Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos de Colorimetria

A palavra espectro foi usada pela primeira vez por Isaac Newton, no século 17 na sua célebre experiência na qual a luz solar incidia sobre um prisma e observava-se a sua decomposição. Antes disso, Aristóteles, Leonardo da Vinci, Goethe e outros gênios da arte também estudaram a natureza da luz e da visão colorida, mas foi somente no início do século 19 que Thomas Young identificou corretamente a luz como a origem da sensação da cor. Em 1801 Thomas Young propôs sua teoria tricromática que mais tarde foi refinada por Hermann von Helmholtz que propôs que o olho continha apenas três tipos de receptores de cor, que respondiam mais fortemente aos comprimentos de onda vermelho (R), verde (G) e azul-violeta (B). Essa teoria foi confirmada nos anos 1960 e será a base na descrição sintética a seguir sobre colorimetria. (McDonald, et al., 1997)

O espectro eletromagnético pode cobrir desde o comprimento de onda na ordem de 10²m para as ondas do rádio e da televisão até a 10⁻²⁸m dos raios cósmicos. O olho humano pode ver o espectro na faixa aproximada de 380 a 780 nm que estimulam a retina do olho. Essa faixa visível é arranjada ordenando-se o violeta, verde, amarelo, laranja e vermelho de acordo com os diferentes comprimentos de onda da luz esquematizado pela figura 1.



Figura 1 - Espectro visível

2.1.1 A Cor

É difícil definir o significado da palavra cor, em parte porque há muitos aspectos diferentes envolvendo o assunto. Para o ser humano, através de seu olho, a cor será percebida pela emissão, reflexão ou transmissão da radiação eletromagnética, na faixa visível de 380 a 780nm, de um objeto. Do ponto de vista físico, a cor é a distribuição espectral da radiação emitida, refletida ou transmitida. No aspecto psicofísico, a cor é a sensibilidade visual devido a reação do olho humano provocada pela radiação. Isto implica que três

componentes são exigidos para criar o que nós chamamos cor: uma fonte de luz, um objeto, e um mecanismo para detectar e interpretar a luz, como por exemplo, o olho humano junto com o cérebro do observador ou um equipamento detector, como apresentado na figura 2.

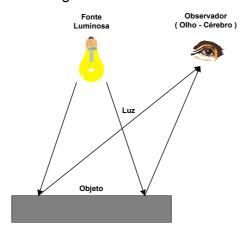


Figura 2 – Cor: os três componentes. Fonte, objeto e observador (Hunter, 1987)

Considerando do ponto de vista psicofísico, as características da fonte de luz, do objeto, e do observador/detetor são importantes para se poder descrever a cor, como indicadas nas curvas espectrais da Figura 3. As três primeiras curvas representam respectivamente a distribuição da energia relativa da fonte de luz, por exemplo, a luz média representativa do dia, a refletância de um objeto e a resposta do observador/detetor. Estas combinam dando um estímulo que contém todas as informações necessárias para descrever o que nós chamamos cor.

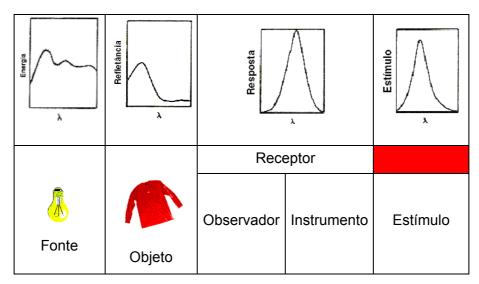


Figura 3 – A cor apresentada esquematicamente: curvas espectrais

A Comissão Internacional de Iluminação (normalmente conhecida como CIE, do francês "Commission Internationale de l'Eclairage") é a autoridade internacional em luz, iluminação, cor, e espaços de cor. A CIE tem sua sede em Viena, Áustria.

Mas a cor é muito mais complexa que isso por causa do papel protagonizado pelo cérebro e todos os mecanismos intermediários associados com visão colorida. Muito pouco é conhecido sobre o assunto comparado ao conhecimento dos aspectos puramente físicos da cor. Os aspectos interpretativos da cor a fazem uma experiência intensamente pessoal. Não há como saber exatamente como uma outra pessoa experimenta um certo efeito da cor, nem se pode compartilhar dessa experiência.

No aspecto psicométrico as cores são representadas em um espaço de cores chamado CIELAB, baseado nas medições físicas e nas transformações psicofísicas.

Considerando-se o aspecto visual ou da percepção, as cores são representadas por sistemas de ordenação de cores e descritas em termos de três características: a tonalidade, a luminosidade e a saturação. A estrutura psicométrica é muito similar ao espaço visual.

É importante uma breve discussão da interpretação e da tradução das três características ou atributos das cores no campo visual. O uso "stricto sensu" a ser encontrado nesse trabalho será: tonalidade ("hue"), luminosidade ("value") e saturação ou croma ("chroma"). Deve-se ter sempre em mente o significado de cada um dos três termos, uma vez que nos textos em português que mencionam a cor há muitos sinônimos utilizados, em função de preferências pessoais e inerentes à própria riqueza de nossa língua, que podem gerar confusão.

2.1.2

Características das Cores

"Hue" é a qualidade da cor a qual descrevemos pelas palavras vermelho, amarelo, verde, azul etc. Estritamente falando, "Hue" é o nome da "família" para um grupo de cores. Este termo será usado como tonalidade, mas pode ser encontrado na literatura como matiz, tom ou simplesmente cor.

"Value" é o atributo da cor o qual geralmente descrevemos pelas palavras claro, escuro, relacionando tal cor a um cinza de luminosidade similar. Usaremos o termo luminosidade. Este termo é também conhecido como claridade e

existem diversos índices ou níveis de luminosidade (cinzas neutros) entre o nível máximo (branco absoluto) e o nível mínimo (preto absoluto).

"Chroma" é aquela qualidade da cor pela qual nós distinguimos uma cor forte de uma cor fraca ou que está relacionada à quantidade de cor existente. O grau de afastamento de uma sensação de cor do branco ou do cinza; a intensidade de uma tonalidade distinta. É observado freqüentemente na literatura traduzida encontrar termos tais como saturação, croma, intensidade, vivacidade, pureza, cromaticidade e profundidade. Usaremos o termo saturação ou croma. As cores do espectro visível são as mais puras ou saturadas.

A figura 4 resume as três características em uma determinada forma de ordenar as cores.

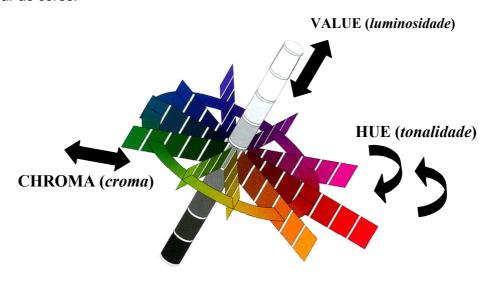


Figura 4 – Características das cores (Hirschler, 2002)

2.1.3

Iluminantes

Para o sistema CIE de colorimetria, fonte de luz é a luz fisicamente real a qual pode-se determinar experimentalmente a respectiva distribuição espectral de energia. Por outro lado, iluminante é uma luz definida por uma distribuição espectral de energia que pode ou não existir fisicamente. Provavelmente a fonte de luz mais comum ainda seja a lâmpada elétrica de filamento de tungstênio que pertence à família de dispositivos de filamento quente que mais se aproxima das propriedades dos corpos negros. Há materiais que parecem negras quando frias e quando emitindo luz incandescente, primeiro vermelho, transformando-se em

alaranjado, amarelo e finalmente em branco à medida que a temperatura cresce (Billmeyer, 1976).

Por definição, um corpo negro absorve toda a radiação incidente sobre ele e emite a máxima quantidade possível de radiação a uma dada temperatura.

A distribuição espectral de energia, na região visível, de um corpo negro a 2854K, na escala de uma lâmpada de tungstênio (iluminante A), e a 6500K, na escala da luz do dia (iluminante D65), são mostradas nas figuras 5 e 6.

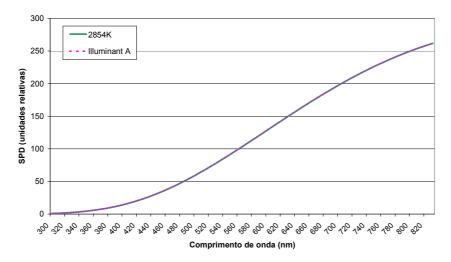


Figura 5 – Comparação entre uma Fonte (2854K) e um Iluminante CIE (A): as curvas ficam sobrepostas (Hirschler, 2002)

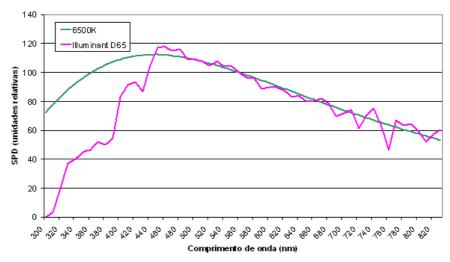


Figura 6 – Comparação entre uma Fonte (6500K) e um lluminante CIE (D65) (Hirschler, 2002)

Uma vez que a distribuição espectral de energia da fonte de luz determina sua cor, define-se a temperatura da cor de uma fonte como a temperatura de um corpo negro cuja radiação tem a mesma cromaticidade do estímulo considerado. Muitas fontes de luz possuem cores muito próximas aos corpos negros, mas de distribuição espectral bem diferente. Nesse caso é usado o termo temperatura

correlata da cor para descrever a percepção da cor da luz dessa fonte. É o caso da luz do dia. A curva de distribuição espectral de energia da luz do dia média com temperatura correlata de 6500K e a curva do respectivo iluminante que foi definido pela CIE em 1966 como iluminante D_{65} (D - "day light"; 65 - temperatura de 6500K correlata da cor) (Billmeyer, 1976. P. 71).

2.1.4

Quantificando a cor no sistema da CIE

Lord Willian Thomson KELVIN, físico inglês, dizia: "Quando você puder medir sobre o que você está falando e expressar isto em números, você sabe algo sobre isto". Lidando com cores podemos obter, de medidas instrumentais, números que correlacionam bem com o que nós vemos. Deste modo a sensação visual pode ser quantificada e o estudo da cor e outros fenômenos relacionados com a visão tornaram-se uma ciência exata. É essencial saber como se quantificar a cor (Billmeyer, 1967, p. 44).

2.1.4.1

Espectrofotômetro

Os coloristas e profissionais da área de controle de qualidade, tradicionalmente, avaliam a cor visualmente. Devido às exigências cada vez mais crescentes dos consumidores, a utilização de instrumentos de medição da cor está ganhando importância nas industrias. Deficiências no campo da subjetividade natural do avaliador visual, a falta de rastreabilidade e a ausência de definições claras podem ser supridas pela medição instrumental da cor como uma ferramenta de auxilio à decisão.

O espectrofotômetro é um equipamento que mede a transmitância e refletância de uma superfície ou amostra em função do comprimento de onda, podendo ser usado também para formulação de receitas quando associado a um software próprio. A figura 7 apresenta esquematicamente o seu funcionamento. A luz policromática e difusa, inicialmente, ilumina a amostra. Essa luz refletida passa pelo prisma, grade ou outro dispositivo apropriado, e sofre uma difração, e os componentes monocromáticos chegam nos detectores espectrais, cada um no lugar correspondente ao seu comprimento de onda (λ). Cada um dos detectores manda um sinal correspondente à energia relativa recebida naquele

comprimento de onda (λ) e finalmente o fator de refletância, em porcentagem, fica registrado.

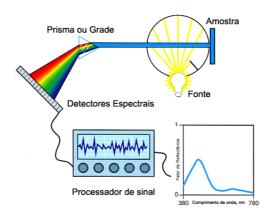


Figura 7 – Espectrofotômetro (Berms, 2000)

A Geometria de medição é a condição de iluminação/observação que descreve o ângulo ou a maneira na qual o instrumento de medição da cor ilumina a amostra e observa (recebe) a luz refletida resultante da iluminação. As principais geometrias de medição utilizadas na indústria, de acordo com o sistema de iluminação, apresentadas na figura 8, são as seguintes (Hunter, 1987):

- Sistema de Iluminação difusa com esfera de integração. Usa uma esfera revestida internamente com material branco, tal como sulfato de bário, para que a luz permaneça uniformemente difusa em todas as direções para iluminar e visualizar a amostra.
 - a) Geometria "t/8": a amostra é iluminada com luz difusa e observada com o componente especular incluído (SIN, "specular included") a 8° em relação à normal; e
 - b) Geometria "d/8": a amostra é iluminada com luz difusa e observada com o componente especular excluído (SEX, "specular excluded") a 8[°] em relação à normal.
- Sistema de Iluminação unidirecional. Esse método provê iluminação de uma direção de 45°.
 - a) Geometria "45/0": fornece iluminação de 45° sobre a amostra e recepção de 0° para medição do fator de refletância difusa, comumente designado de 45/0.

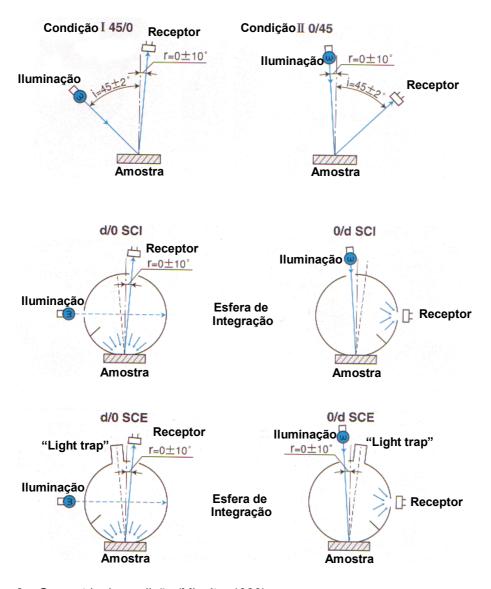


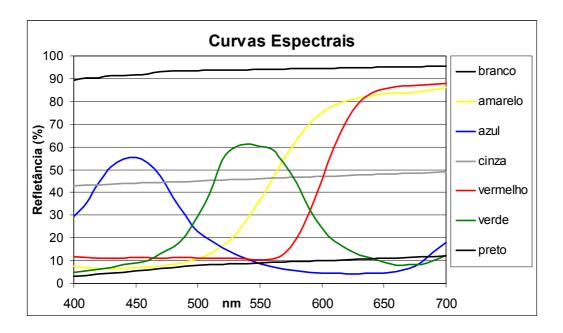
Figura 8 – Geometria de medição (Minolta, 1986)

2.1.5 Curvas Espectrofotométricas

As medições das frações de luz incidente refletida ou transmitida em diferentes comprimentos de onda são ditas espectrofotométricas. Os resultados de tais medidas são normalmente apresentados como curvas nas quais porcentagem de refletância ou de transmitância é mostrada para cada comprimento de onda em relação a uma particular referência.

