

## 2 Fundamentos da Colorimetria

Colorimetria refere-se à ciência e à tecnologia usada para quantificar e descrever (pela ajuda de modelos matemáticos) as percepções humanas da cor.

A percepção das cores pelos olhos não é um processo meramente visual, mas sim psico-visual. A cor é algo que se vê com os olhos e se interpreta com o cérebro, é o resultado da interação da luz com os materiais.

### 2.1. Sistema CIE

O sistema CIE (Comissão Internacional de Iluminação) é utilizado para descrever a cor. Ele não é diferente de nenhum outro, exceto por sua padronização de iluminantes e de observadores.

#### Histórico da CIE:

- Em 1931 surgiu o Sistema CIE. Neste ano, a CIE criou o observador padrão 2º (leia-se observador padrão dois graus) e os iluminantes A, B e C, e desenvolveu as fórmulas para calcular os valores triestímulos (XYZ) e as coordenadas de cromaticidade xy.

- Em 1964, a CIE criou o observador padrão 10º (leia-se observador padrão dez graus), o diagrama UCS (Uniform Chromaticity Scale) e os iluminantes da família D (luz do dia).

- Em 1976, a CIE definiu o espaço CIELAB (em termos de coordenadas colorimétricas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) e o espaço CIELUV (em termos de coordenadas colorimétricas  $L^*$ ,  $u^*$  e  $v^*$ ).

### 2.2. Observador Padrão

Como a cor depende do observador, tornou-se necessário padronizar este elemento. Em 1931, a CIE criou o observador padrão 2º (leia-se observador padrão dois graus) e, em 1964, criou o observador 10º (leia-se observador padrão dez graus), os quais estão representados na figura 2. Observador padrão

representa a sensibilidade do olho humano com a mistura das três cores primárias: vermelho, verde e azul.

A padronização do campo visual do observador significa simplesmente a escolha de duas áreas distintas na retina: a parte central (fóvea, onde praticamente só há cones), e a “geral” (que inclui também uma área onde há bastonetes). Os cones são os elementos responsáveis pela visão em cores e os bastonetes são responsáveis pela visão em preto e branco.

Para materializá-las, torna-se constante a distância ( $d$ , na figura 1) do olho ao plano e toma-se um ângulo de  $2^\circ$  (fóvea) ou de  $10^\circ$  (geral). A área definida pela base do cone assim formado é o campo visual do observador padrão. A figura 3 apresenta os diferentes campos visuais de acordo com os observadores.

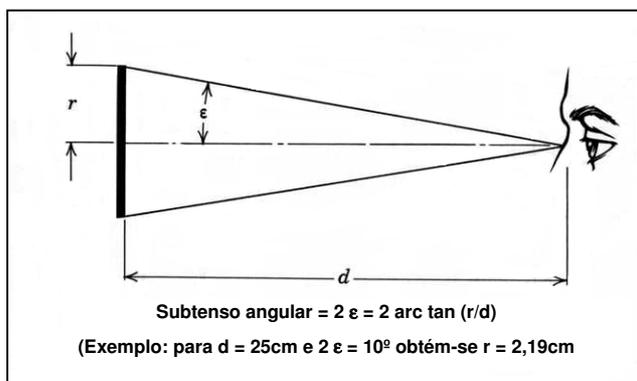


Figura 1. Observador padrão (Hirschler, 2002)

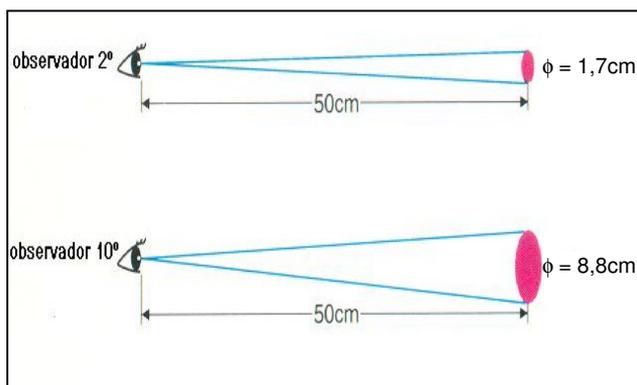


Figura 2. Observadores  $2^\circ$  e  $10^\circ$  (Minolta, 1993)

