

PADRÕES VIRTUAIS E TOLERÂNCIAS COLORIMÉTRICAS PARA TÊXTEIS

CMG(RM1) Luiz Miguel Régula, M.Sc.

Centro de Análises de Sistemas Navais

Praça Barão de Ladário, s/n - Ilha das Cobras

Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro - Ed. N^o 8 – 3^o andar CEP 20091-000

email: regula@casnav.mar.mil.br; reguluss@globocom

Resumo

O objetivo do artigo é apresentar alguns resultados quantitativos verificados da diferença instrumental de cor de tecidos com diferentes estruturas, a eficiência de diferentes métodos de cálculo computadorizado de correção de receitas de tingimento, a influência do fenômeno da metameria na tolerância colorimétrica e sugerir uma especificação de pedidos a fabricantes de produtos têxteis, com a utilização de padrões virtuais. O controle das cores, seja visual ou instrumental, necessita de padrões de comparação. No caso visual esse padrão tem que ser uma amostra real, mas no caso instrumental existe a possibilidade de definir padrões virtuais em forma de valores de refletância espectral. Os padrões reais não são permanentes. A cor muda com o tempo dependendo do substrato, dos corantes ou pigmentos e dependendo da forma de armazenamento essa mudança se torna perceptível após algumas semanas, meses ou anos. Outra limitação dos padrões reais é a dificuldade de reproduzi-los em número suficiente com reprodutibilidade aceitável. Nas indústrias é muito comum usar coleções de cores "padrões", mas mesmo assim sempre há uma diferença entre amostras até da mesma edição, e muito mais entre edições diferentes. Os padrões virtuais não têm essas desvantagens, mas para poder utilizá-los, tem-se que determinar o efeito da estrutura da amostra (não mostrada pelos valores de refletância) na cor percebida, e os limites de tolerância permissíveis na iluminação primária (luz do dia) e em outras iluminações (incandescente, fluorescente).

Palavras-chaves: Metrologia, colorimetria, padrão virtual, metameria.

Abstract

The objective of the paper is to quantitatively presents some results verified of the instrumental color difference between fabrics with different structures, the efficiency of different methods of computerized dye recipe correction calculation, the influence of the phenomenon of metamerism on colorimetric tolerances and to suggest a specification to place orders to textile manufacturer, using virtual standards. The control of colors, either visual or instrumental, needs comparison standards. In the visual case this standard has to be a real, physical sample, but in the instrumental case, it is possible to define virtual standards in the form of spectral reflectance values. The real standards are not permanent. Their color changes over time depending on the substrate, the dyes or pigments, and - depending on the storage form - this change becomes perceptible after some weeks, months or years. Another limitation of the real standards is the difficulty to reproduce them in sufficient number with acceptable reproducibility. In industry it is very common to use collections of colors standards, but even then there is always a difference between samples even of the same edition, and much more between different editions. Virtual standards do not have these disadvantages, but to be able to use them, the effect of the structure of the sample on the perceived color (not shown by the values of spectral reflectance), as well as the acceptable limits of tolerance under the primary illumination (daylight) and under other illuminations (incandescent, fluorescent) have to be determined.

Keywords: Metrology, colorimetry, virtual standards, metamerism

1. INTRODUÇÃO

A colorimetria, digna do termo ciência, é fruto de incansáveis cientistas, professores, alunos e instituições que estudam, interpretam, normatizam e utilizam a cor nos diversos setores da sociedade. As inovações tecnológicas do final do século XX tornaram as comunicações, por meio da mídia digital, cada vez mais velozes. Conseqüentemente, o mundo está a cada dia menor e mais globalmente integrado. O uso de padrões colorimétricos encaixa-se perfeitamente nessa realidade virtual por intermédio de padrões chamados virtuais. O padrão virtual é representado por um conjunto de pontos da curva espectrofotométrica de uma cor. Os padrões reais da cor não são permanentes. É enorme o leque de parâmetros que podem influenciar na diferença de uma cor de um tecido acabado. Em especial, podemos citar o substrato, a padronagem e o título do fio empregados na fabricação do item têxtil. Estes parâmetros podem alterar entre outras coisas a textura do tecido, a absorção do corante e a refletância da luz e conseqüentemente a cor. Além disso, devemos determinar os limites de tolerância permissíveis na iluminação primária (luz do dia) e em outras iluminações (incandescente, fluorescente).

2. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE COLORIMETRIA

2.1. 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 dependente do cérebro do observador ou um equipamento detector, como apresentado na figura 1. Considerando o ponto de vista psicofísico, as características da fonte de luz, do objeto, e do observador/detector são importantes para se poder descrever a cor, como indicadas nas curvas espectrais da Figura 2. 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/detector. Estas combinam dando um estímulo que contém todas as informações necessárias para descrever o que nós chamamos cor. 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 ("hue"), a luminosidade ("value") e a saturação ou croma ("chroma"). A estrutura psicométrica é muito similar ao espaço visual.

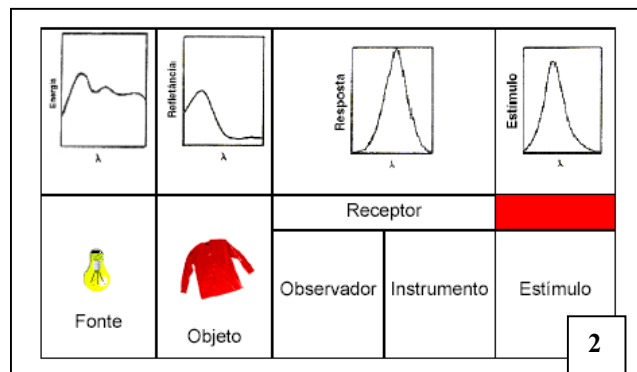
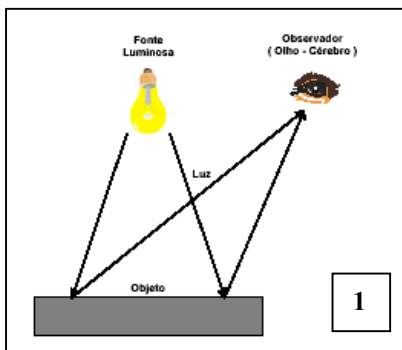