Sete curvas espectrofotométricas são exibidas na figura 9. O eixo das ordenadas está representando a porcentagem de luz refletida e no eixo das abscissas está o comprimento de onda. As curvas representam o branco, preto, cinza, e quatro amostras coloridas. O branco é caracterizado por alta refletância

ao longo do espectro, o preto por muito baixa refletância ao longo do espectro, e o cinza por média e uniforme refletância. As curvas das amostras coloridas são diferentes nas variações de porcentagens de refletância notadamente de uma para outra parte do espectro. A refletância da amostra vermelha é alta no final do vermelho do espectro mais baixa no resto do espectro. Semelhantemente, as amostras verdes e azuis têm seus mais altos valores refletância nas partes verdes e azuis do espectro, respectivamente. Porém, a curva característica do amarelo tem grandes quantidades de vermelho, amarelo, e verde do espectro e baixa só de azul.



Figuras 9 – Exemplo de curvas espectrais

As curvas espectrofotométricas podem mudar significativamente com a mudança da geometria de medição do feixe de luz no espectrofotômetro. A cor de um objeto não-metálico é atingida pela luz difusa refletida do objeto. Essa luz penetra no objeto e é refletida repetidamente por partículas dentro do objeto. Se neste processo sofre absorção seletiva por pigmentos ou corante, emerge como luz difusa colorida. Deste modo, para medir cor de objetos não-metálicos opacos, usa-se espectrofotômetro de refletância difusa. Porém, se as condições de medição geométricas do espectrofotômetro incluem e excluem a refletância especular, os valores medidos da reflexão difusa serão acrescentados em todos os comprimentos de onda por uma quantia constante, como a mostrada na figura 10. Esta quantia é a porcentagem da incidência de luz que é refletida

especularmente pela superfície, aproximadamente 5% para a superfície brilhante do exemplo.

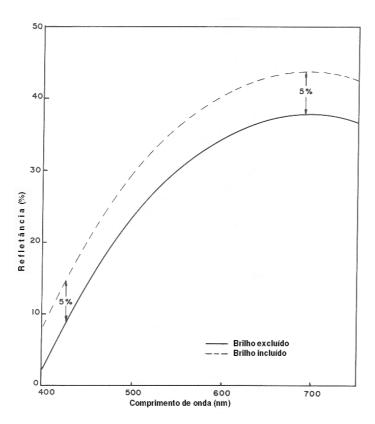


Figura 10 – Refletância e brilho (Hunter, 1987)

Um antigo experimento de matização de cores descrito por Isaac Newton por volta de 1700 e extensivamente estudado depois por Grassmann na metade do século dezenove formou a base de muitos estudos atuais na área de colorimetria. Consistia em matizar a cor de uma luz de teste com a mistura aditiva de três cores, ditas primárias, superpostas numa superfície como apresentado na figura 11. Foi demonstrado por Grassmann que todas as cores podem ser matizadas com a combinação de somente três cores primárias ou com a combinação adequada de luzes espectrais (Billmeyer, 1967).

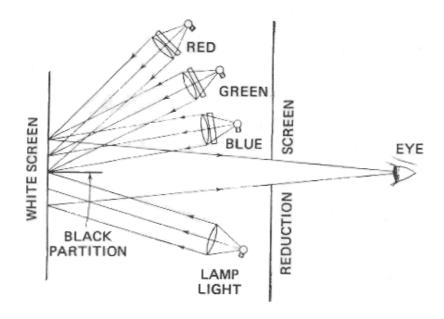


Figura 11 – Experimento de Grassmann (Hunter, 1987)

Especificamente, podemos encontrar para um observador de visão de cor normal, três cores primárias necessárias para matizar cada uma das cores do espectro. Dessas cores adequadamente escolhidas obteremos o vermelho, o verde e o azul que consideraremos como as três cores primárias. Por conseguinte, o experimento de Grassmann realizado com um pequeno, porém seleto grupo de observadores resultou nas curvas da figura 12 que representam de maneira quantitativa a capacidade de matização colorida do olho humano. Ou seja, mostra curvas da sensibilidade espectral correspondente ao olho humano, que após algumas transformações matemáticas adequadas, a CIE em 1931 adotou como padrão o conjunto de três funções de matização de cores para um observador padrão com um campo visual de 2°. Em 1964, foi definido um outro observador padrão suplementar para um campo visual de 10°. As curvas da figura 12 representam as funções de matização da cor, ou sejam, os valores espectrais triestímulos dos observadores padrão no sistema CIE 1931 (2°) e 1964 (10°).

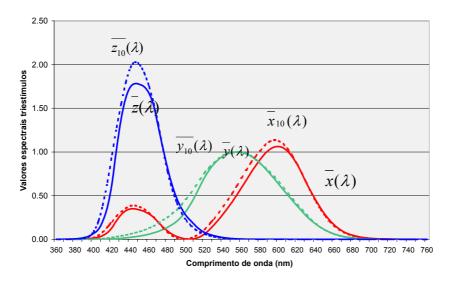


Figura 12 – Funções de matização de cores (Dados da norma CIE/ISO)

Apresentou-se esquematicamente na figura 3 a interpretação da cor por meio de curvas espectrais. Agora, com a definição do observador padrão, o estímulo será expresso por três valores numéricos que representarão a cor. Esses três valores, mostrados na figura 13, são representados pelas áreas indicadas que são resultantes da combinação do iluminante, do objeto e do observador padrão CIE.

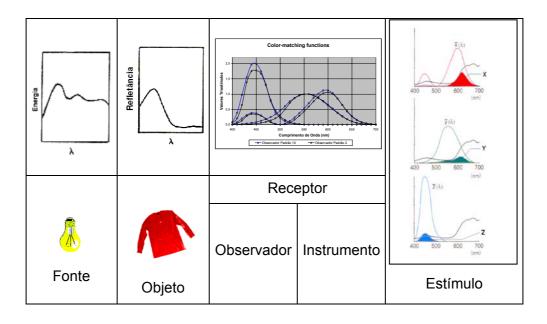


Figura 13 – A cor apresentada esquematicamente: valores triestímulos

2.1.6

Valores Triestímulos X Y Z

Os valores triestímulos definidos pela CIE são determinados por meio das expressões a seguir:

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
 (1)

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
 (2)

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
 (3)

$$K = \frac{100}{\int_{390}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$
 (4)

Como as funções envolvidas na prática são discretas e com pontos tabeladas, usamos as expressões abaixo:

$$X = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
 (5)

$$Y = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
 (6)

$$Z = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda$$
 (7)

$$K = \frac{100}{\sum_{380}^{780} S(\lambda) \overline{y}(\lambda) d\lambda}$$
 (8)

Onde:

 $S(\lambda)$: Distribuição espectral de energia do iluminante;

 $\bar{x}(\lambda); \bar{y}(\lambda); \bar{z}(\lambda)$: Funções de matização de cores para o observador padrão do sistema CIE 1931 (2°) ou CIE 1964 (10°); e

 $R(\lambda)$: Refletância espectral da amostra.

Os valores triestímulos X, Y e Z que definem um espaço psicofísico tridimensional são de difícil interpretação visual. Portanto, foi definido pela CIE o

espaço psicométrico $L^*a^*b^*$ que torna a interpretação visual similar ao sistema visual de ordenação de cores chamado Munsell. É conhecido como sistema CIE de Colorimetria ou CIELAB.

No espaço psicométrico CIELAB as cores são descritas (figura 14) pela luminosidade (L^*), pelo conteúdo de vermelho / verde (a^*) e de amarelo/azul (b^*); ou pelas coordenadas cilíndricas de luminosidade (L^*), tonalidade (h°) e croma (C^*).

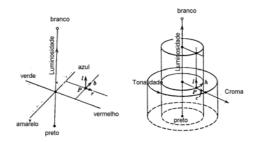


Figura 14 - Espaço CIELAB; espaço psicométrico

As figuras 15 e 16 apresentam o significado geométrico destes conjuntos de coordenadas colorimétricas.



Figura 15 – Espaço CIELAB (Minolta, 1986)

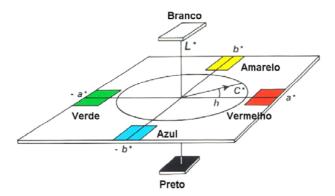


Figura 16 – Espaço CIELAB; significado geométrico das coordenadas (Hirschler, 2000)

As coordenadas $L^*a^*b^*$ do espaço psicométrico CIE são calculadas pelas equações abaixo descritas. Verifica-se que tais coordenadas foram obtidas a partir dos valores triestímulos, sendo que o valor triestímulo Y se refere somente à luminosidade da amostra, sendo que X_n , Y_n e Z_n são as coordenadas do ponto neutro. Vale ressaltar que cada conjunto tem um X_n , Y_n e Z_n que dependerá de um iluminante e um observador (CIE 1986).

$$L^* = 116 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - (16/116) \right]$$
 Luminosidade métrica; (9)

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$
 Eixo vermelho (+) / verde (-); (10)

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$
 Eixo amarelo (+) / azul (-); 11)

Onde:

X,Y,Z : são os valores triestímulos da amostra para um observador padrão 2° ou 10° .

 X_n,Y_n,Z_n : são valores triestímulos do branco ideal padrão para um observador padrão 2° ou 10° .

Verificar se:

$$f(X_{X_n}) = \sqrt[3]{(X_{X_n})}$$
 para $X_{X_n} > 0.008856$ e (12)

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7,787\left(\frac{X}{X_n}\right) + (16/116) \text{ para } \frac{X}{X_n} \le 0,008856$$
 (13)

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\left(\frac{Y}{Y_n}\right)} \qquad \text{para} \qquad \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \text{ e} \qquad (14)$$

$$f(Y/Y_n) = 7.787(Y/Y_n) + (16/116)$$
 para $Y/Y_n \le 0.008856$ (15)

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \sqrt[3]{\left(\frac{Z}{Z_n}\right)} \qquad \text{para} \qquad \frac{Z}{Z_n} > 0,008856 \text{ e} \qquad (16)$$

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7.787\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + (16/116)$$
 para $\frac{Z}{Z_n} \le 0.008856$ (17)

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$
 Croma métrica; e (18)

$$H_{ab}^{0} = arc \tan \left(\frac{b^{*}}{a^{*}}\right)$$
 Ângulo (graus) da tonalidade métrica. (19)

No espaço CIELAB, em termos psicométricos, a diferença de cor entre dois estímulos, no caso entre o do padrão e da amostra, pode ser quantificada pela distância entre as duas posições do espaço uniforme CIELAB, apresentado na figura 17, e definida pelas fórmulas:

$$\Delta L^* = L_{amostra}^* - L_{padr\tilde{a}o}^* \tag{20}$$

$$\Delta a^* = a^*_{amostra} - a^*_{padrão} \tag{21}$$

$$\Delta b^* = b_{amostra}^* - b_{padrão}^* \tag{22}$$

$$\Delta C_{ab}^{\quad *} = C_{ab,amostra}^{*} - C_{ab,padr\tilde{a}o}^{*} \tag{23}$$

$$\Delta E_{ab}^{*} = \sqrt{(\Delta L^{*})^{2} + (\Delta a^{*})^{2} + (\Delta b^{*})^{2}}$$
 (24)

$$\Delta H_{ab}^{*} = \sqrt{\left(\Delta E_{ab}^{*}\right)^{2} + \left(\Delta L^{*}\right)^{2} + \left(\Delta C_{ab}^{*}\right)^{2}}$$
 (25)

A diferença de cor é denominada pela expressão ΔE^* e indicado na figura 17.

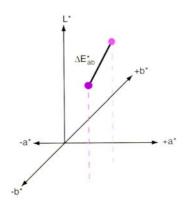


Figura 17 – Diferença de cor no espaço CIELAB

Reconhece-se que os valores da equação de diferença de cor CIELAB correlacionam mal com as avaliações visuais. Essa deficiência é causada pela não uniformidade do espaço de cor CIELAB. A fórmula CMC(l:c), então, é uma modificação da fórmula correspondente de diferença de cor CIELAB, que possui uma melhor correlação entre avaliações visuais. Reproduz melhor aquilo que observamos visualmente, pois por intermédio de pesos atribuídos na fórmula podemos produzir uma sensibilidade diferenciada ao contrário do que ocorre na

fórmula CIELAB. No espaço CIELAB ΔE é representado por uma esfera cujo raio é a diferença de cor. Para a fórmula CMC, ΔE é representado por um elipsóide sólido irregular em função dos atributos de sensibilidade. O símbolo da diferença de cor é $\Delta E_{\it CMC}$ (AATCC, 2003).

Cálculo de Pequenas Diferenças de Cor, $\mathit{CMC}(l:c)$ (AATCC Test Method 173-1998):

$$\Delta E_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{lS_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{S_H}\right)^2}$$
 (26)

$$S_L = \frac{0.040975L^*}{1 + 0.01765L^*} \to L^* > 16 \text{ ou}$$
 (27)

$$S_L = 0.511 \rightarrow L^* < 16$$
 (28)

$$S_C = \frac{0.0638C_{ab}^*}{1 + 0.0131C_{ab}^*} + 0.638$$
 (29)

$$S_H = S_C \times (fT + 1 - f) \tag{30}$$

onde

$$f = \sqrt{\frac{(C_{ab}^*)^4}{(C_{ab}^*)^4 + 1900}} \quad \text{e}$$
 (31)

$$T = 0.36 + |0.4\cos(h_{ab} + 35)| para h_{ab} < 164^{\circ} e h_{ab} > 345^{\circ} ou$$
 (32)

$$T = 0.56 + |0.2\cos(h_{ab} + 168)| \ para \ 164^{\circ} < h_{ab} < 345^{\circ}$$
 (33)

Sendo que para têxteis l = 2 e para tintas l = 1.

2.1.7

Repetitividade e exatidão na colorimetria

Repetitividade significa o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição. Ela é afetada por erros aleatórios (INMETRO, 2000).

As fontes mais comuns de erros aleatórios em colorímetros, espectrofotômetros e espectroradiômetros são variações na sensibilidade, ruído eletrônico e a apresentação das amostras. Com os modernos instrumentos, para uma dada amostra, o significado da diferença de cor, na média de um conjunto de medidas, pode geralmente representar 0,1 ou menos na unidade CIELAB de

diferença de cor. Esse desempenho tem sido aplicado para a avaliação de diferença de cor de pares de amostras medidos no mesmo instrumento. É também aplicado para medições realizadas no mesmo dia e para séries de medições durante períodos de várias semanas ou mais (Hunter, 1987).

Exatidão significa o grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando. Ela é afetada por erros sistemáticos (INMETRO, 2000).

As fontes mais comuns de erros sistemáticos nos modernos instrumentos são a calibração dos comprimentos de onda, a linearidade do detector, a geometria de iluminação e de visão e a polarização. Podem também estar associados com a dispersão e reflexão errática da luz (*stray light*), escala do comprimento de onda, largura de banda, calibração do branco de referência, o termocromismo e a fluorescência. A exatidão é geralmente avaliada por comparação de resultados com os resultados padrão obtidos por laboratórios de padrões nacionais usando-se os melhores possíveis instrumentos e procedimentos (Hunter, 1987).

Quando resultados colorimétricos são comparados, é essencial assegurar o que está sendo comparado com o que. Portanto, o iluminante (A, C ou D65 etc.), o observador padrão (2° ou 10°) e a geometria de iluminação e observação (45/0, d/0, t/0, brilho incluído ou excluído etc.) devem ser todos os mesmos para os dois conjuntos de dados. Se não forem, as comparações podem estar sendo realizadas sem significado, ao menos que o propósito seja somente demonstrar o efeito de algumas diferenças nas condições de medição. Por exemplo, se uma medição refere-se a um iluminante C e outro ao D65, então a comparação não tem sentido a menos que a mesma amostra e as mesmas condições (exceto para o iluminante) estejam envolvidas, e o propósito fosse somente para comparar a colorimetria desta amostra sob estes dois iluminantes.

