.
  - [21] V. Turke, "Minimization of Metamerism in Wood Grain Printing using Different GCR Settings," 2016 (Dissertação de Mestrado).
  - [22] K. Peterson, "Introduction to Basic Measures of a Digital Image for Pictorial Collections." 2005, [Online]. Disponível em: <https://www.loc.gov/rr/print/tp/IntroDgtlImage.pdf>.
  - [23] "Image processing." [https://uotechnology.edu.iq/ce/lecture\\_2013n/4th\\_Image\\_Processing\\_Lectures/DIP\\_Lecture2.pdf](https://uotechnology.edu.iq/ce/lecture_2013n/4th_Image_Processing_Lectures/DIP_Lecture2.pdf).
  - [24] National Instruments, "IMAQ Vision Concepts Manual." 2000, [Online]. Disponível em: <https://www.ni.com/pdf/manuals/322916a.pdf>.
  - [25] D. R. Bull, *Communicating Pictures*. Bristol: Elsevier, 2014.
  - [26] "Understanding Gamma Correction." <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/gamma-correction.htm> (accedido a 7 de Agosto de 2021).
  - [27] International Electrotechnical Comission, "Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Parte 2-1: Colour management - Default RGB colour space-sRGB," 1999, Acedido a: 11 de Novembro de 2021. [Online]. Disponível em: [www.sis.se/buytheentirhttps://www.sis.se/api/document/preview/562720/](http://www.sis.se/buytheentirhttps://www.sis.se/api/document/preview/562720/).
  - [28] International Telecommunication Union, "Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange." 2015, [Online]. Disponível em: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf).
  - [29] C. Poynton, *A technical introduction to digital video*, First Edit. New York: John Wiley & Sons, 1996.
  - [30] W. Kubinger, M. Vincze, and M. Ayromlou, "The role of Gamma correction in Colour Image Processing," 1998.
  - [31] "Color and color spaces in Computer Vision." <https://kharshit.github.io/blog/2020/01/17/color-and-color-spaces-in-computer-vision> (accedido a 7 de Agosto de 2021).

- [32] A. Jurio, M. Pagola, M. Galar, C. Lopez-Molina, and D. Paternain, "A comparison study of different color spaces in clustering based image segmentation," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, pp. 532-541, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-14058-7\_55.
- [33] N. Ibraheem, M. Hasan, R. Khan, and P. Mishra, "Understanding Color Models: A Review," *ARPJ J. Sci. Technol.*, vol. Volume 2, 2012, Acedido a: 7 de Agosto de 2021. [Online]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/266462481\\_Understanding\\_Color\\_Models\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/266462481_Understanding_Color_Models_A_Review).
- [34] C.-L. Chien and D.-C. Tseng, "Color image enhancement with exact HSI color model," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. Volume 7, 2011, Acedido a 7 de Agosto de 2021. [Online]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/286944930\\_Color\\_image\\_enhancement\\_with\\_exact\\_HSI\\_color\\_model](https://www.researchgate.net/publication/286944930_Color_image_enhancement_with_exact_HSI_color_model).
- [35] A. Ford and A. Roberts, "Colour Space Conversions," 1998, [Online]. Disponível em: <https://poynton.ca/PDFs/coloureq.pdf>.
- [36] I. Lissner and P. Urban, "How Perceptually Uniform Can a Hue Linear Color Space Be?," *Color Imaging Conference Final Program and Proceedings*, pp. 97-102, 2010.
- [37] L. Macdonald, "Using Color Effectively in Computer Graphics," 1999, [Online]. Disponível em: <https://www.engr.colostate.edu/ECE666/Handouts/WritingPapers/UsingColorEffectively.pdf>.
- [38] "Fundamentals of Liquid Crystal Displays - How They Work and What They Do." [https://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/pdf/LCD\\_Backgrounder.pdf](https://www.fujitsu.com/downloads/MICRO/fma/pdf/LCD_Backgrounder.pdf) (acedido a 7 de Agosto de 2021).
- [39] C. Bouman, "Digital Image Processing." [Online]. Disponível em: <https://engineering.purdue.edu/~bouman/ece637/notes/pdf/ColorSpaces.pdf>.
- [40] P. J. Alessi *et al.*, "CIE 15-2004: Colorimetry," 2004.
- [41] M. R. Luo, G. Cui, and B. Rigg, "The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000," *Color Res. Appl.*, vol. 26, no. 5, pp. 340-350, Out. 2001, doi: 10.1002/COL.1049.
- [42] M. R. Luo and B. Rigg, "Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours," *Color Res. Appl.*, vol. 11, no. 1, pp. 25-42, 1986, doi: 10.1002/COL.5080110107.
- [43] H. J. Trussell, "Color and Multispectral Image Representation and Display," *Essent. Guid. to Image Process.*, pp. 169-204, 2009, doi: 10.1016/B978-0-12-374457-9.00008-1.
- [44] B. Rana, "A study on CIELab & CIELch colour spaces." Acedido a: 7 de Agosto de 2021. [Online]. Disponível em: [https://www.academia.edu/18929410/A\\_study\\_on\\_CIELab\\_and\\_CIELch\\_colour\\_spaces](https://www.academia.edu/18929410/A_study_on_CIELab_and_CIELch_colour_spaces).
- [45] W. S. Huang *et al.*, "High correlation between skin color based on CIELAB color space, epidermal melanocyte ratio, and melanocyte melanin content," *PeerJ*, vol. 2018, no. 5, 2018, doi: 10.7717/PEERJ.4815.
- [46] B. C. K. Ly, E. B. Dyer, J. L. Feig, A. L. Chien, and S. Del Bino, "Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement," *J. Invest. Dermatol.*, vol. 140, no. 1, pp. 3-12.e1, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JID.2019.11.003.