Figura 1 – Cor: os três componentes: fonte, objeto e observador (Hunter,1987)

Figura 2 – A cor apresentada esquematicamente: curvas espectrais

2.2. VALORES TRIESTÍMULOS X Y Z

Especificamente, podemos encontrar para um observador de visão de cor normal, três cores primárias necessárias para matizar cada uma das cores do espectro visível. Dessas cores adequadamente escolhidas obteremos o vermelho, o verde e o azul que consideraremos como as três cores primárias. Por intermédio de experimentos notórios de Grassmann (Hunter, 1987) foram estabelecidas as curvas da sensibilidade espectral correspondente ao olho humano, que após algumas transformações matemáticas adequadas, a CIE ("Commission Internationale de L'éclairage"- Comissão Internacional de Iluminação) em 1931 adotou como padrão o conjunto de três funções de matização de cores para um observador dito padrão (curvas da parte "A" da figura 3) com um campo visual de 2°. Em 1964, foi definido um outro observador padrão suplementar para um campo visual de 10°. Apresenta-se esquematicamente na figura 3 a interpretação da cor por meio de curvas espectrais. Combinado com um observador padrão, o estímulo será expresso por três valores numéricos X, Y e Z que representarão a cor. Esses três valores, mostrados na parte "B" da figura 3, são representados pelas áreas coloridas indicadas que são resultantes da combinação das curvas representativas do iluminante ($S_{(\lambda)}$), do objeto ($R_{(\lambda)}$) e do observador padrão CIE ($\bar{x}_{(\lambda)}$; $\bar{y}_{(\lambda)}$; $\bar{z}_{(\lambda)}$).

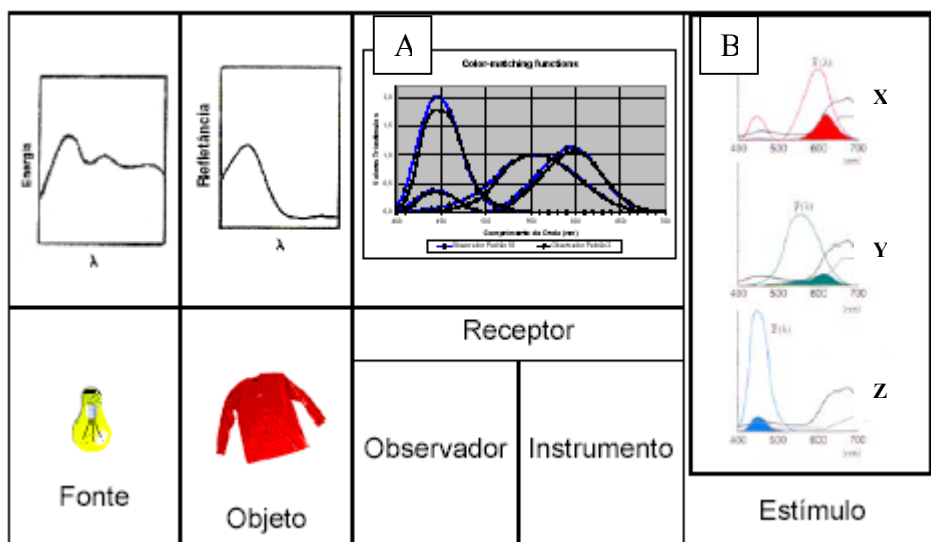


Figura 3 – A cor apresentada esquematicamente: valores triestímulos X, Y e Z.

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

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

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

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

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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.

2.3. ESPAÇO CIELAB

No espaço psicométrico CIELAB as cores são descritas por coordenadas geométricas por meio da luminosidade (L^*), do conteúdo de vermelho/verde (a^*) e de amarelo/azul (b^*); ou das coordenadas cilíndricas de luminosidade (L^*), tonalidade (h°) e croma (C^*). (Figura 4)

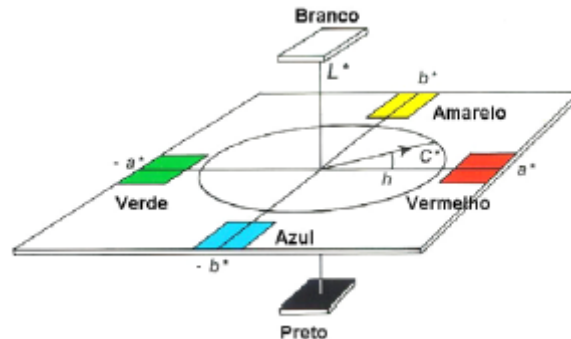


Figura 4 – Espaço CIELAB; significado geométrico das coordenadas (Hirschler, 2000)

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.