Com relação à preparação das amostras, em várias aplicações as medidas colorimétricas são realizadas somente em amostras selecionadas de uma grande população de material. É, portanto necessário que a amostra seja representativa de uma grande população. É preciso evitar amostras que possuam não uniformidades causadas por sujeiras, bolhas, raias, ou variações no nivelamento, por exemplo. Uma inspeção visual é um método muito sensível para detectar a presença de tais defeitos e, portanto as amostras devem ser sempre inspecionadas. Falha nesse procedimento pode levar a obterem-se resultados bastante enganosos. Algumas amostras, tais como de tecidos, possuem efeitos direcionais, estando estas cores dependentes da direção da

iluminação e visão. Essas diferenças podem ser exploradas pela orientação das amostras em diferentes ângulos quando usando a geometria 0/45 ou 45/0; se a geometria 0/difusa ou difusa/0 é usada, os resultados tenderão a ser uma média para todas as direções. Mas, em todos os casos, para uma maior repetitividade nos resultados, tais amostras devem sempre estar numa mesma orientação (Hunter, 1987).

2.1.7.1

A prática de minimizar erros

Precauções úteis que podem ser tomadas na prática e que podem evitar ou minimizar as fontes de imprecisões e erros na colorimetria (Hunter, 1987):

- a- Assegurar uma inspeção visual e que todas as amostras sejam selecionadas apropriadamente e estejam limpas, uniformes e sem imperfeições;
- b- Armazenar todos os padrões de trabalho em recipientes de proteção apropriados quando não estiverem em uso e assegurar que estejam limpos e em boas condições de uso;
- c- Assegurar que os equipamentos sejam mantidos e operados de acordo com as instruções do fabricante;
- d- Montar todas as amostras de reflexão em suportes padrões e realizar as medições de amostras texturizadas numa mesma orientação;
- e- Quando amostras s\(\tilde{a}\) iluminadas com luz branca em instrumentos, verificar quanto ao termocromismo realizando sucessivas medidas em um apropriado per\(\tilde{o}\) de tempo;
- f- Selecionar a apropriada geometria de iluminação e visão, e usá-la sem mudanças em cada conjunto de medições;
- g- Quando computando os valores triestímulos, usar intervalo de comprimento de onda de 5, 10 ou 20nm;
- h- Quando comparando valores triestímulos ou qualquer medida derivada deles, usar os mesmos procedimentos de medida e computação para todos os dados; isso é particularmente importante quando parâmetros em cores sólidas ou diferenças de cores estão sendo calculados;
- i- Quando realizando medições de amostras fluorescentes sempre as ilumine com luz branca;
- j- Realize repetidas medições nos padrões de trabalho para verificar a repetitividade;
- k- Realize as amostras calibradas para verificar a exatidão;

- I- Se uma grande exatidão é requerida use um procedimento de correção; e
- m- Quando citar resultados, listar as seguintes condições sob as quais eles foram obtidos:
 - Geometria de iluminação e visão;
 - II. Fontes de medição (para amostras fluorescentes);
 - III. Tipo de espectrofotômetro ou espectroradiômetro usado (ou largura de banda) para todas as medidas espectrais ou tipo de colorímetro usado:
 - IV. Observador e iluminante padrão usado para os valores triestímulos; e
 - V. Método de computação usado para obter os valores triestímulos dos dados espectrais (incluindo escala de comprimento de onda e intervalo, e o uso de qualquer procedimento de correção ou otimização).

2.2

Sistemas de ordenação e classificação de cores

2.2.1

Sistemas existentes

Podemos citar alguns sistemas existentes no passado e alguns ainda em uso atualmente tais como o Sistema de Cor da Tradição Islâmica, o Sistema de Aron Sigfrid Forsius (1611) e o sistema desenvolvido por Sir Isaac Newton (1704), cujos tratados acerca de colorimetria fazem parte da História desta Ciência. Muitos outros sistemas de ordenação e classificação de cor, mais recentes, cada um deles com descrição detalhada do princípio norteador do tipo de arranjo, cuja grande variedade não caberia aqui relatar, são abordados por Judd e Wyszecki (1975).

Os sistemas de ordenação de cores que mais se destacam atualmente são: o sistema Natural de Cores (NCS-Natural Colour System), o sistema OSTWALD e o sistema Munsell. Será abordado o sistema Munsell por ser o mais usado na colorimetria têxtil.

2.2.1.1

O Sistema de Cor Munsell

Provavelmente, o mais conhecido de todos os sistemas de ordenação de cor é o Sistema de Cor Munsell. Tal sistema está baseado no princípio guia de percepção visual igual e é tanto uma coleção de amostras pintadas para representar intervalos iguais de percepção visual entre amostras adjacentes quanto um sistema para descrição de todas as possíveis cores em termos de suas três coordenadas: "Hue", "Value" e "Chroma".

As coordenadas do Sistema de Cor Munsell citadas anteriormente foram definidas na língua materna do criador do sistema, o Sr. Albert H. Munsell, um artista pintor nascido em Boston, Massachussetts, em 1858.

2.2.1.2

Formas de apresentação do Sistema de Cor Munsell

Árvore de Cor Munsell - Usada como ilustração de como foi desenvolvido tal sistema e procura representar no espaço as três coordenadas através de páginas de tonalidades constantes. É uma peça muitas vezes encontrada nos laboratórios de colorimetria, fornecida pela firma MUNSELL COLOR-MACBETH DIV. apresentada na figura 18.



Figura 18 – Árvore de cor Munsell (www.gretagmacbeth.com)

Há três edições diferentes do Livro de Cor Munsell exibindo diferentes números, tamanhos e acabamentos (brilhantes ou fosco) de amostras. Por

exemplo, a coleção de acabamento brilhoso apresenta 1450 pequenos pedaços de amostras pintadas com cores brilhosas colocados em um classificador contendo 40 cartas de tonalidade constante em páginas de verso e reverso. Uma escala do cinza com dezoito passos está também incluída. Cada elemento colorido pode ser removido da carta. O tamanho da carta é de, aproximadamente, 25,4 por 30,5cm; o tamanho de cada pedaço é de, aproximadamente, 1,7 por 2,0cm; a coleção inteira possui dois volumes.

Em cada carta de tonalidade constante os pedaços estão arranjados em fileiras e colunas. Neste arranjo, pretende-se que os pedaços contidos em uma fileira sejam vistos como tendo cores igualmente claras sob condições ordinárias de observação (iluminação luz do dia, com ambiente circunvizinhante na cor cinza médio a branco). Também é objetivo que as cores de uma coluna sejam percebidas como tendo cores de croma igual. O progresso das cores, desde as muito claras na parte de cima de cada carta até as muito escuras situadas na parte de baixo, é feito em passos de percepção visual igual. Da mesma maneira, o progresso das cores acromáticas, preto, cinza ou branco, do limite interno de cada carta até as cores cromáticas do limite externo é feito também em passos de percepção visual igual que é o princípio norteador da construção do sistema. As páginas de tonalidade constante têm cores com luminosidade constante em linhas horizontais com a croma crescendo do cinza até as cores mais puras. As colunas mostram cores com croma constante, com a luminosidade crescendo de baixo para cima.

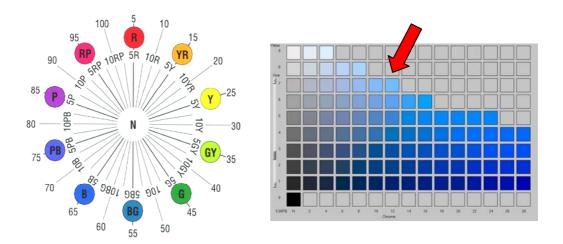


Figura 19 – Sistema ordenação de cores Munsell (Software CMC da GretagMacbeth, www.gretagmacbeth.com)

O segundo e terceiro símbolos (sempre números) indicam a Luminosidade Munsell e o Chroma Munsell nesta ordem e são separados por uma barra (/). Um exemplo de designação completa dentro do Sistema de Cor Munsell seria 5PB 7/12, indicado com uma seta na figura 19, designando uma cor de tonalidade 5 azul-púrpura com chroma de /12 passos afastado do cinza neutro 7/ de mesma Luminosidade Munsell.

O Arquivo de Cores Munsell - é composto de, aproximadamente, 1000 amostras pintadas de tamanho (3,3 por 5,1cm) maior do que o das amostras encontradas no livro de Cor Munsell que podem ser usadas para trabalhos de medição computadorizada de cor, pois permitem a leitura na maioria dos espectrofotômetros existentes.

As Cartas de Estudante Munsell são cartas de tonalidade constante utilizadas para fins didáticos em cursos e demonstrações do Sistema de Cor Munsell. Facilitam o aprendizado e a compreensão de como foi desenvolvido e está baseado o sistema para aqueles estudantes do assunto Ciência da Cor, Colorimetria e relacionados. Tais cartas de estudante vêm com os espaço em branco que devem ser preenchidos com os pedaços soltos fornecidos de maneira a localizar cada cor no seu espaço determinado segundo os atributos Luminosidade Munsell e Chroma Munsell.

A Carta de Tonalidade, Luminosidade/Chroma Munsell é uma carta em tamanho de um quadro que nos mostra, de maneira ilustrativa e de impressivo efeito visual.

Vários aspectos notáveis do Sistema de Cor Munsell contribuem para a sua ampla aceitação como ferramenta útil para a solução de muitos problemas colorimétricos. O primeiro aspecto é que tal sistema está baseado em escalas de cor espaçadas de maneira quase uniforme em conformidade com a capacidade de percepção visual igual. Dentro dos limites de chroma (6-10) tirados pelas amostras do Livro de Cor Munsell original, existe muito pouca evidência de desvio em passos iguais de percepção visual em qualquer das coordenadas Munsell. Poucos são os outros sistemas de cor tão bons neste respeito; o Sistema de Cor Munsell é o padrão com o qual todos os outros sistemas de cor são comparados.

Um segundo aspecto notável do Sistema de Cor Munsell é que a sua designação não está ligada ou limitada por amostras existentes. Qualquer cor concebível pode ser encaixada dentro do sistema. Em contraste, a maioria das coleções de amostras físicas está baseada em espécimes altamente coloridos e não poderia acomodar mais amostras altamente coloridas se alguma fosse

achada. Isso é particularmente verdade no caso de sistemas baseados em leis de mistura de cores ou de comportamento de corantes; eles, inevitavelmente, estão baseados na maioria dos corantes adequados disponíveis no momento e não podem prontamente ser modificado para incluir desenvolvimentos recentes.

Ainda outro aspecto notável do Sistema de Cor Munsell é que as amostras do livro de Cor Munsell foram feitas com tolerâncias muito restritas, tanto que o usuário pode confiar que as amostras em sua cópia estão muito próximas em cor daquelas de outras cópias ou de outras edições modernas do citado livro. Novamente, o usuário deveria ser alertado que isso não pode ser verdade em outros sistemas, os quais sempre sofrem de um sério defeito em que a mesma designação corresponde a diferentes cores em diferentes edições. Portanto, em tais sistemas, uma designação de cor é útil somente para identificar uma amostra específica em uma edição específica.

2.3 Padrões Reais

2.3.1

Coleções

Baseado no sistema Munsell de ordenação de cores, há duas coleções têxteis mais conhecidas: a PANTONE e a SCOTDIC. Será abordada no trabalho a coleção PANTONE que é a mais divulgada e com ótima penetração no mercado.

É também utilizado na industria de tintas, cosméticos, arquitetura, moda, nas artes gráficas. Para a área têxtil, a forma de apresentação do sistema PANTONE mais importante e útil é o Selecionador Têxtil de Cores/Algodão contendo cerca de 1000 cores tingidas em pedaços de tecidos de algodão de 2,0 cm por 4,5cm que podem ser separadas em dois pedaços. Tamanhos maiores de amostras (10,25cm por 13,33cm) podem ser fornecidos, se necessário, assim como também páginas avulsas. O Selecionador Têxtil de Cores/Algodão vem ainda com um conjunto de quatro máscaras de isolamento nas cores cinza e branco para facilitar a comparação visual com cores de outras amostras. São especialmente desenhadas para fazer a comparação de uma amostra dada com duas integrantes do Selecionador Têxtil de Cores/Algodão.

Na indústria têxtil brasileira, o Selecionador Têxtil de Cores/Algodão do Sistema PANTONE (figura 20) é geralmente mais barato que outros voltados para o campo têxtil, porém é bastante limitado no tocante ao número de cores disponíveis, consistindo de 1701 amostras em tecido de algodão, em papel ou em formato eletrônico.





Figura 20 – Coleção PANTONE (Hirschler, 2002)

A sua notação (figura 21) consiste em um código de três pares de dígitos. Os primeiros dois dígitos do código Pantone mostram a luminosidade da amostra em uma escala de 10 (mais clara) a 19 (mais escura). O segundo par de dígitos mostra a tonalidade da amostra. O círculo de tonalidade do sistema Pantone é dividido em 64 setores, começando com 01 (verde amarelado) e terminando em 64 (amarelo esverdeado). O terceiro par mostra a saturação (croma) da amostra em uma escala de 00 (cinza) a 64 (saturação máxima).

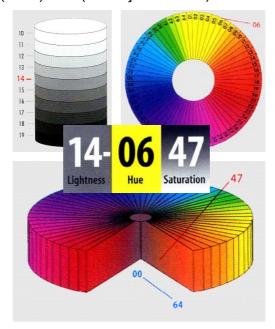


Figura 21 – Notação da Coleção PANTONE (Hirschler, 2002)

2.3.2

Azulejos

O desenvolvimento original foi baseado no fato que as cerâmicas são inerentemente muito duráveis e estáveis. Muitos artefatos recuperados em sítios arqueológicos eram cerâmicos, tendo sobrevivido milhares de anos na terra, no mar ou em construções com pequenas ou nenhuma alteração, como vistos em muitos exemplos do Egito, Grécia e o Império Romano.

2.3.2.1

Desenvolvimento dos Padrões de Cor

Os padrões cerâmicos de cor foram primeiramente desenvolvidos como resultado de reuniões no ano de 1965 entre "The Imperial College, London", "The National Physical Laboratory", "ICI Dyestuffs" e "The British Ceramic Research Association" (conhecido agora como CERAM Research).

Foi determinado que um conjunto de padrões permanentes e uniformes era necessários para prover um controle de desempenho dos instrumentos de medida da cor ao longo do tempo. Esses conjuntos calibrados são necessários para controlar a exatidão de tais instrumentos. Os azulejos cerâmicos foram uma escolha óbvia, pois tinham as propriedades de desempenho e uniformidade exigidas.

Uma seleção de azulejos comercialmente disponíveis foi escolhida e em 1969, os primeiros conjuntos de padrões, chamados de padrões de cor cerâmicos "Ceramic Colour Standards" (CCS), foram comercializados. As cores usadas são mostradas abaixo (CERAM, 2003).