- [47] O. E. Pecho, R. Ghinea, R. Alessandretti, M. M. Pérez, and A. Della Bona, "Visual and instrumental shade matching using CIELAB and CIEDE2000 color difference formulas," *Dent. Mater.*, vol. 32, no. 1, pp. 82–92, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.DENTAL.2015.10.015.
- [48] M. D. M. Pérez *et al.*, "Development of a customized whiteness index for dentistry based on CIELAB color space," *Dent. Mater.*, vol. 32, no. 3, pp. 461–467, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.DENTAL.2015.12.008.
- [49] C. Gómez-Polo *et al.*, "A comparison of the CIELab and CIEDE2000 color difference formulas," *J. Prosthet. Dent.*, 2015, doi: 10.1016/j.prosdent.2015.07.001.
- [50] A. Koschan and M. Abidi, "Color spaces and color distances," in *Digital Color Image Processing*, John Wiley & Sons, 2008, pp. 37–68.
- [51] A. Kim, H. S. Kim, and S. O. Park, "Measuring of the perceptibility and acceptability in various color quality measures," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 15, no. 3, pp. 310–317, Set. 2011, doi: 10.3807/JOSK.2011.15.3.310.
- [52] G. Khashayar, P. A. Bain, S. Salari, A. Dozic, J. Kleverlaan, and A. J. Feilzer, "Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry," 2014, doi: 10.1016/j.jdent.2013.11.017.
- [53] R. G. Kuehni and R. T. Marcus, "An Experiment in Visual Scaling of Small Color Differences," *Color Res. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. 83–91, 1979, doi: 10.1111/J.1520-6378.1979.TB00094.X.
- [54] R. G. Kuehni, "CIEDE2000, milestone or final answer?," *Color Res. Appl.*, vol. 27, no. 2, pp. 126–127, Abr. 2002, doi: 10.1002/COL.10035.
- [55] M. Melgosa *et al.*, "Color-quality control using color-difference formulas: progress and problems," Ago. 2017, doi: 10.1117/12.2271956.
- [56] R. Huertas, M. Melgosa, and E. Hita, "Influence of random-dot textures on perception of suprathreshold color differences," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 23, no. 9, p. 2067, Set. 2006, doi: 10.1364/JOSAA.23.002067.
- [57] M. Melgosa, "CIE/ISO new standard: CIEDE2000," 2013. [https://www.color.org/events/colorimetry/melgosa\\_ciede2000\\_workshop-july4.pdf](https://www.color.org/events/colorimetry/melgosa_ciede2000_workshop-july4.pdf) (accedido a 17 de Outubro de 2021).
- [58] H. Liu, M. Huang, G. Cui, M. R. Luo, and M. Melgosa, "Color-difference evaluation for digital images using a categorical judgment method," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 30, no. 4, p. 616, Abr. 2013, doi: 10.1364/JOSAA.30.000616.
- [59] A. T. Sanda Mahama, A. S. Dossa, and P. Gouton, "Choice of distance metrics for RGB color image analysis," *IS T Int. Symp. Electron. Imaging Sci. Technol.*, 2016, doi: 10.2352/ISSN.2470-1173.2016.20.COLOR-349.
- [60] B. Ortiz-Jaramillo, A. Kumcu, and W. Philips, "Evaluating color difference measures in images," Jun. 2016, doi: 10.1109/QOMEX.2016.7498922.
- [61] R. Ghinea, M. M. Pérez, L. J. Herrera, M. J. Rivas, A. Yebra, and R. D. Paravina, "Color difference thresholds in dental ceramics," *J. Dent.*, vol. 38, no. SUPPL. 2, 2010, doi: 10.1016/J.JDENT.2010.07.008.
- [62] L. Brun and A. Trémeau, "Color Quantization," in *Digital Color Imaging Handbook*, First Edit., CRC Press, 2003.
- [63] C. A. Bouman, "Sequential scalar quantization of color images," *J. Electron. Imaging*,