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

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

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

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:

$$f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \sqrt[3]{\left(\frac{X}{X_n}\right)} \quad \text{para} \quad \frac{X}{X_n} > 0,008856 \quad \text{e} \quad (12)$$

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

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\left(\frac{Y}{Y_n}\right)} \quad \text{para} \quad \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \quad \text{e} \quad (14)$$

$$f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7,787\left(\frac{Y}{Y_n}\right) + (16/116) \quad \text{para} \quad \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \quad (15)$$

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

$$f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7,787\left(\frac{Z}{Z_n}\right) + (16/116) \quad \text{para} \quad \frac{Z}{Z_n} \leq 0,008856 \quad (17)$$

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

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

No espaço CIELAB, em termos psicométricos, a diferença de cor entre dois estímulos ΔE^* , no caso entre o do padrão e de uma amostra, pode ser quantificada pela distância entre as duas posições do espaço uniforme CIELAB, apresentado na figura 5, e definida pelas fórmulas:

$$\Delta L^* = L_{amostra}^* - L_{padrão}^* \quad (20)$$

$$\Delta a^* = a_{amostra}^* - a_{padrão}^* \quad (21)$$

$$\Delta b^* = b_{amostra}^* - b_{padrão}^* \quad (22)$$

$$\Delta C_{ab}^* = C_{ab,amostra}^* - C_{ab,padrão}^* \quad (23)$$

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

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

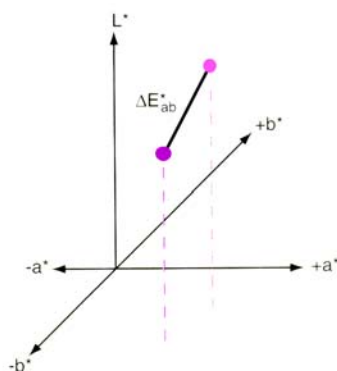


Figura 5 – Diferença de cor no espaço CIELAB

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 ΔE_{CMC} (AATCC, 2003) e o algoritmo para o cálculo de Pequenas Diferenças de Cor, $CMC(l:c)$ (AATCC Test Method 173-1998) temos:

$$\Delta E_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{1S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{cS_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{S_H}\right)^2} \quad (26)$$

$$S_L = \frac{0,040975L^*}{1 + 0,01765L^*} \rightarrow L^* > 16 \text{ ou} \quad (27)$$

$$S_L = 0,511 \rightarrow L^* < 16 \quad (28)$$

$$S_C = \frac{0,0638C_{ab}^*}{1 + 0,0131C_{ab}^*} + 0,638 \quad (29)$$

$$S_H = S_C \times (fT + 1 - f) \quad (30)$$

onde:

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

$$T = 0,36 + |0,4 \cos(h_{ab} + 35)| \text{ para } h_{ab} < 164^\circ \text{ e } h_{ab} > 345^\circ \text{ ou} \quad (32)$$

$$T = 0,56 + |0,2 \cos(h_{ab} + 168)| \text{ para } 164^\circ < h_{ab} < 345^\circ \quad (33)$$

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

2.4. SISTEMAS DE ORDENAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CORES

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 que é o mais usado na colorimetria têxtil.

2.4.1. 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".

2.4.2. Padrões Reais

Baseado no Sistema Munsell de ordenação de cores, há duas coleções têxteis mais conhecidas: a PANTONE, a mais divulgada e com ótima penetração no mercado, e a SCOTDIC. Há também conjuntos de padrões cerâmicos, permanentes e uniformes, necessários para prover um controle de desempenho dos instrumentos de medida da cor.

2.4.3. Padrões Virtuais

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.

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-se um painel de padrões reais disponível para referência visual, mas ainda utilizando o padrão numérico para a aprovação final (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. 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. Simplificadamente metameria é a propriedade de cores com diferentes curvas espectrais que possuem os mesmos valores triestímulos.

$$R_{\lambda(a)} \neq R_{\lambda(b)}; X_{(a)} = X_{(b)}; Y_{(a)} = Y_{(b)}; Z_{(a)} = Z_{(b)}$$

2.6. CORE E ESTRUTURA

2.6.1. O Modelo Simplificado de Kubelka e Munk

No tratamento do assunto refletância-estrutura, a maioria das referências cita o modelo Kubelka e Munk (1931). Kuehni (1975) explica o significado do modelo da seguinte maneira (figura 6):

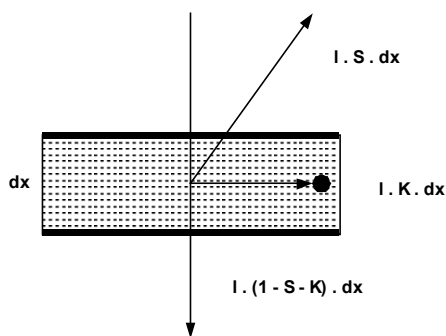


Figura 6 – O significado do modelo Kubelka e Munk (Kuehni, 1975)

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

$$K / S = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (34)$$

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

$$(K/S_{\lambda,m}) = (K/S)_{\lambda,sub} + c_1(K/S)_{\lambda,1} + c_2(K/S)_{\lambda,2} + \dots \quad (35)$$

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

3. EXPERIMENTO

3.1. MATIZAÇÃO COMPUTACIONAL

O processo de tingimento foi realizado por técnicos e alunos do Curso de Engenharia Industrial Têxtil nas instalações da Unidade Operacional de Ensaios Químicos do Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil (CETIQT) do SENAI – Rio de Janeiro. Demandou-se a preparação de amostras padrão e medições espectrofotométricas, com elevado controle metrológico, realizadas nas mesmas dependências.

Foram utilizados tecidos planos de algodão com várias estruturas. Os corantes utilizados foram os reativos, comercialmente conhecidos como Procion HEXL, produzidos pela BASF S.A.

Os equipamentos utilizados para as medições realizadas foram dois: um espectrofotômetro, da marca Minolta, modelo CM-3600d, o qual faz medições simultâneas com as geometrias especular incluído (SIN) e excluído (SEX) e um espectrofotômetro da marca BYK-Gardner, modelo Colorview 9000 o qual faz medições com a geometria 45/0. Ambos foram calibrados pela Unidade Operacional de Colorimetria do SENAI-CETIQT, laboratório credenciado pelo INMETRO. Os dados colorimétricos foram obtidos por meio do programa de colorimetria denominado SpectraMatch, versão 3.4.5.D.