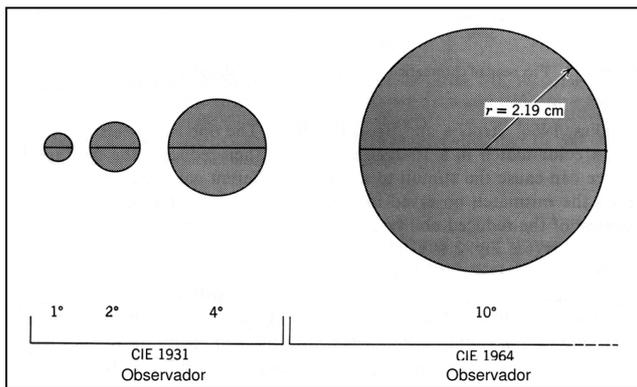


Figura 3. Campos visuais dos observadores (Hirschler, 2002)

### 2.3. Iluminantes e Fontes CIE

Há muitas fontes de luz disponíveis no mercado que apresentam distribuições espectrais de potência bastante diferentes entre si, mesmo sendo comercializadas com a mesma designação.

Como a iluminação influencia diretamente na cor dos objetos, estes apresentam mudanças significativas na aparência da cor quando submetidos a diferentes fontes luminosas.

Para reduzir essa complexidade, a CIE padronizou alguns iluminantes e fontes.

#### 2.3.1. Iluminante A

O iluminante A representa a luz de um corpo negro de temperatura 2856K de acordo com a Escala Internacional de Temperatura de 1968.

Um corpo negro é um corpo hipotético que emite (ou absorve) radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda, de forma que:

- toda a radiação incidente é completamente absorvida, e
- em todos os comprimentos de onda e em todas as direções a máxima radiação possível para a temperatura do corpo é emitida.

A radiação do corpo negro, também chamado de radiador de Planck, é isotrópica, isto é, não depende da direção.

A radiação monocromática emitida por um radiador de corpo negro é determinada pela Lei de Planck, descrita na equação 1.

$$M_{e,\lambda}(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} Wm^{-1} \quad \text{eq. (1)}$$

Nesta equação, as constantes de radiação e os parâmetros são dados como:

$$c_1 = 3,74150 \times 10^{-16} Wm^2$$

$$c_2 = 1,4388 \times 10^{-2} WK$$

$$e = 2,718 \text{ (base do logaritmo neperiano)}$$

$\lambda$  = comprimento de onda

T = temperatura de cor correlata

Todo iluminante referencial com temperatura de cor correlata menor que 5000K pode ser considerado como um radiador de corpo negro, governado, portanto, pela Lei de Planck.

Devido às mudanças que ocorreram na Escala Internacional de Temperatura, o valor da constante  $c_2$ , presente na Lei de Planck, foi alterado para  $1,4350 \times 10^{-2} WK$ .

### **2.3.2. Fonte A**

A fonte A é a fonte mais comum de luz artificial. Nesta categoria enquadram-se todas as lâmpadas incandescentes cuja temperatura de cor correlata se aproxime de 2856K.

### **2.3.3. Iluminante B**

O iluminante B foi desenvolvido para representar a luz do sol, com uma temperatura de cor correlata de aproximadamente 4900K.

### **2.3.4. Fonte B**

A fonte B foi desenvolvida para simular o iluminante B. Ela foi construída pela combinação da fonte A com um filtro contendo líquidos especiais em duas células.

### 2.3.5. Iluminante C

O iluminante C foi desenvolvido para representar a luz média do dia, com uma temperatura de cor de aproximadamente de 6800K.

### 2.3.6. Fonte C

A fonte C foi desenvolvida de forma similar à fonte B, substituindo-se os líquidos das células por outros com os mesmos componentes, mas em outras concentrações, modificando dessa forma a distribuição espectral de potência de 4900K (fonte B) para 6800K (fonte C).

### 2.3.7. Iluminantes D

A CIE definiu iluminantes padrão de luz do dia série D com base na combinação de diferentes medições que variam tanto em relação à localização geográfica, quanto em relação aos horários de medição e às condições atmosféricas e climáticas. Conforme recomendado, essas medições devem ser feitas com intervalos de 10nm, e interpoladas e padronizadas com intervalos de 5nm. Isto determina a natureza teórica dos iluminantes luz do dia da CIE, tornando-os virtualmente irreprodutíveis na prática, com exatidão absoluta (Hunt,1993).