- vol. 3, no. 1, p. 59, Jan. 1994, doi: 10.1117/12.165065.
- [64] B. Koc, Z. Arnavut, and H. Kocak, "Lossless Compression of Dithered Images," *IEE Photonics J.*, vol. Volume 5, 2013, Acedido a: 7 de Agosto de 2021. [Online]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6517454>.
- [65] Y. Deng and B. S. Manjunath, "Unsupervised segmentation of color-texture regions in images and video," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 23, no. 8, pp. 800-810, Ago. 2001, doi: 10.1109/34.946985.
- [66] O. Sertel, J. Kong, U. V. Catalyurek, G. Lozanski, J. H. Saltz, and M. N. Gurcan, "Histopathological Image Analysis Using Model-Based Intermediate Representations and Color Texture: Follicular Lymphoma Grading," *J. Signal Process. Syst. 2008* 551, vol. 55, no. 1, pp. 169-183, Maio 2008, doi: 10.1007/S11265-008-0201-Y.
- [67] M. E. Celebi, "Improving the performance of k-means for color quantization," *Image Vis. Comput.*, vol. 29, no. 4, pp. 260-271, 2011, doi: 10.1016/J.IMAVIS.2010.10.002.
- [68] "Reduce the number of colors of an image using Uniform Quantization - Muthukrishnan," Out. 05, 2010. <https://muthu.co/reduce-the-number-of-colors-of-an-image-using-uniform-quantization/> (acedido a 17 de Novembro de 2011).
- [69] P. Heckbert, "Color image quantization for frame buffer display," pp. 297-307, 1982, doi: 10.1145/800064.801294.
- [70] Z. Xiang, "Color Image Quantization by Minimizing the Maximum Intercluster Distance," *ACM Trans. Graph.*, vol. 16, no. 3, pp. 260-276, 1997, doi: 10.1145/256157.256159.
- [71] Y. Wang, H. Huang, C. Wang, T. He, J. Wang, and M. Hoai, "GIF2VIDEO: Color dequantization and temporal interpolation of GIF images," *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2019-June, pp. 1419-1428, Jun. 2019, doi: 10.1109/CVPR.2019.00151.
- [72] P. Reitan, "Weighted MinMax Algorithm for Color Image Quantization," 1999, Acedido a: 7 de Agosto de 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Weighted-MinMax-Algorithm-for-Color-Image-Reitan/2fe79bf8372fef5427b5bf22a11b1a9768ce7f8d>.
- [73] S. Thompson, M. E. Celebi, and K. H. Buck, "Fast color quantization using MacQueen's k-means algorithm," *J. Real-Time Image Process.*, vol. 17, no. 5, pp. 1609-1624, Out. 2019, doi: 10.1007/S11554-019-00914-6.
- [74] S. J. Wan, S. K. M. Wong, and P. Prusinkiewicz, "An Algorithm for Multidimensional Data Clustering," *ACM Trans. Math. Softw.*, vol. 14, no. 2, pp. 153-162, Jun. 1988, doi: 10.1145/45054.45056.
- [75] A. Mexicano *et al.*, "The early stop heuristic: A new convergence criterion for K-means," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1738, no. 1, Jun. 2016, doi: 10.1063/1.4952103.
- [76] A. Marques *et al.*, "Guia RELACRE 13 Validação de Métodos Internos de Ensaio em Análise Química," 2000. Acedido a: 21 de Outubro de 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.relacre.pt/assets/relacreassets/files/commissionsandpublications/Guia RELACRE 13.pdf>.
- [77] A. F. S. Martins, "Implementação e validação de métodos analíticos," Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016 (Dissertação de Mestrado).
- [78] B. G. Amidan, T. A. Ferryman, and S. K. Cooley, "Data outlier detection using the