3.2. CORREÇÃO INSTRUMENTAL

Comparando duas amostras com estruturas (fio, padronagem, etc.) diferentes podemos chegar em três situações de igualdade:

1-Química: as combinações de corantes (receitas) usadas no tingimento das duas são iguais;

2-Espectrofotométrica e colorimétrica: as curvas de refletância das duas amostras são iguais e conseqüentemente os valores triestímulos e as coordenadas CIELAB são iguais; e

$$R(\lambda)_1 = R(\lambda)_2 \quad (36)$$

e

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_2 \quad (37)$$

3-Visual: as cores das duas amostras parecem iguais visualmente.

O objetivo da correção instrumental é igualar as curvas de refletância. Há três possibilidades de calcular a correção necessária:

1-Calcula-se a receita correta, para a nova estrutura, usando-se o próprio software (Spectra Match, da Minolta Instrument Systems V.3.4.5D) de formulação caso esteja disponível um banco de dados para o "novo" substrato, ou seja, a necessidade de realizar uma séries de tingimentos com 10 a 12 concentrações de corantes;

2-Pode-se fazer tingimentos no novo substrato com a combinação "padrão" e com cada um dos corantes individuais nas mesmas concentrações. Calcula-se as correções utilizando-se as variações dos valores triestímulos em relação às concentrações e obtendo-se um gradiente no formato $\Delta X/\Delta c_1$ ou $\Delta L/\Delta c_1$ ("Tingimentos com Corantes Individuais"); ou

3-Pode-se também calcular os gradientes no formato $\Delta X/\Delta c_1$ ou $\Delta L/\Delta c_1$ fazendo-se quatro tingimentos no novo substrato: com a combinação "padrão" e variando os três corantes um a um por 10% ou 20% acima da concentração padrão ("Tingimentos com Combinações").

Nesse experimento foram usados os três métodos de correção. O primeiro método, usando-se o banco de dados de tingimento, foi utilizado para matizar algumas as cores padrão, bem como, alguns pares de cores metaméricas. Os dois outros métodos, tingimentos com corantes individuais e com combinações, foram usados envolvendo todas as demais cores padrão.

Considerando-se uma receita qualquer inicial (equação 35), se alterarmos a concentração do corante c_1 de uma pequena quantidade Δc_1 , teremos como resultante uma mudança nos valores triestímulos e, conseqüentemente, nos valores de $L^*a^*b^*$. Se dividirmos a variação de L pela variação de c_1 obteremos o gradiente $\Delta X/\Delta c_1$ que pode-se assumir como sendo linear para pequenas distâncias no espaço de cor. Portanto para a previsão da variação em Δc_1 teremos:

$$\begin{aligned}\Delta L^* &= \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_1} \right) \times \Delta C_1 \\ \Delta a^* &= \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_1} \right) \times \Delta C_1 \\ \Delta b^* &= \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_1} \right) \times \Delta C_1\end{aligned}\quad (38)$$

se mudarmos as concentrações de uma tricomia em pequenas quantidades Δc_1 , Δc_2 e Δc_3 teremos um sistema de três equações com três incógnitas;

$$\begin{aligned}\Delta L^* &= \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_1} \right) \times \Delta C_1 + \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_2} \right) \times \Delta C_2 + \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_3} \right) \times \Delta C_3 \\ \Delta a^* &= \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_1} \right) \times \Delta C_1 + \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_2} \right) \times \Delta C_2 + \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_3} \right) \times \Delta C_3 \\ \Delta b^* &= \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_1} \right) \times \Delta C_1 + \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_2} \right) \times \Delta C_2 + \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_3} \right) \times \Delta C_3\end{aligned}\quad (39)$$

que resulta em :

$$L = \begin{bmatrix} \Delta L^* \\ \Delta a^* \\ \Delta b^* \end{bmatrix}\quad (40)$$

$$M = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_1} \right) & \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_2} \right) & \left(\frac{\partial L^*}{\partial c_3} \right) \\ \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_1} \right) & \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_2} \right) & \left(\frac{\partial a^*}{\partial c_3} \right) \\ \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_1} \right) & \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_2} \right) & \left(\frac{\partial b^*}{\partial c_3} \right) \end{bmatrix}\quad (41)$$

$$C = \begin{bmatrix} \Delta c_1 \\ \Delta c_2 \\ \Delta c_3 \end{bmatrix}\quad (42)$$

$$L = M \times C \quad (43)$$

A matriz M chama-se "matriz de influência" e representa o efeito da concentração de cada um dos corantes nas coordenadas CIELAB.

Para obtermos os valores de Δc_i teremos:

$$C = L \times M^{-1} \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta c_1 \\ \Delta c_2 \\ \Delta c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta L^* \\ \Delta a^* \\ \Delta b^* \end{bmatrix} \times M^{-1} \quad (45)$$

Teremos por conseguinte, os valores das correções necessárias para se chegar à mesma cor desejada (curva de refletância, valores triestímulos X, Y e Z e CIELAB) nos dois substratos. A matriz M^{-1} chama-se "matriz de correção" que é a matriz invertível de M.

3.2.1. Exemplo da Correção de Tingimentos com Corantes Individuais

Tingimentos foram feitos no novo substrato com a combinação "padrão" e cada um dos corantes individuais nas mesmas concentrações. Um exemplo expresso na Tabela 1:

Corantes (% spm)	Cor Padrão Bege Substrato Tafetá	Cor Padrão Bege	Substrato Gorgurão			
			Amarelo	Crimson	Marinho	Tingimento Cego
Amarelo (%)	0,1335	0,1335	0,1335	-	-	-
Crimson (%)	0,0212	0,0212	-	0,0212	-	-
Marinho (%)	0,1107	0,1107	-	-	0,1107	-
Amostras	Am1	Am2	Ind1	Ind2	Ind3	SUB