2.3.2.2

Padrões de cor cerâmica (Série I)

O CCS foi rapidamente aceito como o conjunto mais útil e confiável de padrões de instrumento disponível (figura 22). Bem mais de 1000 conjuntos foram distribuídos mundialmente até acabarem os estoques em 1983.



Figura 22 – Padrões de cerâmica série I (CERAM, 2003)

No meio da década de 1970, enquanto os padrões estavam apresentando bom desempenho, experiências com os mesmos estavam sendo realizadas pelo "National Physical Laboratory", e "The British Ceramic Research Association" para discutir como eles poderiam ser atualizados para prover um melhor controle do desempenho de instrumentos modernos, que continuamente evoluíam. Na mesma época, aconteceram os desenvolvimentos de pigmentos e esmaltes que incentivaram o desenvolvimento de um novo conjunto de CCS. Este teria um acabamento mais consistente com um valor de diagnóstico melhor e incluiria dois pares de diferença de cor para controlar a repetitividade e a reprodutibilidade de medidas de diferença de cor. O novo conjunto denominado CCSII foi lançado na 20ª Sessão da CIE em Amsterdã no ano de 1983.

2.3.2.3 Padrões de cor cerâmica (Série II)

O conjunto de padrões cerâmicos de cor "Serie II" (CCSII) é internacionalmente reconhecido como o principal conjunto de padrões para verificar a consistência de operação e exatidão da medição instrumental de cor por longos períodos e inclui 12 padrões de azulejo cerâmicos vítreos (figura 23).

Três Padrões Cinzas Neutros - para verificar a linearidade fotométrica;

Sete Padrões Cromáticos - para verificar a resposta espectral; e

Dois Padrões de Diferença de Cor - provendo uma verificação direta na medida da diferença de cor para propósitos de repetitividade.



Figura 23 – Padrões de cerâmica série CCSII (CERAM, 2003)

Para assegurar que os padrões ajustam-se precisamente na abertura de um instrumento de medição de cor, a produção é cuidadosamente controlada para preservar uma superfície lisa e ligeiramente convexa.

O CCSII são disponíveis em dois tamanhos básicos – 10cm x 10cm e 5cm x 5cm. O novo conjunto foi apresentado para ser muito estável, possuindo prolongada repetitividade e exatidão. Após o lançamento do CCSII, anos mais tarde, novos padrões Pretos e Brancos foram apresentados pela CERAM para a utilização em ajustes de instrumentos.

2.3.2.4

Padrões neutros

Há também um conjunto de dez azulejos com uma escala de cinza, começando com o branco até o preto (figura 25). O valores aproximados da reflectância (0/45) são: (Branco) 88%, 80%, 70%, (Cinza Pale) 61%, 50%, 40%, 34%, (Cinza Médio) 25%, (Cinza Escuro) 5% e (Preto) 0,5%. Um vidro preto opaco especial também é disponível com refletância (0/45) de 0%.

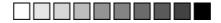


Figura 24 – Padrões cerâmicos neutros (CERAM, 2003)

O Branco pode ser usado para verificar a estabilidade do padrão do próprio instrumento, em um procedimento de garantia de qualidade, enquanto que o cinza (50%) pode ser usado na obtenção da correção para provar erro de absorção em espectrofotometria de feixe único. Os padrões são normalmente de superfície com brilho. Porém há padrões com tratamento fosco uniforme que garantem o mesmo resultado para medidas especular incluída e excluída, simplificando a medida. Possuem boa resistência, facilidade de limpeza e durabilidade.

2.3.2.5

Calibração

A calibração dos azulejos é rastreável ao NPL ("National Physical Laboratory", Inglaterra)

Todas as amostras, de superfície opaca e brilhante, podem ser calibradas para geometrias de brilho Incluído (8/t) e brilho excluído (8/d), enquanto os padrões de superfície com brilho podem também ser calibrado para geometria a 0/45.

2.3.2.6

Medições dos Padrões

Para obter maior repetitividade nos resultados, as medidas devem ser restritas à região central dos padrões. Idealmente, uma guia deve ser usada para localizar o padrão centralmente sobre a abertura do instrumento.

Como padrões de cores fortes apresentam um pouco de termocromismo, eles devem sempre se tornar estáveis, permanecendo antes da uma medida na temperatura ambiente de medição, e deve-se também durante a própria medição ter cuidado para evitar aquecimento impróprio do padrão. Os padrões neutros não exibem qualquer termocromismo relevante.

Apesar da durabilidade e estabilidade dos padrões, é recomendável que sejam recalibrados uma vez a cada cinco anos para manter a exatidão de medição. Se os padrões se tornam danificados ou permanentemente sujos antes deste tempo, os valores certificados não serão válidos e a recalibração ou substituição por novos padrões pode ser necessário.

2.3.2.7

Termocromismo

Todos os materiais altamente coloridos são sujeito a termocromismo em variados graus.

Esta mudança reversível em cor, com a temperatura, tem sido um problema com muitos padrões, mas podem ser superados nos azulejos CCSII

com o uso de dados de correção de termocromismo determinados pelo "National Physical Laboratory". Os dados básicos acompanham os conjuntos de azulejos CCSII.

2.3.2.8

Uso & aplicações

O olho humano continua sendo o mais conveniente meio com o qual podemos detectar diferenças de cor nos trabalhos de rotina. Infelizmente, ele não é bom em quantificar estas diferenças, ou comparar cores em duas posições separadas. A percepção visual varia de pessoa para pessoa, necessita de muita experiência e pode ser enganada, por exemplo, com as cores metaméricas. Tudo isso pode levar a erros e representar tempo perdido na matização de cor.

O único caminho para superar estes problemas é o uso da instrumentação que pode quantificar as medidas de cor. Os fornecedores podem então saber o que estão matizando de acordo com o que foi especificado pelo comprador. Há maior agilidade nos procedimentos e menor necessidade de prolongado treinamento de pessoal. Isso significa para os fornecedores e compradores economia de tempo e dinheiro.

Há um elo fraco neste sistema - o próprio instrumento. Se uma falha ocorre e não é percebida, então a não matização de cores pode ser realizada, ocasionando reclamações, tempo e lucro perdidos.

Um método de controlar o instrumento é necessário para assegurar o seu correto funcionamento (CERAM, 2003).

Há três métodos principais em que os padrões podem ser controlados:

1. Regular.

Se medido regularmente, leituras mais antigas podem ser comparadas com as medidas iniciais para controlar quaisquer mudanças. Bons instrumentos não mudarão significativamente em algumas semanas. Pode levar até anos para serem observadas mudanças definitivas. Enquanto isto, pode-se assegurar que o instrumento está trabalhando satisfatoriamente. Se mudanças acontecem, um rápido estudo dos resultados indicará que ação deverá ser tomada.

Primeiro, verifique se vários resultados estão apresentando mudanças. Assegure que a temperatura no local de medição não mudou de maneira incomum (normalmente com todos os materiais fortemente coloridos, o CCS II sofre uma mudança reversível em cor com temperatura). Se a temperatura é normal pode estar havendo uma falha no instrumento.

Se resultados mudaram em somente em um padrão, refazer a medição. Se o resultado confirmar-se então, ou esse padrão em particular sofreu uma mudança estrutural que afeta seus resultados (em que leituras subseqüentes podem ser ignoradas) ou pode existir uma falha em parte do sistema do sensor.

Após o serviço técnico de reparo, diferenças das leituras iniciais geralmente devem retornar perto de seus pequenos valores originais.

2. Verificação inter companhias.

Para isso, é exigido um conjunto que tenha sido calibrado em relação a um conjunto mestre. Isto então pode ser usado para vincular resultados de, por exemplo, vários fornecedores e seus usuários finais, e naturalmente com aqueles de outros fornecedores com configurações semelhantes.

Um exemplo do quão bem este sistema pode trabalhar é a introdução de uma Cor Padrão de Extrato de Tomate na Europa. Milhões de "euros" foram perdidos por agricultores em torno do mediterrâneo que não podiam medir a cor de seu tomate com exatidão! (A cor nesse caso determina o preço). Apesar do uso de instrumentação, resultados eram demasiadamente variados. Calibrandose os 1200 instrumentos, por meio dos azulejos CCSII, estes puderam ficar vinculados. Isso reduziu a variação da medição por sete e resultou em uma grande melhora na eficiência.

3. Controle de Qualidade ISO 9000.

Utilizando esse conjunto de padrões, uma companhia tem que provar que quando é medido seu produto, o sistema de medição está dando resultados que são rastreáveis com Padrões Nacionais ou Internacionais. O CCS são um dos poucos materiais estáveis disponíveis para medida de cor que podem ser calibrados para fornecer tal rastreabilidade durante longos períodos.

2.4

Padrões Virtuais

Uma das fundamentais propriedades da visão de cor normal é a chamada de tricromia. A teoria tricromática postulada por Young demonstrou que a maioria das cores pode ser combinada superpondo separadamente três fontes de luz chamadas primárias, processo chamado de mistura aditiva. Assim, a natureza tricromática da visão é essencial para a operação de muitos processos de reprodução de cores tais como na televisão, fotografia, impressão e na atividade têxtil, dentre outras. As pessoas que têm proporções extremamente

desproporcionais das três cores primárias em sua visão de cor são conhecidas como anômalas tricromáticas. Pessoas de visão de cor normal e as de visão anômala tricromática podem ser distinguidas pelo uso de testes visuais (McDonald, 1997).

Os principais testes de aptidão e habilidade visual da cor são: Teste de Deficiência Visual de Cor "Ishihara", Teste de Discriminação de Tonalidades "Famsworth-Munsell FM-100" e o Teste de Habilidade de Visão de Cor "Colorcurve HVC". Há também treinamentos: um com o *Kit* "Munsell" do Estudante e outro com o Teste de Aptidão de Visão de Cor, do Instituto Japonês de Pesquisas da Cor "JCAT".

Henry Ford é reconhecido com a imortal citação:

"Na Ford você poderá comprar um carro na cor que você quiser. Desde que seja preto!".

À mesma época do comentário de Henry Ford, outro pioneiro chamado Albert H. Munsell identificou a crescente importância da cor, desenvolveu e publicou as teorias sobre seu sistema de ordenação de cores. O livro (Atlas) de cores do sistema Munsell, primeiramente publicado em 1915, expunha cores anotadas no espaço de três dimensões baseadas em igual espaço de percepção visual, e provendo um método de descrever as cores em termos numéricos. Naquela época do século 20, a necessidade de descrever cores em termos numéricos não era óbvia, mas era justificável com o sucesso de Munsell (Smith, 1995).

A descrição de uma cor é complicada devido ao grande número de diferentes cores que o olho humano pode distinguir (vários milhões) e porque os termos das cores populares têm distintos significados para diferentes pessoas. Nos quatro séculos passados, várias tentativas foram feitas para determinar um método exato e aceitável para descrever a cor.

Na última metade do século passado, os negócios começaram a tornar-se crescentemente globais e a comunicação da exatidão da cor num mundo mais conscientemente colorido tornou-se mais crítica. Em resposta a esse problema, um comitê foi formado em 1983, sob os auspícios da ISO, para recomendar um padrão internacional para a especificação da cor. Foi previsto que um ou mais dos sistemas disponíveis de ordenação de cor fosse selecionado e aplicado como padrão internacional. Entretanto, não prevaleceu o consenso entre os membros do conselho e mesmo após 10 anos o ímpeto da padronização da especificação das cores, na prática, progrediu pouco. Além disso, nesse ínterim, os requisitos nos negócios que envolviam a cor continuavam a crescer e os

benefícios oferecidos pelo sistema de ordenação de cores diminuíam crescentemente frente às necessidades comerciais atuais. Portanto, quatro aspectos principais podem ser comentados (Smith, 1995).

- A maioria dos livros de cores possui só amostras de tamanho relativamente pequeno e freqüentemente são de alguns centímetros quadrados resultando em notáveis diferenças quando a cor selecionada é apresentada sobre um campo de visão significante maior. A maioria dos produtores de livros de cores pode fornecer amostras de maior tamanho, mas essas se tornam muito caras e incômodas para guardar, devido à flexibilidade característica de um tecido.
- As limitações na escala de cores apresentadas nos livros de cores estão se tornando crescentemente inaceitáveis. Os olhos humanos podem distinguir vários milhões de cores distintas e os Livros de cores apresentam no máximo poucas centenas de cores.
- As diferentes aplicações requerem diversas escalas de cores. As escalas requeridas para as industrias de têxteis, tintas, plásticos e cerâmicas são muito diferentes.
- A natureza estruturada dos sistemas de ordenação de cores permite a interpolação visual entre amostras do livro de cores determinando-se uma anotação de cores não representada no próprio livro. Além disso, a interpolação percentual entre amostras é subjetiva e pode diferir entre indivíduos, e torna-se incompatível com o crescimento das necessidades de exatidão na medida da cor. Hård e Sivik (Smith, 1995, p. 261) afirmam que em menos que 15 minutos de instrução sobre o sistema NCS, por exemplo, é possível capacitar pessoas para descreverem qualquer cor dentro de uma margem de erro de 5% da escala elementar, sem referência a um material padrão ou amostras coloridas. Entretanto, a exatidão oferecida nesse sistema é pobre em comparação aos requisitos de negócios envolvendo a cor. Além disso, as percepções destas cores elementares conceituais também diferem se tomarmos como exemplo um carro branco que parece branco até estacioná-lo ao lado de um outro carro branco de um fabricante diferente. Embora isolados ambos pareçam brancos, por comparação, quando colocados um ao lado do outro, um desses pode parecer amarelado ou azulado. Problemas adicionais incluem: erros entre as amostras da cor pretendida e da cor obtida (isto pode ser de várias unidades de diferença de cor CIELAB); diferenças na cor da amostra entre as próprias cópias e edições do Atlas; e condições colorimétricas (a maioria dos sistemas de ordenação de cores é ainda definida em relação ao iluminante CIE C).

As tentativas em meados dos anos oitenta para selecionar um sistema de especificação de cor única como um padrão internacional agora parece muito equivocado. Ao invés disso, é proposto que modelos de cor baseados em computador sejam desenvolvidos por indivíduos ou companhias, e a comunicação entre modelos diferentes seja possível por meio de uma notação intermediária comum.

Todos os sistemas de especificação de cor são deficientes em algum aspecto, pois são definidos para uma abordagem de aplicativo global. Atualmente, é possível desenvolver softwares que incentivam usuários para inventar seu próprio sistema de especificação de cor pessoal, baseados em seus requisitos, com sua própria escala de cores e sistema de notação. Provendo mecanismos para transformar a cor do usuário em um formato padrão e aceitar uma cor em formato de padrão que pode ser mapeada no modelo de cor pessoal do usuário.

Há previsões que, dentro de poucos anos, os tradicionais sistemas baseados em Atlas cairão largamente em desuso, sendo substituídos por sistemas de especificação de cor mais práticos e flexíveis baseados por computador, particularmente levando em conta os rápidos avanços da tecnologia da informação e os custos decrescentes envolvidos. Os sofisticados softwares que serão desenvolvidos proverão os seus usuários com o quiserem para desenvolver e adaptar suas próprias escalas de cor e sistemas de especificação. O software poderá identificar cores por uma notação interna ou de preferência internacional, provendo um mecanismo para comunicação de cor com exatidão; o software receptor converterá a notação fornecida no próprio modelo do espaço de cor do usuário. É previsto, então, que ao final desta década, especificação de padrão virtual se tornará um novo modo de comunicação de cor. Nós estamos certos que Albert H. Munsell e Robert Louis Stevenson aprovariam (Smith, 1995, p.262).