- chebyshev theorem," *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, 2005, doi: 10.1109/AERO.2005.1559688.
- [79] Y. Zhang, Y. Gao, Y. He, Y. Shi, and K. Liang, "Research on the Color Temperature & White Balance for Multimedia Sensor," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 107, pp. 878-884, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.03.187.
- [80] A.-M. Simundic, "Confidence interval," *Biochem. Medica*, pp. 154-161, 2008, doi: 10.11613/BM.2008.015.
- [81] M. O. A. Abu-Shawiesh and A. Saghir, "Robust Confidence Intervals for the Population Mean Alternatives to the Student-t Confidence Interval," *J. Mod. Appl. Stat. Methods*, vol. 18, no. 1, pp. 2-20, Abr. 2020, doi: 10.22237/jmasm/1556669160.
- [82] M. F. Wahab, D. Patel, and D. Armstrong, "Peak Shapes and Their Measurements: The Need and the Concept Behind Total Peak Shape Analysis," *Lc Gc North Am.*, vol. 12, no. 35, pp. 846-853, Dez. 2017, Acedido a: 16 de Novembro de 2021. [Online]. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/321951613\\_Peak\\_Shapes\\_and\\_Their\\_Measurements\\_The\\_Need\\_and\\_the\\_Concept\\_Behind\\_Total\\_Peak\\_Shape\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/321951613_Peak_Shapes_and_Their_Measurements_The_Need_and_the_Concept_Behind_Total_Peak_Shape_Analysis).
- [83] "Do LED Lights Get Brighter The Longer They Are On? - LED & Lighting Info." <https://ledlightinginfo.com/do-led-lights-get-brighter-the-longer-they-are-on> (acedido a 17 de Outubro de 2021).
- [84] D. C. Agrawal, "Heating-times of tungsten filament incandescent lamps," *World News Nat. Sci.*, vol. 15, pp. 86-97, 2017, [Online]. Disponível em: [www.worldnewsnaturalsciences.com](http://www.worldnewsnaturalsciences.com).
- [85] H. Baumgartner, D. Renoux, P. Kärhä, T. Poikonen, T. Pulli, and E. Ikonen, "Natural and accelerated ageing of LED lamps," *Light. Res. Technol.*, vol. 48, no. 8, pp. 930-942, Dez. 2016, doi: 10.1177/1477153515603757.
- [86] M. S. Banks, E. A. Cooper, and E. A. Piazza, "Camera Focal Length and the Perception of Pictures," *Ecol. Psychol.*, vol. 26, no. 1-2, pp. 30-46, 2014, doi: 10.1080/10407413.2014.877284.
- [87] Alpha MOS, "IRIS Visual Analyzer Data sheet." [https://www.dastecsrl.com.ar/uploads/productos/alphamos/iris-ojo-electronico\\_alphamos.pdf?v154](https://www.dastecsrl.com.ar/uploads/productos/alphamos/iris-ojo-electronico_alphamos.pdf?v154) (acedido a 18 de Novembro de 2021).

## CONVERSÃO ENTRE ESPAÇOS DE CORES

### A.1. Conversão entre R'G'B' e HSL

Para conversão do espaço não linear R'G'B' para o espaço HSL, o software segue os passos descritos na literatura<sup>[20]</sup>. Esta dita que é necessário primeiro calcular o valor para a coordenada L pela equação (A.1):

$$L = \frac{\text{máx} + \text{mín}}{2} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

máx = máximo(R', G', B');

mín = mínimo(R', G', B');

Se máx e mín coincidirem, então S = 0 e H é indefinido. Caso contrário, a saturação pode ser calculada com base na equação (A.2):

$$S = \begin{cases} \frac{\text{máx} - \text{mín}}{\text{máx} + \text{mín}} & \text{se } L \leq 0,5 \\ \frac{\text{máx} - \text{mín}}{2 - \text{máx} - \text{mín}} & \text{se } L > 0,5 \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