Tabela 1– Tingimentos com corantes individuais

Em seguida, foram feitas as medições de refletância dos tingimentos, e calculados os valores espectrais de K/S pela fórmula Kubelka-Munk:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = \frac{(1 - R_\lambda)^2}{2R_\lambda} \quad (46)$$

o valor $(K/S)_\lambda$ de um substrato têxtil tinto com três corantes é dado pela fórmula:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,SUB} + c_1 \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,1} + c_2 \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,2} + c_3 \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,3} \quad (47)$$

onde

$(K/S)_{\lambda,SUB}$ é do tingimento cego ("substrato");

c_1 , c_2 e c_3 são as concentrações de cada corante (% spm);

$(K/S)_{\lambda,i}$ são valores K/S do tingimento com concentração unitária, calculados dos valores dos tingimentos com corantes individuais:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,i} = \frac{(K/S)_{\lambda,i} - (K/S)_{\lambda,SUB}}{c_i} \quad (48)$$

para o exemplo da tabela 1 temos:

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,Am2} = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,SUB} + 0,1335 \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,1} + 0,0212 \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,2} + 0,1107 \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,3} \quad (49)$$

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,1} = \frac{(K/S)_{\lambda,Ind1} - (K/S)_{\lambda,SUB}}{0,1335} \quad (50)$$

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,2} = \frac{(K/S)_{\lambda,Ind2} - (K/S)_{\lambda,SUB}}{0,1335} \quad (51)$$

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,3} = \frac{(K/S)_{\lambda,Ind3} - (K/S)_{\lambda,SUB}}{0,1107} \quad (52)$$

para calcular o efeito de $\Delta c_1 = 20\%$ (ou seja, o efeito de aumentar, uma a uma, a concentração de cada dos corantes) em torno da receita “padrão” temos:

$$Am3 = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,c_1+20\%} = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,SUB} + 1,2c_1\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,1} + c_2\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,2} + c_3\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,3} \quad (53)$$

$$Am4 = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,c_2+20\%} = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,SUB} + c_1\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,1} + 1,2c_2\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,2} + c_3\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,3} \quad (54)$$

$$Am5 = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,c_3+20\%} = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,SUB} + c_1\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,1} + c_2\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,2} + 1,2c_3\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda,3} \quad (55)$$

aplicando o inverso da equação Kubelka-Munk calculamos a refletância (Kuehni,1975):

$$R_\lambda = \sqrt{1 + (K/S)_\lambda - [(K/S)_\lambda^2 + 2(K/S)_\lambda]} \quad (56)$$

e da refletância os valores triestímulos (CIE, 1986):

$$X = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (57)$$

$$Y = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (58)$$

$$Z = K \sum_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (59)$$

$$K = \frac{100}{\sum_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (60)$$

e dos valores X, Y e Z as coordenadas CIELAB. Calculando as diferenças CIELAB entre as coordenadas da cor padrão e as três variações com receitas com 20% de aumento, sempre em um dos corantes, temos os valores $\Delta L^*_{Am3-Am2} \dots etc.$, e dividindo esses com as diferenças em concentração ($0,2c_i$) temos as aproximações dos elementos da matriz de influência:

$$\frac{\partial L^*}{\partial c_1} = \frac{\Delta L^*_{Am3-Am2}}{\Delta c_1}, \frac{\partial a^*}{\partial c_1} = \frac{\Delta a^*_{Am3-Am2}}{\Delta c_1}, \frac{\partial b^*}{\partial c_1} = \frac{\Delta b^*_{Am3-Am2}}{\Delta c_1} \quad (61)$$

$$\frac{\partial L^*}{\partial c_2} = \frac{\Delta L^*_{Am4-Am2}}{\Delta c_2}, \frac{\partial a^*}{\partial c_2} = \frac{\Delta a^*_{Am4-Am2}}{\Delta c_2}, \frac{\partial b^*}{\partial c_2} = \frac{\Delta b^*_{Am4-Am2}}{\Delta c_2} \quad (62)$$

$$\frac{\partial L^*}{\partial c_3} = \frac{\Delta L^*_{Am5-Am2}}{\Delta c_3}, \frac{\partial a^*}{\partial c_3} = \frac{\Delta a^*_{Am5-Am2}}{\Delta c_3}, \frac{\partial b^*}{\partial c_3} = \frac{\Delta b^*_{Am5-Am2}}{\Delta c_3} \quad (63)$$

3.2.2. Exemplo da Correção de Tingimentos com Combinações

Iniciamos o experimento com uma receita com concentrações c_1 , c_2 e c_3 , com coordenadas CIELAB L^*_{Am1} , a^*_{Am1} e b^*_{Am1} para Substrato A e L^*_{Am2} , a^*_{Am2} e b^*_{Am2} para Substrato B. Gerando variações de 20% (nas concentrações originais) no Substrato B teremos:

$$\Delta c_1 = c'_1 - c_1 = 0,2 \times c_1 \quad (64)$$

$$\Delta c_2 = c'_2 - c_2 = 0,2 \times c_2 \quad (65)$$

$$\Delta c_3 = c'_3 - c_3 = 0,2 \times c_3 \quad (66)$$

e as novas concentrações c'_1 ; c'_2 e c'_3 serão:

$$c'_1 = 1,2 \times c_1; c'_2 = 1,2 \times c_2 \text{ e } c'_3 = 1,2 \times c_3 \quad (67)$$

Corantes (%) spm	Cor Padrão 1 Substrato A	Cor Padrão 1 Substrato B	+ 20% Amarelo	+ 20% Vermelho	+ 20% Azul Marinho
Amarelo	0,7681	0,7681	0,9217	0,7681	0,7681
Crimson	0,3339	0,3339	0,3339	0,4007	0,3339
Azul Marinho	0,1938	0,1938	0,1938	0,1938	0,2326
Amostras	Am1	Am2	Am6	Am7	Am8

Tabela 2 – Exemplo de receitas para calcular a correção na base de tingimentos com combinações