Desde aqueles pioneiros dias que iniciaram produções em larga escala e inovações industriais, o mundo tem se tornado mais colorido. Os carros agora são, com menos freqüência, pretos ou da mesma forma, as cozinhas brancas. Os tecidos, tapetes, papéis de parede, tintas, vernizes, esmaltes etc. cobrem atualmente inteiramente o espectro visual das cores.

A evolução na área da espectrofotometria junto com a melhora da exatidão na matização da cor, usando-se o computador e laboratórios de tingimento, tem como resultado o uso de padrões não físicos da cor, ou sejam, dados de medidas de refletância da cor. Eles podem ser usados na comunicação,

matização, controle de qualidade da cor e na geração de paletas de cor. A matização por números tornou-se uma realidade (Fenn, 1997). Chamaremos esses padrões não físicos de cor de padrões virtuais.

É crescente o uso normal da comunicação digital entre a industria varejista e de confecção como recurso no processo de desenvolvimento e design e no processo de comercialização. Isso conduz a uma necessidade crítica na capacidade de definir a cor com exatidão no início do processo de design e, portanto divulgar a cor consistentemente e com precisão através de cada estágio de design, desenvolvimento e comercialização. Como tal, devemos reconhecer a necessidade de controlar a cor através de todo o processo da confecção considerando vários fatores: observador, iluminante, padrões de cor, monitores, impressoras, produção, marketing etc. (Simmons, 2003).

Apesar do desenvolvimento de sistemas computacionais de gerenciamento da cor e outras técnicas que permitem gerar cores exibidas em um monitor ou impressas, o profissional de design, particularmente na área têxtil, ainda prefere selecionar cores de um arranjo físico de cores. Um especificador de cor física pode ajudar muito na seleção em uma paleta de cor. Porém, sistemas com a disponibilidade de dados de refletância podem acrescentar o aspecto da resposta rápida aliada com a habilidade de transmitir padrões virtuais, ou não físicos, por fax, e-mail, redes etc. Estes mesmos padrões não físicos podem ser usados para a comparação de cores e a geração de formulações apropriadas por meio de um sistema de comparação de cores de computador e bancos de dados de corantes. O uso de padrões não físicos, junto com uma equação numérica que calcula e apresenta qual das amostras falha e/ou passa, dentro de uma tolerância pré-definida, usando o CMC(2:1), elimina os problemas de controle da cor associados à percepção visual humana, variações de iluminantes e manipulações frequentes de padrões físicos alterando-os, por exemplo, por sujidade (Fenn, 1997).

O processo de desenvolvimento da cor para companhias varejistas e de confecção varia muito dependendo da organização e ênfase de cada companhia. Uma coleção de cores a ser produzida para uma determinada estação do ano poderá ser baseada numa tendência ou em função de um projeto especifico. Uma vez que as cores são selecionadas, um padrão para cada cor é produzido em quantidade suficiente para distribuir e suprir fornecedores os quais devem reproduzir / matizá-las para a satisfação do comércio (Simmons, 2003). Há um processo para a aprovação dessas cores envolvendo, normalmente, no mínimo os seguintes passos apresentados na figura 25.

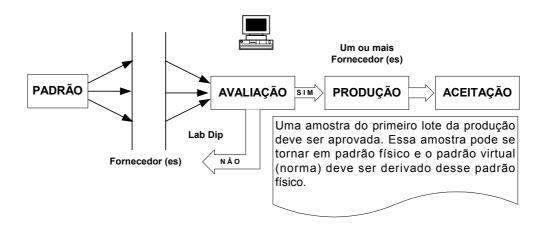


Figura 25 - Processo de aprovação de cores

Uma vez ordenada a produção, a mesma companhia deve receber e aprovar o lote de produção apresentado. Dependendo da companhia de confecção / varejo, a responsabilidade pelo processo de aprovação da cor deve ser assinado pelo pessoal do departamento de design ou outro departamento. Esses departamentos geralmente têm vários nomes tais como: escritório da cor, controle da qualidade, segurança da qualidade, gerência da cor etc. Em alguns casos, o processo de aprovação da cor pode ser feito sem levar em conta os resultados de teste do laboratório.

Simultaneamente com o processo de aprovação da cor, há o processo interno na organização de design. Então, parece lógico que o mesmo padrão de cor que inicialmente foi divulgado externamente para os fornecedores, para a devida produção / matização, também seriam divulgados internamente para o processo de design. Tradicionalmente, isso tem sido feito via pequenas amostras de tecido que são medidas via espectrofotômetros em conjunto com sistemas CAD e/ou matizadas visualmente via monitores RGB em CAD.

Com o advento e aceitação de equipamentos de medição de cor digital, na primeira etapa do processo de desenvolvimento de uma cor, é agora possível comunicar essa informação inicial, de cor virtual, para as outras etapas do processo. Idealmente, a cor pode ser divulgada virtualmente a cada etapa através de todo os estágios do ciclo de vida do produto.

A aparência da cor é somente controlável parcialmente pelos atuais recursos tecnológicos. Há muitos itens subjetivos no processo de design têxtil e de roupas. Por exemplo, há freqüentemente pouca ênfase para o tipo de iluminação usada dentro do ambiente de design. A influência da textura na cor

pode mudar muita a aparência da cor em qualquer caso. A cor que originalmente o design pediu não é realmente a que se queria. Acrescentado a isso, a utilização do tecido têxtil colorido numa foto, para fins de comercialização, há influência de seu próprio cenário de luz, sombras etc. A intenção é que essa foto de comercialização seja então comunicada ou em papel de um catálogo ou eletronicamente via Internet. Torna-se imperativo que a cor fornecida na foto seja fiel com o produto que o consumidor final irá receber assim como para minimizar quaisquer retornos para os vendedores devido à cor em desacordo (Simmons, 2003).

O objetivo mais importante neste processo da comunicação virtual de cor é minimizar o tempo do processo. O produto de mais alta qualidade devia ser fabricado em menor tempo para obter máximos benefícios, ambos tangíveis (grande capacidade de fabricação, custos mais baixos etc.) e intangíveis (satisfação do cliente, reputação realçada, consistência de produto etc.). A introdução da instrumentação de medição de cor, com interface computacional usando programas de gerenciamento de cor, permite o aumento da velocidade do processo industrial da cor. Um problema encontrado antes e após do controle instrumental da cor aparecer é a manutenção de padrões de cor da produção. Os computadores disponíveis hoje provêem habilidade de guardar os padrões de refletância espectral, deste modo, provendo-os de estabilidade. Com isso eles não mudam com o tempo. Porém, o uso de padrão numérico também tem algumas desvantagens, tais como: não ter um padrão físico disponível para comparação visual direta. Isso pode ser em parte compensado mantendo um painel disponível para referência visual, mas ainda utilizando o padrão numérico para a aprovação final (Marcus, 1978).

Os recentes desenvolvimentos asseguraram que os espectrofotômetros possuam estabilidade, reprodutibilidade e exatidão. A variação atual na medição da cor entre instrumentos de um determinado fabricante é tipicamente na ordem de $\Delta E \pm 0,15$ unidades CMC em média. A variação entre instrumentos de fabricantes diferentes é em média $\Delta E \pm 0,3$ unidades CMC (Fenn, 1997).

Realmente, sistemas são agora comercialmente disponíveis que podem produzir cópias impressas de cores especificadas em um monitor com um erro de, no máximo, menor que 3 unidades CMC(2:1). A impressão colorida e a tecnologia de padrão virtual já estão sofrendo rápido desenvolvimento. Como estas tecnologias amadurecem, esse assunto, já respeitável, produzirá melhorias ao gerenciamento de cores (Smith, 1995).

A tecnologia e a instrumentação estão disponíveis para permitir o uso de padrões não físicos, virtuais, na comunicação da cor, matização de cor e controle de qualidade. As cores podem ser produzidas e mantidas como altos padrões (baixos valores de ΔE). Esta abordagem é uma contribuição adicional para o sucesso de processamento de resposta rápida no gerenciamento da cor (Fenn, 1997).

Sempre que refletâncias são armazenadas para serem usadas como padrão numérico, um cuidadoso programa de monitoração da instrumentação da cor e da instituição da manutenção preventiva à intervalos regulares também devem ser instituídos. Sem essa providência, a utilização de padrões numéricos produzirá provavelmente resultados não satisfatórios (Marcus, 1978).

2.5

Metameria

A palavra Metameria foi adotada por Wilhelm Ostwald, por volta de 1919, para designar o fenômeno exibido por duas superfícies coloridas que parecem semelhantes sob um iluminante como luz do dia, mas diferentes sob um outro iluminante como uma lâmpada incandescente. Embora Ostwald desse a nós o nome para esse fenômeno ele não foi o seu descobridor. Maxwell em 1860 foi o primeiro a escrever um artigo sobre o assunto. A importância do problema de minimizar o efeito da metameria na área industrial da cor desde a década de 1950 tornou o termo, mesmo hoje em dia, comum no meio de quem trabalha com a cor.

Na prática, nas indústrias de corantes, é freqüentemente necessário trabalhar com amostras que são metaméricas umas com as outras, e é importante saber quando tais cores deixam de combinar sob a influência de iluminantes, observadores, ou tamanhos das amostras.

Antes de ser definida a metameria, é útil a apresentação de algumas situações envolvendo objetos coloridos. Serão apresentadas situações esquemáticas para o entendimento da constância e inconstância de uma ou várias cores e a da igualdade ou diferença de uma cor.

Um aspecto importante da visão de cores é a adaptação cromática. Ela pode ser definida como a mudança na sensibilidade do olho para compensar mudanças na qualidade espectral da fonte de luz. Isto significa, por exemplo,

que um pedaço de jornal é visto branco se está sendo lido sob luz do dia, ao ar livre, ou em um escritório sob uma luminária de tungstênio ou luminária fluorescente, cada um tem diferentes distribuições de energia espectrais (Choudhury, 1992).

Um objeto de cor denominada "a", na figura 26, está sob determinada condição de iluminação e observação, e afirmamos que os valores triestímulos são $(X,Y,Z)_{a,1}$ (cor "a" na condição 1). Se houver mudança nessas condições para essa mesma cor teremos $(X,Y,Z)_{a,2}$ (cor "a" na condição 2). Diremos então que a cor "a" tem constância se os estímulos X, Y e Z forem diferentes sob a mudança de condições de iluminante e/ou observador; e no espaço CIELAB as coordenadas $L^*a^*b^*$ são aproximadamente iguais.

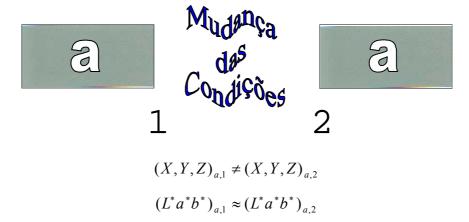


Figura 26 – Constância de uma Cor

Haverá também constância se um observador, na presença de um conjunto de várias cores, mudar, por exemplo, o iluminante de luz do dia para luz de tungstênio como na figura 27.

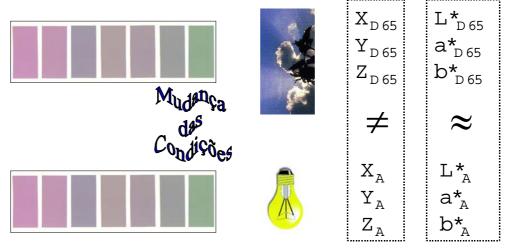


Figura 27 - Constância de cores

Agora, para o exemplo da inconstância de uma cor, temos na figura 28 valores triestímulos diferentes e no espaço CIELAB as coordenadas $L^*a^*b^*$ são diferentes. O efeito ocorrerá, por exemplo, se um observador, na presença de um conjunto de várias cores, mudar, por exemplo, o iluminante de luz do dia para luz de tungstênio.

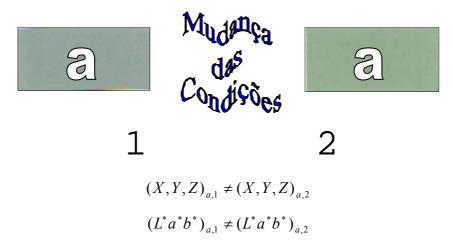


Figura 28 - Inconstância da cor

Até o momento, verificamos a constância e inconstância de um mesmo objeto que sofreu mudança nas condições de iluminação e/ou observador. Agora, iremos verificar a condição para que dois objetos tenham cores idênticas. É necessário que a curva de refletância sejam iguais, como na figura 29.

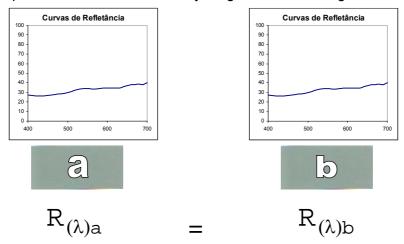


Figura 29 - Cores iguais

Para que dois objetos tenham cores diferentes, além das curvas de refletância de serem diferentes, os seus valores triestímulos devem ser também diferentes, como esquematizado na figura 30.

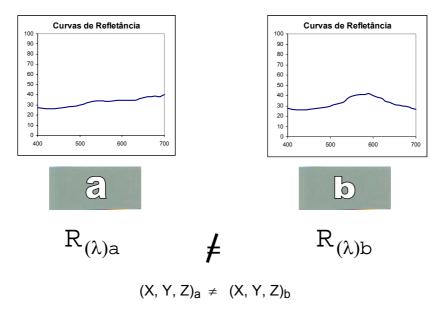


Figura 30 - Cores diferentes

2.5.1 A causa da Metameria

No item 2.1, foi explicado que os valores triestímulos descrevem a sensação de cor e são representados por somas (ou, mais exatamente, integrais) tais como: $S_{\lambda} \times R_{\lambda} \times \overline{x}_{\lambda}$, $S_{\lambda} \times R_{\lambda} \times \overline{y}_{\lambda}$, $S_{\lambda} \times R_{\lambda} \times \overline{z}_{\lambda}$. Da mesma maneira que podemos obter resultados semelhantes de somas de números deferentes (por exemplo: 100 = 10 + 27 + 63 = 29 + 51 + 20 = 40 + 53 + 7 = 11 + 63 + 26; etc.) os valores triestímulos podem ser calculados de diferentes curvas de refletância, desde que eles cumprem certas condições. Na figura 31 as curvas mostradas cumprem tais condições.

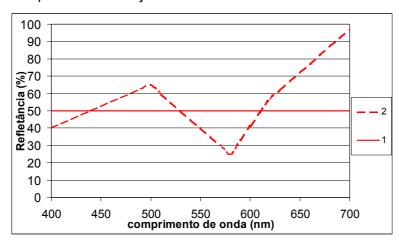


Figura 31 – Cores metaméricas

As curvas de refletância de duas amostras cinzas são exibidas. A amostra 1 é uma cinza ideal. A amostra 2 é uma cinza metamérico que forma um par metamérico com a amostra 1.