E H pela equação (A.3):

$$H = \begin{cases} \frac{G' - B'}{\text{máx} - \text{mín}} & \text{se } R' = \text{máx} \\ \frac{B' - R'}{\text{máx} - \text{mín}} & \text{se } G' = \text{máx} \\ 4 + \frac{R' - B'}{\text{máx} - \text{mín}} & \text{se } B' = \text{máx} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

O inverso, isto é, a conversão de HSL para R'G'B', requer a transformação dos ângulos de H tal que  $H \in [0, 6]$ . Depois disto, se  $S = 0$  então H é indefinido e  $(R', G', B') = (L, L, L)$ . Caso contrário,  $i = \text{floor}(H)$ , onde *floor* é uma função que devolve o maior número inteiro que é inferior a H. Assim, se H assume um valor de, no máximo, 6, tem-se que  $0 \leq i \leq 5$ , ou seja, i pode assumir 6 valores, qualquer valor inteiro entre 0 a 5.

Isto permite então dividir a representação angular de H em 6 setores, sendo que o valor de  $i$  indica o setor a que determinada cor pertence. O valor de tonalidade dentro de cada setor,  $f$ , é dado por  $f = H - i$ .

Se  $L \leq \frac{255}{2}$ , então:

$$\text{máx} = L(1 + S) \quad (\text{A.4})$$

$$\text{mín} = L(1 - S) \quad (\text{A.5})$$

$$\text{mid1} = L(2fS + 1 - S) \quad (\text{A.6})$$

$$\text{mid2} = L(2(1 - f)S + 1 - S) \quad (\text{A.7})$$

Caso  $L > \frac{255}{2}$ :

$$\text{máx} = L(1 + S) + 255S \quad (\text{A.8})$$

$$\text{mín} = L(1 - S) - 255S \quad (\text{A.9})$$

$$\text{mid1} = 2((1 - f)S - (0,5 - f)\text{máx}) \quad (\text{A.10})$$

$$\text{mid2} = 2(fL - (f - 0,5)\text{máx}) \quad (\text{A.11})$$

Os valores das coordenadas  $R'G'B'$  são então atribuídos com base nos valores intermediários calculados, conforme o sector a que a cor original pertença:

$$(R', G', B') = \begin{cases} (\text{máx}, \text{mid1}, \text{mín}) & \text{se } i = 0 \\ (\text{mid2}, \text{máx}, \text{mín}) & \text{se } i = 1 \\ (\text{mín}, \text{máx}, \text{mid1}) & \text{se } i = 2 \\ (\text{mín}, \text{mid2}, \text{máx}) & \text{se } i = 3 \\ (\text{mid1}, \text{mín}, \text{máx}) & \text{se } i = 4 \\ (\text{máx}, \text{mín}, \text{mid2}) & \text{se } i = 5 \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

## A.2. Conversão entre RGB e CIE L\*a\*b\*

A conversão de coordenadas no espaço linear RGB para o espaço CIE L\*a\*b\* requer um passo intermédio de conversão para o espaço XYZ, demonstrado na equação (A.13)<sup>[20], [24]</sup>.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,413 & 0,358 & 0,180 \\ 0,213 & 0,715 & 0,072 \\ 0,019 & 0,119 & 0,950 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Como referido na secção 2.3.3, a conversão para o espaço CIE L\*a\*b\* requer o uso de um ponto branco, que está dependente do ângulo de observação e da fonte de iluminação utilizada. Sobre as condições de captura impostas, fonte de iluminação D65 e observador a 1°, o ponto branco no espaço XYZ tem coordenadas  $[X_n, Y_n, Z_n] = [0,950, 1, 1,09]$ <sup>[40]</sup>. Com este, a conversão para CIE L\*a\*b\* é então dada por:

$$L^* = \begin{cases} 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{se } \left( \frac{Y}{Y_n} \right) > 0,00886 \\ 903,3 \left( \frac{Y}{Y_n} \right) & \text{se } \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \leq 0,00886 \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

$$a^* = 500 \left( f \left( \frac{X}{X_n} \right) - f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) \right) \quad (\text{A.15})$$

$$b^* = 200 \left( f \left( \frac{Y}{Y_n} \right) - f \left( \frac{Z}{Z_n} \right) \right) \quad (\text{A.16})$$