Em seguida, foram feitas as medições de refletância e calculadas as diferenças CIELAB entre a cor padrão e as variações no Substrato B: $\Delta L^*_{Am6-Am2}$. . . etc. O efeito da concentração de cada um dos corantes nas coordenadas CIELAB, é calculado como aproximações lineares:

$$\frac{\partial L^*}{\partial c_1} = \frac{\Delta L^*_{Am6-Am2}}{\Delta c_1}; \frac{\partial a^*}{\partial c_1} = \frac{\Delta a^*_{Am6-Am2}}{\Delta c_1}; \frac{\partial b^*}{\partial c_1} = \frac{\Delta b^*_{Am6-Am2}}{\Delta c_1} \quad (68)$$

$$\frac{\partial L^*}{\partial c_2} = \frac{\Delta L^*_{Am7-Am2}}{\Delta c_2}; \frac{\partial a^*}{\partial c_2} = \frac{\Delta a^*_{Am7-Am2}}{\Delta c_2}; \frac{\partial b^*}{\partial c_2} = \frac{\Delta b^*_{Am7-Am2}}{\Delta c_2} \quad (69)$$

$$\frac{\partial L^*}{\partial c_3} = \frac{\Delta L^*_{Am8-Am2}}{\Delta c_3}; \frac{\partial a^*}{\partial c_3} = \frac{\Delta a^*_{Am8-Am2}}{\Delta c_3}; \frac{\partial b^*}{\partial c_3} = \frac{\Delta b^*_{Am8-Am2}}{\Delta c_3} \quad (70)$$

3.2.3. Cálculo das Receitas com Correção

Uma vez que os elementos da matriz de influência M foram determinados ou pelo método "tingimentos com corantes individuais" (3.2.1) ou pelo método "tingimentos com combinações" (3.2.2) e a matriz de correção M^{-1} calculada, podemos determinar as correções do Substrato B para o Substrato A (ou qualquer outro substrato) medindo as diferenças CIELAB entre os dois tingimentos com a receita "padrão" nos dois substratos, e multiplicando a matriz de correção M^{-1} com o vetor L (diferenças CIELAB):

$$C_{corr} = M^{-1} \times L \quad (71)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{corr1} \\ \Delta C_{corr2} \\ \Delta C_{corr3} \end{bmatrix} = M^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta L^* \\ \Delta a^* \\ \Delta b^* \end{bmatrix} \quad (72)$$

Por exemplo, o cálculo para a correção do Substrato B para Substrato A, referente à tabela 1 resultou em:

$$\begin{bmatrix} \Delta C_{corr1} = -0.0033 \\ \Delta C_{corr2} = 0.0020 \\ \Delta C_{corr3} = -0.0161 \end{bmatrix} \quad (73)$$

A nova receita corrigida será conforme a Tabela 3:

Corantes (%) spm	Cor Padrão Bege Substrato B	Correção Amarelo	Correção Vermelho	Correção Marinho	Cor Bege Corrigida Substrato Gorgurão
Amarelo (%)	0,1335	-0,0033	-	-	0,1302
Crimson (%)	0,0212	-	0,0020	-	0,0232
Marinho (%)	0,1107	-	-	-0,0161	0,0946

Tabela 3 – Exemplo da correção das receitas

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se que os métodos desenvolvidos para calcular as correções, por meio de cálculos computacionais, forneceram resultados muito bons e, em alguns casos, chegando a valores de ΔE_{CIELAB} bem próximos de zero. Como exemplo, dentre diversos resultados, nos artigos de Algodão e Gorgurão foram atingidas correções para todas as cores nos dois métodos. Apresenta-se na figura 7, para a cor padrão 3, as diferenças entre as coordenadas colorimétricas (coluna nº 6) antes ($\Delta E^* = 2,89$) e após as correções respectivamente pelos métodos 1 ($\Delta E^* = 0,47$) e 2 ($\Delta E^* = 1,76$).

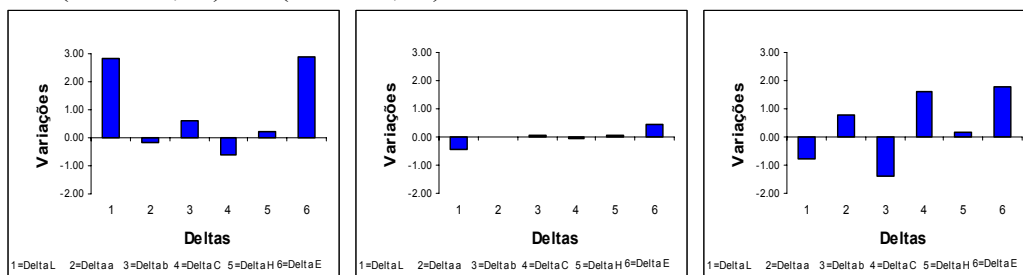


Figura 7 – Diferenças entre as coordenadas colorimétricas antes e após as correções

4. SELEÇÃO DE PADRÕES

Cores tais como cinza claro, cinza escuro e bege, utilizadas nos experimentos descritos no item 3, foram obtidas a partir de amostras físicas. Da mesma forma, um fabricante de tecidos, necessita de uma referência, ou seja, um padrão, para matizar as cores solicitadas por um comprador.

As coordenadas $L^*a^*b^*$ representam um ponto no espaço psicométrico das cores do sistema de coordenadas CIE de colorimetria. Porém, sabe-se da colorimetria que pode existir uma família de curvas que são representadas por um único ponto $L^*a^*b^*$. Portanto, é necessário que, além das coordenadas colorimétricas, a cor padrão possua uma referência representada ou por uma amostra física, por exemplo, uma amostra de uma coleção têxtil de cores padrão, tipo Pantone, ou por um padrão virtual que é representado por uma curva de refletância. Os padrões reais e as coleções de cores padrões não são permanentes. A cor muda com o tempo dependendo do material com o qual é fabricado o padrão. Dependendo do tecido, dos corantes ou pigmentos utilizados, da forma e lugar de armazenamento ou do manuseio inapropriado, a mudança da cor torna-se perceptível após algumas semanas, meses ou anos. Além disso, para as coleções de cores padrões, ainda pesa a limitação de ocorrer diferenças não somente entre amostras de edições diferentes como até entre amostras da mesma edição.