Foi em 1963 que a CIE recomendou o iluminante padrão D65. Ele apresenta uma temperatura correlata de cor de 6504K e é utilizado para representar a média da luz do dia, no espectro visível e também na região UV até 300nm. Os iluminantes B (4900K) e C (6800K) da CIE 1931 tinham e têm muito menos energia na região UV do que a luz do dia. Por esse motivo, para medições e avaliações de amostras fluorescentes, a quantidade correta de UV é muito importante. Os iluminantes da série D (D50, D55, D65 e D75) foram definidos a partir de equações de cromaticidade e de distribuição espectral de potência (figura 4). Na codificação desses iluminantes da CIE, os números representam a  $T_{cp}$  em Kelvin, ou seja, os iluminantes D50, D55 e D75 correspondem a 5000K, 5500K e 7500K, respectivamente.

A cromaticidade  $y_D$  da luz do dia D é calculada pela equação 2.

$$y_D = -3,000x_D^2 + 2,870x_D - 0,275 \quad \text{eq. (2)}$$

Na equação 2, o valor  $x_D$  deve ficar entre 0,250 e 0,380 e é calculado pela fórmula baseada na definição da temperatura de cor correlata  $T_{cp}$ , a qual pode variar (equações 3 e 4).

**4.000 <  $T_{cp}$  < 7.000:**

$$x_D = \frac{-4,6070 \times 10^9}{(T_{cp})^3} + \frac{2,9678 \times 10^6}{(T_{cp})^2} + \frac{0,09911 \times 10^3}{(T_{cp})} + 0,244063 \quad \text{eq. (3)}$$

**7.000 <  $T_{cp}$  < 25.000:**

$$x_D = \frac{-2,0064 \times 10^9}{(T_{cp})^3} + \frac{1,9018 \times 10^6}{(T_{cp})^2} + \frac{0,24748 \times 10^3}{(T_{cp})} + 0,237040 \quad \text{eq. (4)}$$

A DEP  $S(\lambda)$  da luz do dia  $D$  é calculada pela equação 5.

$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad \text{eq. (5)}$$

Sabendo-se que,

$S_0(\lambda)$ ,  $S_1(\lambda)$  e  $S_2(\lambda)$  são funções do comprimento de onda  $\lambda$  e se encontram nas tabelas padrões da CIE; enquanto  $M_1$  (equação 6) e  $M_2$  (equação 7) são funções das coordenadas de cromaticidade  $x_D$  e  $y_D$ :

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad \text{eq. (6)}$$

$$M_2 = \frac{0,0300 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad \text{eq. (7)}$$

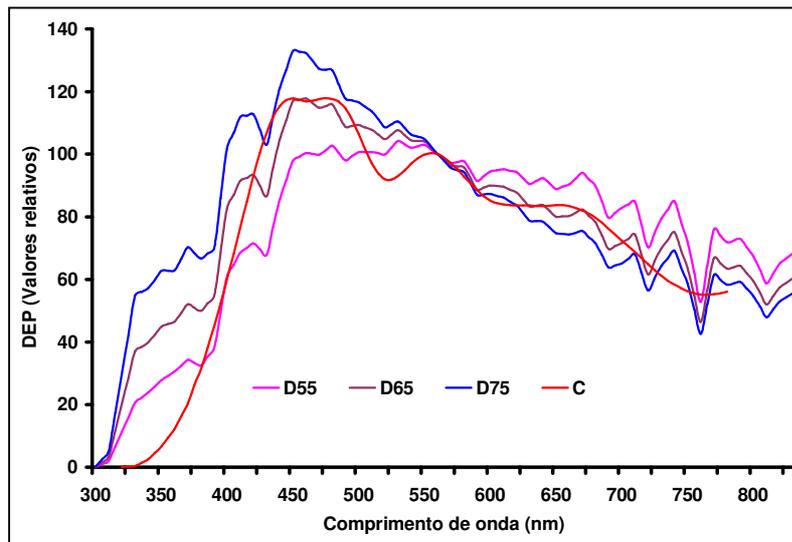


Figura 4. Distribuição espectral dos iluminantes D e C (CIE,1986)