Onde:

$$f(x) = \begin{cases} x^{\frac{1}{3}} & \text{se } x > 0,00886 \\ 7,787 x + \frac{16}{116} & \text{se } x \leq 0,00886 \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

Para conversão de CIE L\*a\*b\* para RGB é necessário igualmente converter as coordenadas L\*a\*b\* para XYZ, por meio das coordenadas de ponto branco previamente estabelecidas:

$$X = X_n \left( P + \frac{a^*}{500} \right)^3 \quad (\text{A.18})$$

$$Y = Y_n P^3 \quad (\text{A.19})$$

$$Z = Z_n \left( P - \frac{b^*}{200} \right)^3 \quad (\text{A.20})$$

Com:

$$P = \frac{L^* + 16}{116} \quad (\text{A.21})$$

Em seguida, utilizam-se os valores XYZ para ainda outra operação matricial, da qual resulta as coordenadas RGB:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,24 & -1,54 & -0,499 \\ -0,970 & 1,88 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,204 & 1,06 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

### A.3. Conversão de CIE L\*a\*b\* para CIE L\*C\*h\*

A conversão de coordenadas L\*a\*b\* para L\*C\*h\* é relativamente simples, e necessária para o cálculo da distância colorimétrica CIEDE2000. Esta requer apenas o cálculo dos valores para a coordenada de croma, C\*, e tonalidade, h\*, pelas equações (A.23) e (A.24), respectivamente<sup>[35]</sup>.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{A.23})$$

$$h^* = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right) \quad (\text{A.24})$$

## Anexo B. DISTÂNCIA CIEDE2000

O cálculo da distância CIEDE2000 é feito de acordo com o descrito na literatura<sup>[41]</sup>, e tem início com a correção da coordenada  $a^*$  para  $a'$ , demonstrado pela equação (B.2), cujo propósito é melhorar o performance da métrica na avaliação de cores acinzentadas. As coordenadas  $L^*$  e  $b^*$  não requerem correção adicional. Posteriormente, e como referido na secção 2.3.3, é então necessária a conversão para o espaço CIE  $L^*C^*h^*$ , ou neste caso o espaço CIE  $L'C'h'$ , pelas equações (A.23) e (A.24), descritas no anexo A.3.

$$L' = L^* \quad (\text{B.1})$$

$$a' = (1 + G)a^* \quad (\text{B.2})$$

$$b' = b^* \quad (\text{B.3})$$

Com:

$$G = 0,5 \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^{*7}}{\bar{C}^{*7} + 25^7}} \right) \quad (\text{B.4})$$

Onde  $\bar{C}^*$  é a média aritmética dos valores de croma,  $C^*$ , entre dois pares de amostras, 1 e 2.

$$\Delta L' = L'_1 - L'_2 \quad (\text{B.5})$$

$$\Delta C' = C'_1 - C'_2 \quad (\text{B.6})$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \text{seno} \left( \frac{\Delta h'}{2} \right) \quad (\text{B.7})$$

Com:

$$\Delta h' = h'_1 - h'_2 \quad (\text{B.8})$$

Os termos para correção da dependência da luminosidade,  $S_L$ ,  $S_C$ , e  $S_H$ , são dados por:

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}} \quad (\text{B.9})$$

$$S_C = 1 + 0,045 \bar{C}' \quad (\text{B.10})$$

$$S_H = 1 + 0,015 \bar{C}' T \quad (\text{B.11})$$

Com:

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{h}') + 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\bar{h}' + 63^\circ) \quad (\text{B.12})$$

Já o termo de rotação  $R_T$  é dado por:

$$R_T = -\text{seno}(2\Delta\theta)R_C \quad (\text{B.13})$$

Com:

$$\Delta\theta = 30 e^{-\left(\frac{\bar{h}' - 275^\circ}{25}\right)^2} \quad (\text{B.14})$$

E:

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \quad (\text{B.15})$$

Assim, com os valores intermédios determinados, seria então possível calcular a distância CIEDE2000, como indicada na equação (2.13).





2021

SHELBE ALEXANDRE DE ANDRADE

UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE IMAGEM  
PARA CARACTERIZAÇÃO DA COR DA ROLHA DE CORTIÇA