O padrão virtual é representado pelos dados da refletância espectral resultantes das medidas espectrofotométricas do padrão físico desejado. O padrão virtual facilitará o fabricante na formulação instrumental de receitas das cores. Além disso, na atualidade, o padrão virtual poderá ser rápida e facilmente comunicado por diversos meios, principalmente o digital, sem a preocupação das desvantagens atribuídas aos padrões reais. A mensuração da cor poderá ser baseada em normas atualizadas e de conhecimento público tais como: "AATCC Evaluation Procedure 6 – Instrumental Color Measurement" e "AATCC Test Method 173-1998 – Calculation of Small Color Difference for Acceptability" desenvolvidas pela "American Association of Textile Chemists and Colorists" - AATCC.

O fator de tolerância, $\Delta E_{CMC(2:1)}$ máximo, deverá ser determinado comparando-se as avaliações visuais e instrumentais de amostras físicas que servirão para a determinação de respectivos padrões. O valor de tolerância representa o ponto de maior proporção de decisões instrumentais certas em relação ao número de decisões certas visuais de um painel de observadores composto de pessoas representantes do local responsável pela aquisição/compra

do material na organização. Essa tolerância equivale a um valor $\Delta E_{CMC(2:1)}$ que poderá ser determinada experimentalmente. A tolerância é baseada na medida $\Delta E_{CMC(2:1)}$ (fórmula CMC, mais adequada para a indústria têxtil) para observador padrão 10° com iluminantes denominados D65, A e TL84.

Um painel é um grupo formado de 8 a 10 pessoas as quais devem ser submetidas a testes de aptidão visual e treinamento como observadores de cores. A decisão desse painel será a média das porcentagens das decisões certas individuais em relação as decisões da maioria dos observadores.

São propostas na tabela 4 as informações mínimas necessárias para uma norma de cores para a compra de produtos de têxteis. A denominação da cor fica a critério do comprador. A informação da composição do tecido é necessária, pois verificou-se quantitativamente nos experimentos que com a mudança do substrato/composição há mudança correspondente na cor e conseqüentemente de seus valores colorimétricos. Portanto, com a mudança da composição/estrutura do tecido será necessário a devida alteração dos valores de $L^*a^*b^*$ e da própria tolerância colorimétrica na norma das cores. A amostra "Pantone" poderá ser usada como referência visual representando uma determinada estrutura. Além disso, devem fazer parte da norma, principalmente os valores de refletância das cores padrões. Esse conjunto de valores representará o padrão virtual. As coordenadas colorimétricas $L^*a^*b^*$ deverão estar em relação aos iluminantes padrão D65 (CIE), A e TL84 para um observador padrão de 10° (CIE). As tolerâncias ($\Delta E_{cmc(2:1)}$), para os mesmos iluminantes citados, deverão ser sempre obtidas por meio de um painel como mencionado nos parágrafos anteriores.

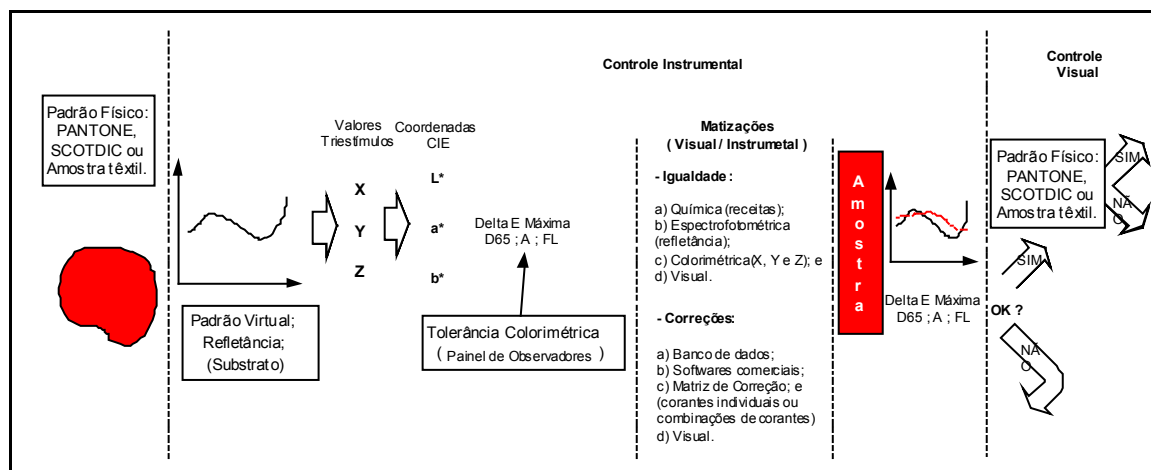
COR	Composição	Referência PANTONE ou outra	D65 / 10			A/10			TL84/10			$\Delta E_{cmc(2:1)}$ máximo		
			L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	D65/ 10	A/ 10	TL84/10
Exemplos numéricos														
1											1,2	2,0	2,0	
2														

Valores de refletância espectral (%) para comprimento de onda 360 a 740nm para intervalos de 10nm.