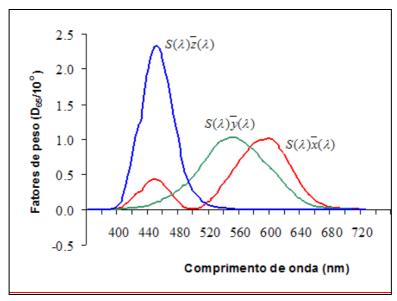


Figura 32 – Fatores de peso; D65/10 (Dados da norma CIE/ISO)

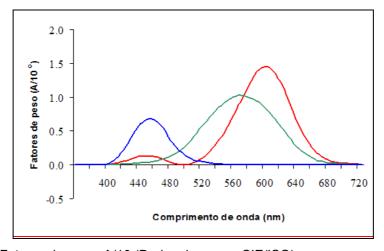


Figura 33 – Fatores de peso; A/10 (Dados da norma CIE/ISO)

A figura 32 apresenta o resultado das parcelas $S_{\lambda} \times \overline{x}_{\lambda}$, $S_{\lambda} \times \overline{y}_{\lambda}$, $S_{\lambda} \times \overline{z}_{\lambda}$ (fatores de peso) referentes ao cálculo de valores triestímulos para o iluminante D65 e o observador de padrão de 10° . Os valores de refletância R_{λ} devem conseqüentemente ser multiplicados por estes números, para obter-se os valores triestímulos X, Y e Z. A figura 33 refere-se ao iluminante tipo A e

observador de 10° . Verifica-se, comparando-se as curvas, que a amostra 2 apresenta refletâncias maiores ou menores em comprimentos de onda anteriores ao valor máximo das curvas das figuras 32 e 33. Em comprimentos de onda além do valor máximo das mesmas curvas o efeito é o oposto. As somas calculadas são iguais para todos três valores triestímulos para ambas as amostras. As amostras são metaméricas para D65 e o observador padrão de 10° . Elas estão combinando-se sob estas condições (Berger-Schunn, 1994).

As curvas de amostras 1 e 2 cruzam em três comprimentos de onda. Há muitos documentos que mostram que um par de amostras metaméricas deve pelo menos cruzar em três comprimentos de onda. Isto é verdade, em geral, e as interseções são uma marca característica de amostras de pares metaméricos. Em exceção à regra, existem também documentos descrevendo amostras de pares metaméricos que cruzam em somente dois pontos (Wyszecki, 1968).

É portanto uma característica dos pares metaméricos que suas distribuições espectrais exibam três ou mais pontos do cruzamento no espectro visível; as posições dos cruzamentos dependem das composições espectrais dos estímulos envolvidos (Hunt, 1998).

Pode-se verificar um exemplo numérico interessante no item 2.5.4.2.

Metameria é um problema comum nas indústrias produtoras de cor, particularmente quando o lote e o padrão são preparados usando corantes diferentes, ou se dois materiais diferentes estão sendo usados.

O olho humano detecta a cor através de células sensíveis à luz chamadas de cones. Há três tipos diferentes de cones, chamados de vermelhos, verdes, e azuis. Cada tipo é melhor na assimilação em determinadas porções do espectro eletromagnético. Apenas estes três tipos de cones possibilitam que vejamos todas as cores, aproximadamente sete milhões de cores.

Como a metameria acontece na maioria das situações de matizações comerciais, a abordagem para formulação colorimétrica de colorante para minimizar ΔX ΔY e ΔZ tem sido agora adotado universalmente. Isto é uma abordagem interativa para predição e exige um computador para executar os cálculos que são relativamente simples, mas demorados. Um fluxograma que sintetiza a base da maioria de sistemas de predição é mostrado na figura 34.

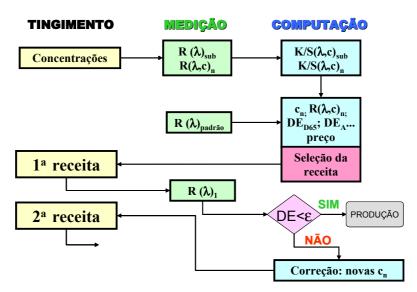


Figura 34 – Fluxograma de predição (Hirschler, 2002)

2.5.2 A definição de metameria

Verificaram-se as condições para constância e inconstância, de um objeto colorido e as condições para que dois objetos tenham cores idênticas ou diferentes. Para o fenômeno da metameria devemos primeiro saber distinguir essas condições mencionadas e estarmos cientes que somente podemos falar de metameria entre duas cores ou dois objetos coloridos. Uma cor não é metamérica sozinha. Ela, sozinha, pode ser constante ou inconstante. Comparando-se duas cores elas podem ser idênticas (figura 29), diferentes (figura 30) ou metaméricas, conforme apresentado esquematicamente na figura 35.

Para a "Commission Internationale de L'éclairage" – CIE, metameria é a propriedade de cores de diferentes curvas espectrais que possuem os mesmos valores triestímulos. Para a "Society of Dyers and Colourists" é um fenômeno pelo qual a diferença de cor entre dois objetos coloridos similares muda com a mudança da distribuição espectral do iluminante.

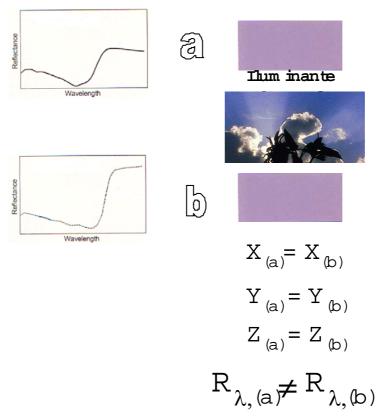


Figura 35 – Metameria

A definição de metameria pode ser apresentada de diversas formas semelhantes, porém a sua interpretação e condições de ocorrência são únicas. Na literatura fala-se de Metameria de Iluminante, de Observador, de Tamanho de Campo e Geométrico, dentre outros. Isso não significa que há vários tipos de metameria. O que realmente acontece é que a metameria ocorre sob a influência de fatores tais como o iluminante, o observador, o tamanho do campo, e assim por diante. Além disso, há termos corretos e incorretos referentes a objetos metaméricos e à própria metameria. Os termos corretos são Pares Metaméricos, Matização Condicional, Objetos Metaméricos, Matização Metamérica, Pares Não Metaméricos, Matização Não Metamérica e Matização Espectral. Apesar de alguns serem sugestivos, os considerados incorretos são isomerismo, fotocromismo, paramerismo, paracromismo, pseudometameria e quasemetameria.

2.5.3

Metameria na prática

Nas indústrias da reprodução da cor, uma infinidade de distribuições espectrais de cores é geralmente reproduzida por apenas três corantes (Hunt 1998). Assim, na fotografia, todas as cores indicadas são misturas de tintas cianas, magentas e amarelas.

A metameria é fácil de ser visualizada, porém difícil de se entender. Como dois objetos coloridos podem combinar-se em termos da cor sob certas condições de iluminação, mas deixar de fazê-lo com a mudança dessas condições?

Se procurarmos na maioria das lojas de departamentos, freqüentemente acharemos uma prateleira de casacos esportivos e uma outra prateleira de calças esportivas semelhantes que formam um conjunto. Tipicamente, as duas peças virão com um sortimento pequeno de cores, para escolher e combinar. Podemos freqüentemente conseguir ambas as peças da mesma cor, e se colocá-las, na loja, próximas uma ao lado da outra sem dúvida que elas combinarão exatamente. Quando chegar em casa pode-se achar que elas não combinam mais.

Examinando o assunto com mais atenção, notaremos que escolhemos peças que combinam na cor sob qualquer fonte luminosa disponível na loja, normalmente luzes fluorescentes, mas não combinam sob luzes incandescentes ou a própria luz do dia. As duas peças, nesse caso, formam um par metamérico.

A razão fundamental para a metameria é que cor é uma sensação gerada no nosso cérebro a base das respostas de três (apenas três) tipos de receptores (cones) gerados pelos estímulos externos que podem ser divididos em centenas de partes espectrais; ou seja, para os estímulos n-dimensionais temos uma resposta 3-dimensional. Como resultado, os cones em nossos olhos podem registrar a mesma sensação de uma infinita variedade de combinações de diferentes freqüências de luz.

Basicamente, quando vemos uma cor, é porque os três tipos de cones contribuem para uma sensação em que o nosso cérebro reconhece como sendo uma cor em particular. Quando vemos uma freqüência do amarelo claro, nossos cones vermelhos, verdes e azuis absorvem a luz nas proporções particulares. Quando vemos uma combinação de vermelho e verde, nossos cones vermelhos, verdes, e azuis absorvem luz na mesma proporção, e nosso sistema visual novamente reconhece o amarelo. Na verdade, há um número infinito de

combinações de freqüências de luz que registrarão o mesmo modo em seu sistema visual para produzir a mesma sensação, que quer dizer, a mesma cor.

Tudo isso nos traz de volta ao problema do conjunto de casaco e calça esportivo. Se o casaco e calça que você olha na loja são feitos da mesma peça de algodão, significa que eles são parte do mesmo lote de tingimento. Ambos, quase certamente, refletirão cada comprimento de onda de luz do mesmo modo. Não importando a fonte de luz, então, eles sempre refletirão a mesma combinação de comprimentos de onda, e os veremos como sendo a mesma cor.

Se eles forem fabricados de um tecido que veio de diferentes lotes de tingimentos, há uma grande chance de que eles não refletirão cada comprimento de onda de luz da mesma maneira. A mistura de comprimentos de onda que refletem de uma fonte de luz, a da loja, por exemplo, produzirá a mesma cor, pois os tingimentos foram realizados para parecerem da mesma cor sob uma fonte de luz semelhante com a fonte de luz da loja. Mas por causa de diferentes lotes de tingimentos, normalmente estes refletem e absorvem comprimentos de onda diferentes. É altamente improvável que a mistura de comprimentos de onda que eles refletem de uma fonte de luz diferente também parecerá a mesma. Portanto, as cores poderão não combinar em função da mudança da fonte de luz.

Podemos encontrar casualmente problemas com pares metaméricos em todos os tipos de situações. Um conjunto da mobília com tecido de diferentes lotes de tingimento, papéis de parede produzidos de diferentes partidas, tintas misturadas para combinar uma cor de diferentes marcas de fabricante, e assim por diante.

Por exemplo, podemos experimentar a metameria colocando duas meias que parecem ser pretas enquanto estiverem no quarto, sob iluminação incandescente, mas verificamos que uma meia é preta e a outra é azul escuro quando andamos para a cozinha, que está com luzes fluorescentes. As diferenças de iluminação entre luzes incandescentes e fluorescentes podem causar a metameria.

As lâmpadas incandescentes contêm relativamente pouca refletância em comprimentos de onda visíveis menores (azuis), e deste modo seria mais difícil distinguir cores azuis em tais condições de iluminação. A iluminação fluorescente na cozinha emite mais refletância nos comprimento de onda menor, e deste modo o azul escuro pode ser mais facilmente distinguido de preto. Sob luzes incandescentes, as meias podem ter uma matização metamérica; sob luzes fluorescentes, elas poderiam não combinar.

Nas indústrias de cores, a metameria pode surgir quando as matizações de cores são requeridas entre tipos diferentes de material. Por exemplo, na indústria da moda, a mesma cor pode ser requerida em um item do vestuário, em botões plásticos, e num sapato de couro; ou, na indústria de automóvel, as cores interiores do material do assento, tapete, trabalho da pintura, e os itens plásticos podem ser requeridos para combinar. Nestas aplicações, o uso dos corantes e dos pigmentos em meios diferentes impossibilita conseguir a mesma refletância espectral em todos os casos, mas os coloristas procurarão minimizar as diferenças inevitáveis pela escolha cuidadosa da misturas de corantes ou de pigmentos.

Manter a metameria a um mínimo é portanto uma consideração importante na escolha dos corantes. Geralmente menores diferenças na distribuição espectral são melhores. Mas onde as diferenças são inevitáveis, seus efeitos devem ser avaliados usando os apropriados índices de metameria.

2.5.4

Grau de metameria

O grau de metameria é expresso por índices de metameria ("Metamerism Index" - MI). Serão apresentados dois principais tipos: Índice geral de metameria e Índice especial CIE de metameria.

2.5.4.1

Indice geral de metameria

Como as curvas de refletância de objetos metaméricos se interceptam pelo menos em três comprimentos de onda e como as diferenças entre as curvas de refletância são grandes para amostras altamente metaméricas, metameria pode ser expressa em termos de um "grau de dessemelhança espectral". Alguns índices de metameria são apresentados e representados pelas equações 34, 35, 36 e 37 (Choudhury, 1992, p. 45).

Bridgeman (1969) propôs o índice mostrado na equação (34):

$$MI = \sqrt{\left[\sum (R_{1,\lambda} - R_{2,\lambda})^{2}\right]}$$
 (34)

Porém, as diferenças espectrais perto de 400 ou 700nm são menos importantes que as diferenças ao redor de 550nm, onde o olho é mais sensível.

Consequentemente, Nimeroff e Yurow (1965) propuseram os índices das equações 35 e 36.

$$MI = \sqrt{\left\{\sum \left[\overline{x}_{\lambda}(\Delta R_{\lambda})\right]^{2} + \sum \left[\overline{y}_{\lambda}(\Delta R_{\lambda})\right]^{2} + \sum \left[\overline{z}_{\lambda}(\Delta R_{\lambda})\right]^{2}\right\}}$$
(35)

$$MI = \sqrt{\left\{\sum \left[\overline{u}_{\lambda}(\Delta R_{\lambda})\right]^{2} + \sum \left[\overline{v}_{\lambda}(\Delta R_{\lambda})\right]^{2} + \sum \left[\overline{w}_{\lambda}(\Delta R_{\lambda})\right]^{2}\right\}}$$
(36)

com \overline{u}_{λ} , \overline{v}_{λ} e \overline{w}_{λ} fatores de peso baseados no espaço UV uniforme visual de cor. A vantagem destes índices sobre o do tipo de Judd-Wyszecki é que eles não são baseados na escolha arbitrária de um observador ou iluminante. Moradian e Rigg (1987) sugeriram o uso do índice de luminosidade de Wyszecki $(L_{\lambda}=25\sqrt[3]{(R_{\lambda})}-17)$ em vez de refletância e o índice se torna equação 37.

$$MI = \sqrt{\left\{\sum \left[\overline{u}_{\lambda}(\Delta L_{\lambda})\right]^{2} + \sum \left[\overline{v}_{\lambda}(\Delta L_{\lambda})\right]^{2} + \sum \left[\overline{w}_{\lambda}(\Delta L_{\lambda})\right]^{2}\right\}}$$
(37)

Em vez de procurar um índice geral do metameria é, consequentemente, mais justificável usar diferentes índices conforme estiver a mudança da condição de observador, de tamanho de campo, ou de iluminante etc. (Hunt, 1998).

2.5.4.2

Índice especial de metameria CIE

Este índice, também conhecido como o índice de Judd-Wyszecki, é expresso pela diferença de cor (ΔE) entre os espécimes sob um iluminante de teste. A diferença de cor pode ser expressa em termos de qualquer equação padrão. O mesmo par de espécimes terá diferentes valores para o índice de metameria dependendo do iluminante de teste usado. A CIE recomenda a equação CIELAB para objetos coloridos e a equação CIELUV para a iluminação colorida. A avaliação visual de metameria pode também ser feita usando escala de cinza. (Choudhury, 1992)

O principal problema em avaliar metameria é que as amostras deveriam combinar-se (matizar) exatamente, pelo menos sob um determinando iluminante. A matização exata não pode ser baseada em observações visuais por causa da diferença em características de visão colorida entre observadores. Então geralmente, valores triestímulos são comparados e deviam ser iguais sob

influência de um iluminante. Porém, idênticos valores triestímulos existem somente em exemplos didáticos e realizados, geralmente, por meio de cálculos computacionais. Esta condição raramente surge na prática. Em situações reais existem diferenças entre as amostras (CIE Report 80, 1989).

A figura 36 mostra um outro exemplo semelhante com resultados numéricos. Os valores triestímulos (X, Y e Z), $L^*a^*b^*$ e as diferenças entre as cores metaméricas, ΔE^*ab , estão na Tabela 1.

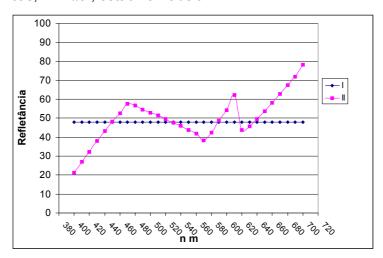


Figura 36 - Exemplo de curvas de pares metaméricos

Amostra I	
D65(10)	A(10)
X Y Z	X Y Z
44,8 48,0 52,3	53,3 48,0 16,9
L* a* b*	L* a* b*
74,8 0,0 0,0	74,8 0,0 0,0
Amostra II	
D65(10)	A(10)
X Y Z	X Y Z
44,6 47,8 52,0	54,3 47,7 17,1
L* a* b*	L* a* b*
74,7 0,1 0,0	74,6 3,1 -1,0
Deltas	
L a b	L a b
0,1 -0,1 0,0	0,2 -3,1 1,0
DE*ab I&II	DE*ab I&II
0,2	3,3

Tabela 1 – Diferenças entre cores metaméricas

Não há concordância no meio científico da colorimetria se uma correção aditiva é melhor, igual, ou pior que uma correção multiplicativa, ou até se a correção devia ser feita nos valores triestímulos, coordenas de cromaticidade ou na diferença de cor (Choudhury et al., 1992, p.44).

2.5.4.2.1

Índice Especial de Metameria para Mudança de Iluminante

Duas amostras tendo idênticos valores triestímulos para um dado iluminante de referência e observador de referência são metaméricas se suas distribuições espectrais forem diferentes na região do espectro visível. A determinação de índices especiais de metameria é realizada por meio dois tipos de procedimentos: um é por intermédio da mudança do iluminante de referência por um de teste, de composição espectral diferente; o outro, por intermédio da mudança do observador de referência por observador de teste, de diferentes funções de matização de cor.

A diferença de cor é avaliada usando uma fórmula CIE de diferença de cor e deve ser claramente indicado qual fórmula que foi usada.

Para um par de objetos coloridos metaméricos, seus valores triestímulos $X_{r,i}$, $Y_{r,i}$, $Z_{r,i}$ (i=1,2) sob um iluminante de referência são calculados como a seguir (CIE Draft 15.3, 2003):

$$X_{m,i} = k \sum_{\lambda} \rho_i(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda$$
 (38)

$$Y_{m,i} = k \sum_{\lambda} \rho_i(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda$$
 (39)

$$Z_{m,i} = k \sum_{\lambda} \rho_i(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda$$
 (40)

Para m = r , onde $\rho_i(\lambda)$ é a refletância espectral do par metamérico (i=1,2), $S(\lambda)$ é a distribuição espectral do iluminante de referência, e $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ são as funções de matização de cor dos observadores padrão de cor CIE 1931 ou 1964. Deve ser mencionado qual dos observadores padrão foi usado, e sabendo-se que "k" equivale à expressão:

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y} \cdot \Delta \lambda} \tag{41}$$

O iluminante de referência preferido é o iluminante CIE padrão D65. Se outro iluminante é usado como referência, isso deve ser mencionado.

Para o conjunto de valores triestímulos $X_{r,i}$, $Y_{r,i}$, $Z_{r,i}$ (i=1,2), a seguinte relação é assegurada por definição:

$$X_{r,1} = X_{r,2};$$
 (42)

$$Y_{r,1} = Y_{r,2}; (43)$$

$$Z_{r1} = Z_{r2} (44)$$

Se as equações 42, 43 e 44 falharem, uma conta apropriada deve ser realizada para a correção. Ou seja, quando as amostras não são exatamente metaméricas:

$$X_{r,1} \neq X_{r,2}$$
, (45)

$$Y_{r1} \neq Y_{r2}, \tag{46}$$

$$Z_{r1} \neq Z_{r2} \tag{47}$$

Então, os valores triestímulos $X_{t,2}$, $Y_{t,2}$ e $Z_{t,2}$ são ajustados pelo método multiplicativo:

$$X'_{t2} = X_{t2}(X_{r1}/X_{r2});$$
 (48)

$$Y'_{t,2} = Y_{t,2}(Y_{r,1}/Y_{r,2})$$
; e (49)

$$Z'_{t,2} = Z_{t,2}(Z_{r,1}/Z_{r,2})$$
 (50)

Para o mesmo par de objetos coloridos metaméricos, seus valores triestímulos $X_{t,i}$, $Y_{t,i}$, $Z_{t,i}$ (i=1,2), sob um iluminante de teste, são calculados por meio das equações 38, 39 e 40 com m=t, substituindo-se em $S(\lambda)$ a distribuição espectral do iluminante de teste. É útil determinar o índice de metameria em relação a vários iluminantes. Os iluminantes de teste usados devem ser identificados no símbolo de índice de metameria: para um iluminante A de tungstênio, $(M_{A,ilm})$; para um iluminante típico de lâmpada fluorescente, FL11 $(M_{FL11,ilm})$. A diferença de cor, ΔE_{ab}^* , é calculada entre os valores triestímulos $X_{t,1}$, $Y_{t,1}$, $Z_{t,1}$ do objeto colorido 1 e $X_{t,2}$, $Y_{t,2}$, $Z_{t,2}$ do objeto colorido 2. Então o índice de metameria M_{ilm} é definido como: (CIE Draft 15.3, 2003)

$$M_{ilm} = \Delta E_{ab}^* \tag{51}$$

Caso outra fórmula CIE de diferença de cor for usada deverá ser mencionado.

2.5.4.2.2

Índice Especial de Metameria para Mudança de Observador

Os observadores padrão CIE 1931 e 1964 representam a população média com propriedades de visão colorida razoavelmente boas. Além disso, há desvios individuais nas funções de matização de cor que acontecem entre os observadores normais da cor.

O índice especial de metameria com mudança de observador (CIE, 1989) foi apresentado para descrever o grau médio de não matização encontrado entre cores metaméricas se as funções de matização de cor de um dois observadores colorimétricos padrões são trocadas pelo observador padrão de desvio com visão de cor normal. (CIE Draft 15.3, 2003)

Para um par de objetos coloridos, seus valores triestímulos $X_{r,i}$, $Y_{r,i}$, $Z_{r,i}$ (i=1,2) para observadores colorimétricos padrão de referência são calculados utilizando-se as equações 38, 39 e 40, com m=r, para uso nas suas funções de matização colorimétrica padrão CIE 1931 e 1964.

Se os dois objetos coloridos metaméricos não possuírem uma matização perfeita em relação ao observador colorimétrico padrão, uma conta apropriada deve ser feita para abolir essa falha. Ou seja, quando as amostras não são exatamente metaméricas:

$$X_{r,1} \neq X_{r,2},\tag{52}$$

$$Y_{r,1} \neq Y_{r,2}$$
, (53)

$$Z_{r1} \neq Z_{r2} \tag{54}$$

Então os valores triestímulos $X_{t,2}$, $Y_{t,2}$, $Z_{t,2}$ são ajustados pelo método multiplicativo:

$$X'_{t,2} = X_{t,2}(X_{r,1}/X_{r,2})$$
 (55)

$$Y'_{t,2} = Y_{t,2}(Y_{r,1}/Y_{r,2})$$
 (56)

$$Z'_{t,2} = Z_{t,2}(Z_{r,1}/Z_{r,2})$$
 (57)

Para o mesmo par de objetos coloridos metaméricos, seus valores triestímulos $X_{t,1}$, $Y_{t,1}$, $Z_{t,1}$ (i=1,2) para observador de desvio de teste são calculados pelas equações 38, 39 e 40, com m=t, usando-se as funções padrões

de matização colorimétrica para observador padrão de desvio $\bar{x}_d(\lambda)$, $\bar{y}_d(\lambda)$, $\bar{z}_d(\lambda)$,onde :

$$\bar{x}_d(\lambda) = \bar{x} + \Delta \bar{x}(\lambda) \tag{58}$$

$$\overline{y}_d(\lambda) = \overline{y} + \Delta \overline{y}(\lambda) \tag{59}$$

$$\bar{z}_{J}(\lambda) = \bar{z} + \Delta \bar{z}(\lambda) \tag{60}$$

e $\Delta \bar{x}(\lambda)$, $\Delta \bar{y}(\lambda)$, $\Delta \bar{z}(\lambda)$ são funções denominadas de desvio.

A diferença de cor ΔE_{ab}^* é calculada entre os valores triestímulos $X_{t,1}$; $Y_{t,1}$ e $Z_{t,1}$ do objeto colorido 1 , e $X_{t,2}$; $Y_{t,2}$ e $Z_{t,2}$ do objeto colorido 2 . Então o índice de metameria M_{ilm} é definido como:

$$M_{abs} = \Delta E_{ab}^* \tag{61}$$

Caso outra formula CIE de diferença de cor for usada, essa deverá ser incluída entre parênteses como por exemplo, $M_{obs}(u^*v^*)$. Cada observador normal de cor percebe uma diferença de cor ΔE_i^* para um par metamérico em relação ao observador e iluminante de referência. Cerca de 95% das ΔE^* para observadores de cor normais são geralmente encontradas entre $2\times\Delta M_{obs}(a^*b^*\ ou\ u^*v^*)$ (CIE Draft 15.3, 2003).

2.5.4.3

Redução metameria & custo / formulação computadorizada

A velocidade da computação digital é tal que o procedimento completo de uma formulação de receita bruta e inicial seguindo das respectivas interações para se conseguir minimizar ΔX , ΔY e ΔZ , segundo um grau de exatidão exigido, requer menos do que um segundo. Os fatores limitadores de tempo são operações subsidiárias tais como extração dos coeficientes de absorção dos corantes, leitura dos arquivos nos disquetes e a impressão das receitas. A formulação computacional de receitas obviamente provê um meio de testar combinações alternativas de corantes para encontrar a mistura ótima que dará custo mínimo e/ou mínima metameria em relação ao padrão. Normalmente se lida só com combinações de três corantes, mas às vezes é vantajoso usar combinações de quatro, ou mais, e raramente cinco ou seis corantes para minimizar os efeitos de metameria.

O número de receitas calculadas aumenta muito rapidamente quando o número de corantes possíveis é também aumentado. As combinações possíveis podem ser calculadas pela equação 62.

$$C_r^n = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$
 (62)

Onde n = o número de corantes numa lista

r = número de corantes permitido por receita.

Obviamente, nem todas as combinações possíveis renderão receitas significantes. Por exemplo, é irrelevante tentar uma receita para vermelho usando três corantes azuis. Normalmente, uma pequena seleção na lista de possíveis corantes é feita antes de começar o cálculo computacional. Em programas de computador, para minimizar custo ou metameria, é habitual, por exemplo, ativar o computador para realizar predições de matização sob um determinado iluminante, geralmente tipo D65, descartar todas as receitas com uma ou mais concentrações de corantes negativa e listar somente as seis receitas mais baratas ou as seis menos metaméricas de acordo com algum índice de metameria (McDonald, 1997).

É difícil ou impossível entender o porquê da realização das matizações altamente metaméricas, apesar da habilidade em evitá-las ou minimizá-las, com a ajuda de programas de computador para matização de cor. Qualquer economia possível devido a custos menores de corantes pode ser completamente compensado pelas dificuldades causadas por tais matizações. Os problemas são encontrados cedo, durante os testes de tingimento no laboratório. Eles exigem mais testes e mais tempo, portanto mais despesa. Além disso, sempre existirão discordâncias. O vendedor e o comprador poderão ter opiniões discordantes sobre a qualidade da matização.

2.6

Cor e Estrutura

2.6.1

Refletância, absorvância e dispersão - o modelo simplificado do Kubelka e Munk

No tratamento do assunto refletância-estrutura, a maioria das referências se refere ao modelo Kubelka e Munk (1931). Kuehni (1975) explica o significado do modelo da seguinte maneira (figura 37):

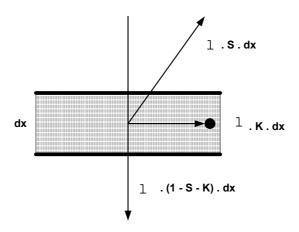


Figura 37 – O significado do modelo Kubelka e Munk (Kuehni, 1975)

O fluxo da luz *l* entra numa camada colorida de espessura dx. As frações absorvidas (K), dispersas (S) e transmitidas (1-S-K) são proporcionais ao fluxo *l* e à espessura da camada dx. Para uma camada de espessura "infinita" (isto é, quando toda a luz é ou refletida ou absorvida).

$$K/S = \frac{(1-R)^2}{2R} \tag{63}$$

Supondo um comportamento ideal dos corantes, o valor de $K/S_{\lambda,m}$ de uma mistura de corantes é calculada pela fórmula:

$$(K/S_{\lambda,m}) = (K/S)_{\lambda,sub} + c_1(K/S)_{\lambda,1} + c_2(K/S)_{\lambda,2} + \dots$$
 (64)

onde $(K/S)_{\lambda,sub}$ se refere ao substrato (tingimento cego) ; e $c_1,c_2...c_m$ são as concentrações dos corantes 1, 2 ... m.

Allen e Goldfinger (1972) criticaram o modelo de Kubelka e Munk alegando que este não se aplica bem para substratos têxteis, porque é baseado em cálculos aplicados para camadas contínuas (pigmento em um veiculo de resina), o que não é o caso de substratos têxteis. No entanto, não se sabe de aplicações práticas do modelo Allen-Goldfinger, pois todos os softwares atuais de formulação de receitas usam a teoria Kubelka e Munk.

2.6.2

Título da fibra e do fio

Fothergill (1944) mostrou que existe uma relação simples entre o título da fibra (filamento) e a concentração de um corante necessária para alcançar a mesma Força Colorística (FC).

$$c_2 = c_1 \frac{\sqrt{D_1}}{\sqrt{D_2}} \tag{65}$$

Onde:

 $c_{\scriptscriptstyle 1}$ = a concentração do corante usado na fibra com título $D_{\scriptscriptstyle 1}$ (em denier)

 $c_{\scriptscriptstyle 2}$ = a concentração do corante necessário para chegar na mesma FC na fibra com título $D_{\scriptscriptstyle 2}$ (em denier).