Tabela 4 – Uma formatação de norma colorimétrica

Exemplificando uma situação prática, com a utilização da Tabela 4, um determinado fornecedor têxtil apresenta uma amostra cuja diferença de cor $\Delta E_{CMC2:1}$ deve ser menor do que 1,2 para D65/10 e menor do que 2,0 para A/10 e TL85/10. A situação ideal, mas irreal na prática, seria $\Delta E_{CMC2:1}=0$, para todos os iluminantes. Uma situação importante é quando for apresentado, por exemplo, uma amostra com $\Delta E_{CMC2:1}=0,5$ para D65/10; 1,9 para A e 1,8 para TL84/10. Ou seja, valor próximo de zero para D65/10 e próximo de 2,0 para A/10 e TL84/10. Nesse caso temos caracterizado o limite máximo permitido para que ocorra o fenômeno da metameria. Esse fenômeno poderá ocorrer por causa da existência de diversos fornecedores e cada um desses poderá escolher combinação de diferentes tipos de corantes para matizar a cor padrão exigida. Essa natural liberdade de escolha poderá favorecer o aparecimento da metameria. Além disso, outro fator determinante no aparecimento desse fenômeno é a variedade de substratos utilizados na matização das cores. Essa mudança de substratos exige naturalmente a mudança do grupo de corantes para a devida matização. Com relação à mudança da estrutura do substrato (por exemplo: sarja, tafetá e gorgurão) determinará a mudança na aparência da cor e que poderá ser corrigida pelo método descrito no texto.

A figura a seguir representa esquematicamente a utilização de um padrão virtual.



5. CONCLUSÕES

É imperativo que o estabelecimento das tolerâncias colorimétricas tenha um adequado critério técnico, principalmente quando houver a mudança nas especificações têxteis. Essa afirmativa é reforçada pelos experimentos realizados com tecidos têxteis, onde se constatou, quantitativamente, diferenças de cor entre amostras preparadas da mesma fibra e preparadas pelo mesmo processo químico (inclusive o do tingimento), porém com diversas estruturas de fio e/ou de tecido.

Os dois métodos de cálculo utilizados, por meio de matriz de influência, baseado em tingimentos individuais e tingimentos com combinações, apresentaram receitas diferentes. Após a realização desses tingimentos, foram obtidos resultados distintos para as duas correções e verificou-se que os métodos desenvolvidos para calcular as correções, por meio de cálculos computacionais, forneceram resultados muito bons em alguns casos, chegando a valores de ΔE_{CIELAB} bem próximos de zero e curvas de refletância praticamente idênticas. Isto é importante, pois nos mostram duas alternativas para a correção de cor quando se altera o substrato, evitando assim, a necessidade de montar um novo banco de dados para qualquer novo substrato.

Assim, o presente artigo, não apenas apresentou alguns conceitos relevantes e básicos sobre colorimetria bem como, apresentou, na prática e por meio de resultados numéricos de experimentos laboratoriais, sob elevado controle metrológico, a importância do controle instrumental das cores utilizando-se padrões virtuais e tolerâncias colorimétricas adequadas. Por conseguinte, haverá de contribuir para o incentivo do estudo e da aplicação científica da colorimetria por parte de todos os principais envolvidos no mercado de têxteis.

O artigo demonstrou que no fornecimento de grandes quantidades de um produto têxtil colorido por vários fornecedores o uso de padrões virtuais na especificação da cor dos produtos é viável, mas tomando-se cuidados especiais, particularmente os seguintes:

1. Não é o suficiente especificar a cor pelas coordenadas colorimétricas (sejam valores triestímulos, ou de um espaço visualmente mais uniforme, como, por exemplo, CIELAB), é preciso mostrar (se não como parte obrigatória da norma, mas pelo menos como informação) os dados espectrais.

2. Os valores colorimétricos/espectrais do padrão virtual, e as tolerâncias correspondentes são válidos apenas para uma determinada combinação de fibras/fio/tecido. Mudando a estrutura do tecido as conseqüências visuais devem ser avaliadas e, se for necessário, os valores do padrão devem ser modificados.

3. As conseqüências práticas da metameria (até um certo ponto inevitável na produção têxtil) não são tratadas na literatura adequadamente. A relevância do uso de índices de metameria para estabelecer limites de tolerância entre vários iluminantes nunca foi comprovada experimentalmente, e nesse campo é preciso uma pesquisa bastante profunda

para poder chegar em um resultado conclusivo. Sugere-se então o uso de limites de tolerância individuais para cada iluminante em vez de utilizar os índices de metameria fornecidos pelos softwares comerciais. Entretanto, esses limites devem ser verificados experimentalmente para cada iluminante.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BROCKERS, Andreas; *The Problem of Color Metamerism from an Industrial Viewpoint*. Color Engineering, May/June 1968.
- [2] CHOUDHURY, A. K. ROY; CHATTERJEE, S. M.; *Quantifying Metamerism*. Ver. Prog. Coloration, v.22, 1992.
- [3] FENN, R. I.; PARK, J.; *The Use of Non-Physical Standards in Colour Communication and Matching*. JSDC, v.113, Feb 1997.
- [4] HIRSCHLER, Robert; *Processos e Sistemas de Beneficiamento Têxtil*; Colorimetria Aplicada na Indústria Têxtil, Rio de Janeiro 2002. FaSeC–Faculdade-SENAI/CETIQT.
- [5] HUNTER, Richard S. HAROLD Richard W.; *The Measurement of Appearance*. Second edition, John Wiley & Sons, 1987.
- [6] MCDONALD, Roderick; *Colour Physics for Industry*, Second Edition, Society of Dyers and Colourists, 1997.
- [7] KUBELKA, Paul; MUNK, Franz; *Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche*. Technical Physic, v.12, p. 593-601, 1931.
- [8] KUEHNI, Rolf G.; *Computer Colorant Formulation*. Lexington Books, D.C. Heath and Company, Lexington, Mass. 1975.
- [9] MARCUS, Robert T.; *Long-Term Repeatability of Color-Measuring Instrumentation: Storing Numerical Standards*, Color Research and Application. v.3, n.1, Spring 1978.
- [10] RÉGULA, L. M.; *Padrões Virtuais e Tolerâncias Colorimétricas no Controle Instrumental das Cores*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro, R.J., março/2004.
- [11] SMITH, S. Neville; *Virtual Colour Specification*; JSDC. v.111, Sept. 1995.