Exemplo: temos dois multifilamentos com o mesmo título do fio (150den), porém com 72 filamentos de 2,083den (150/72) e um outro com 27 filamentos de 5,556den (150/27).

Tingindo o primeiro com 2% de corante, o segundo precisa de:

$$c_2 = 2\frac{\sqrt{2,083333}}{\sqrt{5,555556}} = 1,225\% \tag{66}$$

Com título mais alto da fibra (fibra mais grossa) menos corante é preciso para chegar na mesma FC, ou com a mesma concentração a fibra, o fio ou tecido parece mais "forte" (com maior FC).

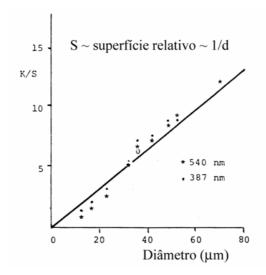


Figura 38 – O efeito do título (diâmetro) da fibra na concentração aparente do corante

A figura 38 mostra a relação linear existente entre o diâmetro da fibra e o valor (K/S). Quanto maior o diâmetro da fibra, tanto menor o coeficiente S de dispersão e, conseqüentemente maior a relação K/S. A concentração real é exatamente a mesma para cada título, o polímero tendo sido tinto em massa, isto é antes da formação das fibras (Hirschler, 2002).

2.6.3 Padronagem do tecido

Segundo Lee e Sato (2001), a luz refletida da superfície de um tecido é a combinação de três tipos de refletância: (verifica-se na figura 39).

Regular ou especular: são os componentes da luz que não entram nas fibras e são refletidos da superfície no mesmo ângulo de iluminação;

Difusa: da camada superior de fibras, a luz entra na fibra, sofre absorção e dispersão e é refletida em varias direções;

Interna: luz refletida várias vezes entre as superfícies das fibras internas e se misturando com os demais componentes difusamente refletidos.

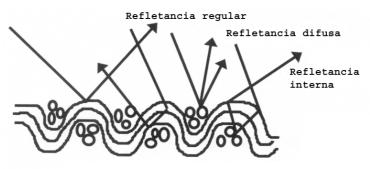


Figura 39 – Modelo de refletância de um substrato têxtil (Lee & Sato, 2001)

A padronagem do tecido determina a seqüência e a densidade dos pontos de entrelaçamento dos fios. Quando um fio de trama passa por cima de mais que um fio de urdume, essa parte se torna um fio "desligado". Os fios desligados ficam paralelos entre si e refletem, ou não, a luz dependendo da posição relativa da iluminação, do tecido e do observador conforme mostra a figura 40.

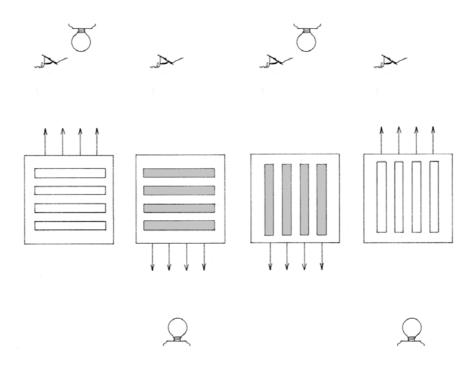


Figura 40 – Orientação dos fios no tecido (Lambert et al., 1986)

Da esquerda para direita, as ilustrações da figura 40 indicam respectivamente:

- Fios desligados perpendiculares à iluminação e ao observador;
- Os Fios desligados parecem mais escuros quando a luz fica no lado oposto ao observador;
- Fios desligados paralelos à iluminação e ao observador também parecem mais escuros; e
 - Fios desligados paralelos à iluminação parecem mais claros quando o observador fica no lado oposto.

A estrutura do tecido muda a luminosidade. O tecido, com fios desligados, reflete mais luz do que o tecido com entrelaçamento alternativo. Se tivermos

tudo igual (título de fio, densidade de tecido e iluminação), uma tela (figura 41 à esquerda) parecerá mais escura, e um damasco (à direita) mais claro do que uma sarja (no meio) (Lambert et al., 1986).

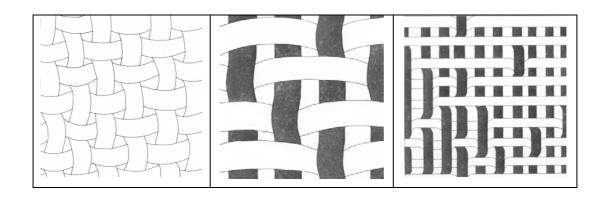


Figura 41 – Estrutura de tecidos

2.6.4

O efeito da separação dos fios (cobertura)

Goldfinger e Paige (1977) calcularam o efeito da separação dos fios na cor do tecido. Usando um modelo muito simples, conforme a Figura 42, desenvolveram uma fórmula ilustrada na Figura 43. O valor CK é o análogo do K/S na teoria de Kubelka e Munk, sendo CK = 10, o valor para um tecido preto, e CK = 10^{-12} o valor para um tecido branco. A Figura 43 mostra que um tecido preto vai refletir relativamente muito mais com o aumento da cobertura (FR crescendo de 0,5 para 1,0), mas um tecido branco quase não muda a refletância.

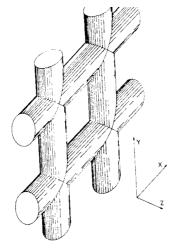


Figura 42 – Representação do modelo simplificado de Goldfinger e Paige (1977)

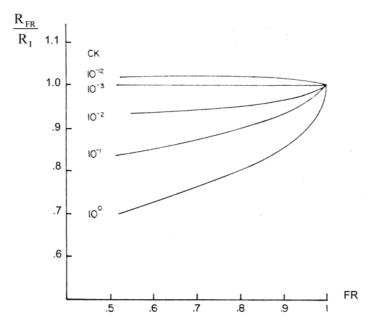


Figura 43 - A refletância R_{FR} do tecido com densidade de fios FR

A figura representa a refletância do tecido com uma determinada densidade de fios (FR), relativa à de um tecido com cobertura completa (R_I : FR=1) em função da densidade FR (fração coberta). CK corresponde ao produto da absorbância da fibra colorida, da concentração do corante e do raio da fibra (Goldfinger and Paige, 1977).

2.6.5 Brilho

Um dos estudos mais completos sobre o efeito da estrutura foi publicado por Kurz e Troska (1970). A figura 44 mostra as variações em cor, fibra, fio e estrutura de tecidos usados no estudo.

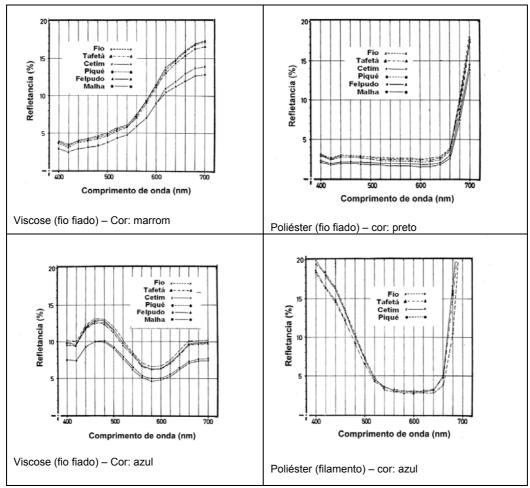


Figura 44 – Curvas de refletância de materiais usados na pesquisa de Kurz e Troska (1970)

A comparação das curvas mostra que os tecidos de malha e felpudo têm sempre menos refletância (são mais escuras em função do menor brilho), a padronagem do tecido não tem tanta influência. No caso de filamentos, este (enrolado) e o cetim têm brilho e refletância maiores do que os tecidos Tafetá e Piquet.

A medição da distribuição espacial da refletância mostra a complexidade do efeito "brilho" em vários substratos têxteis. Não há um pico acentuado na direção do componente especular (45°) e por isso as medições com espectrofotômetros de esfera não apresentam diferenças nas medições "com

brilho" (SIN) e "sem brilho" (SEX). A figura 45 confirma as conclusões tiradas das curvas de refletância (medidas com um espectrofotômetro d/0): os fios enrolados têm o maior brilho seguido pelo tecido de malha.

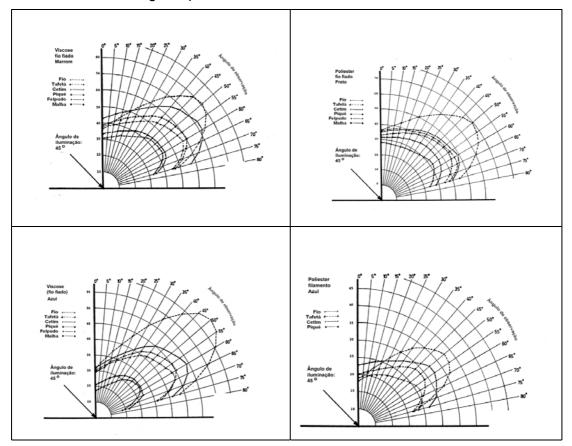


Figura 45 – A distribuição espacial da refletância em vários substratos com ângulo de iluminação de 45 graus (Kurz e Strocka, 1970)

Joshi et al. (1994) chegaram a conclusão de que a medição do brilho ainda não é viável no campo comercial. Os métodos usados são úteis apenas na esfera de pesquisa e desenvolvimento.

Os principais atributos da aparência de objetos utilizados no trabalho (Hunter, 1987):

É interessante analisar nossas avaliações visuais diárias de tudo que vemos. Quando nós consideramos a complexidade dos padrões de luz que atingem o nosso olho e a quantidade de tipos de sinais necessários para converter os impulsos nervosos em identificações de objetos, espaço, posição, e movimento, começamos a perceber o quão sofisticado é a sensação visual. A avaliação do que visualizamos é realizada através de experiências ocorridas desde a nossa infância. Portanto, desenvolvemos nossas habilidades de discriminação visual usando outros sentidos para confirmar a análise visual. A

discriminação visual é provavelmente feita de maneira muito inconsciente, de forma que quando adultos estamos certos que um objeto é brilhante ou fosco, sujo ou limpo, transparente ou opaco, sem estar ciente de como chegamos a estas decisões.

Normalmente, examinamos um objeto com nossos olhos para determinar sua utilidade se é novo ou velho, bonito ou feio, novo ou usado. Quase sempre o julgamento é feito sem reconhecer os reais processos ópticos que nos dão as pistas.

O motorista de um automóvel em uma estrada avalia a superfície da estrada adiante, mas não pelo escurecimento da cor ou pelo seu brilho. Ele está procurando pela presença da água na estrada ao invés de uma cor escura ou brilho revelador da presença da água. Um fazendeiro olha para a terra em seu campo para determinar sua prontidão para arar, plantar ou colher. Ele não está tentando determinar cor e textura, embora estes sejam os atributos ópticos específicos que revelam para ele a qualidade da terra. Um homem examina uma camisa em seu armário quanto a limpeza como padrão de qualidade. Ele não olha conscientemente para padrões e graus de amarelamento e cinza que, não obstante, são os atributos de aparência usados para julgar falta de limpeza. Ele simplesmente conclui baseado em inúmeras de experiências pessoais prévias. Ele aprecia o brilho de seu carro novo sem associar isto com qualquer fenômeno particular envolvendo a interação de luz e objeto, da mesma maneira que ele escolhe a carne mais fresca sem conscientemente perceber que a vermelhidão da carne influenciou sua escolha.

Para entender a especificação da aparência e medição, porém, devemos apreciar os reais eventos ópticos e visuais que acontecem nas fontes de luz, nos objetos que vemos, no olho, e no sistema de nervoso humano. Então, começamos a discussão da natureza da aparência considerando os diferentes maneiras em que nós vemos coisas e como isto afeta nos julgamentos que fazemos sobre as coisas que olhamos.

Verificamos que os atributos de aparência de um objeto são relacionados aos modos com os quais um objeto modifica a luz que o atinge. A luz pode ser modificada espacialmente que resultando em uma reflexão difusa e especular e/ou em uma transmissão difusa e regular. A luz também pode ser modificada espectralmente (em cor). Disso nos leva para o segundo ingrediente da situação de observação, o objeto, e o que ele faz para a luz.

Os quatro processos mais importantes que podem acontecer com a luz quando encontra um objeto são (Hunter, 1987, p. 30):

- 1. A reflexão especular na primeira superfície do objeto (associado com o brilho):
- 2. O espalhamento dentro do material (associada com a reflexão difusa e às vezes com a transmissão difusa);
 - 3. A absorção dentro do material (largamente responsável pela cor); e
- 4. A transmissão regular diretamente através do objeto, se ele for mais ou menos transparente (associada com claridade).

Sabe-se que os comprimentos de onda da luz são muito pequenos. Devese então considerar o detalhe microscópico da figura 46 para se entender o que acontece com a luz incidente. A figura representa um corte transversal esquemático de um substrato de cor amarela.

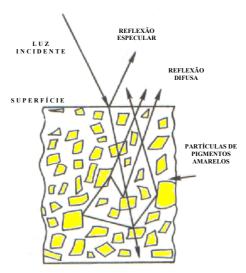


Figura 46 – Esquema da visão microscópica da incidência da luz em um objeto (Hunter, 1987)

Quando um feixe de luz encontra a primeira superfície do tecido, uma pequena porção de luz é refletida e não penetra. A quantia exata refletida depende da suavidade ou rugosidade da superfície, o índice de refração do material, e o ângulo em que o feixe atinge a superfície. Essa luz refletida é o que nós vemos como reflexão especular e é responsável pela aparência brilhante do tecido. Com materiais não-metálicos normais, essa luz refletida é um pouco mudada, se mesmo, em cor. Quanto mais áspera ou texturizada a primeira superfície do tecido está, mais é difusa a luz refletida nessa superfície, ou seja, dispersa em muitas direções. Essa luz incolor espalhada é adicionada à reflexão difusa observada. Deste modo um objeto fosco teria a aparência de ser mais luminoso e menos saturado em cor que um objeto brilhante da mesma composição.

A porção maior do feixe de luz incidente penetra a primeira superfície e entra o corpo da tecido. Este feixe é chamado de refratado porque foi mudado um pouco de direção movendo-se de um meio (o ar) para outro (o corpo interno do tecido), que possuem índices diferentes de refração. A luz então agora encontra numerosas superfícies de partículas de pigmento que fazem o tecido de uma determinada cor. É parcialmente refletido em cada superfície que a luz encontra e este processo de múltiplas reflexões e refrações onde a grande parte da luz retorna para a superfície do tecido e parte em todas as direções, é chamado de luz difusa refletida, e o processo de difusão da luz é chamado de espalhamento.

As reflexões nas partículas de pigmento são responsáveis pela difusão, mas não pela cor amarela do tecido. A passagem de luz pelas partículas de pigmento amarelo é responsável pela cor. A aparência colorida é porque o material colorido remove ou absorve luz azul, mas permite a continuação dos comprimentos de onda verdes, amarelos, e vermelhos. Se corantes verdes tivessem sido usados, então a absorção de luz aconteceria nas regiões azuis e vermelhas do espectro, e o tecido pareceria verde. Este processo de absorver só certos comprimentos de onda de luz é chamado absorção seletiva e é a origem primária da maior parte das cores que vemos em nossa vida diária.

Os processos de reflexão e absorção em combinação com as características de construção de objeto são responsáveis pela aparência de quase todos os objetos.