## 2.4. Cálculo dos Valores Triestímulo da CIE

A CIE definiu os valores triestímulo em função da integração da distribuição espectral relativa de potência do iluminante ( $S_\lambda$ ), as funções do observador ( $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$  e  $\bar{z}_\lambda$ ) e a função espectral de radiância do objeto ( $R_\lambda$ ). Como pode ser visto em “Colorimetry” (CIE, 1986), esses valores são obtidos, aproximadamente, pelo somatório do produto da DEP (Distribuição Espectral de Potência), dos valores do observador e dos fatores de refletância com intervalo de medição de 5nm e faixa de comprimento de onda de 380nm a 780nm para objetos. Para fontes de luz os fatores de refletância não são incluídos. As fórmulas para se obter os valores triestímulo estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Determinação dos valores triestímulo de objetos e de fontes de luz

Para objetos	Para fontes de luz
$X = \sum_{\lambda} S n_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda$	$X = \sum_{\lambda} S n_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda$
$Y = \sum_{\lambda} S n_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda$	$Y = \sum_{\lambda} S n_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda$
$Z = \sum_{\lambda} S n_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda$	$Z = \sum_{\lambda} S n_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda$
$S n_{\lambda} = \frac{100 \cdot S_{\lambda}}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda}$	$S n_{\lambda} = \frac{100 \cdot S_{\lambda}}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda}$

Os valores triestímulos XYZ definem um espaço tridimensional (figura 5), o que é difícil de definir em termos visuais.

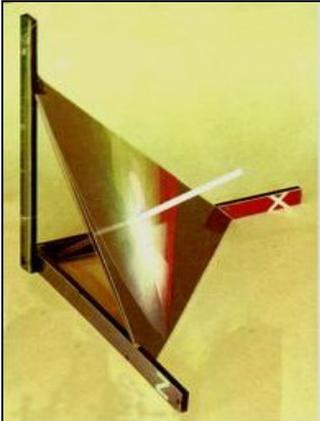
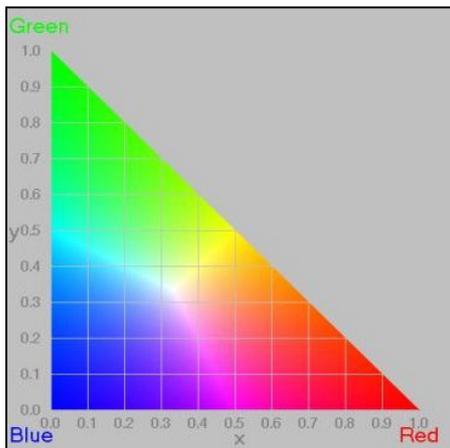


Figura 5. Espaço tridimensional XYZ (Hirschler, 2002)

Em vez de se utilizar um diagrama em forma de triângulo equilátero, a CIE recomenda o diagrama de cromaticidade xy em forma de triângulo retângulo ilustrado pela figura 6, cujos parâmetros x, y e z são obtidos pelo sistema de equações abaixo:



$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \\ x + y + z &= 1 \end{aligned} \right\} \text{eq. (8)}$$

Figura 6. Diagrama xy de cromaticidade (Hirschler, 2002)

## 2.5. Espaços Uniformes de Cor

Como os diagramas de cromaticidade mostram apenas proporções de valores triestímulos (X, Y e Z) e não suas reais magnitudes, eles são aplicados estritamente a cores que têm a mesma luminância. Em geral, as cores diferem entre si tanto em cromaticidade quanto em luminância, e algum método que combine estas variáveis se torna necessário.

Como os valores X, Y e Z definem um espaço psicofísico que não é real, a CIE recomendou o uso de um dos dois espaços de cor alternativos, CIELAB ou CIELUV, que incluem um fator de luminância em um plano de cromaticidade.

### 2.5.1. Espaço CIELAB

No espaço psicométrico CIELAB, as cores são descritas ou por luminosidade ( $L^*$ ), coordenada  $a^*$  (conteúdo de vermelho a verde) e coordenada  $b^*$  (conteúdo de amarelo a azul) ou pelo uso de coordenadas cilíndricas de luminosidade ( $L^*$ ), tonalidade ( $h^\circ$ ) e croma ( $C^*$ ), relacionadas diretamente com as coordenadas Munsell (figura 7).

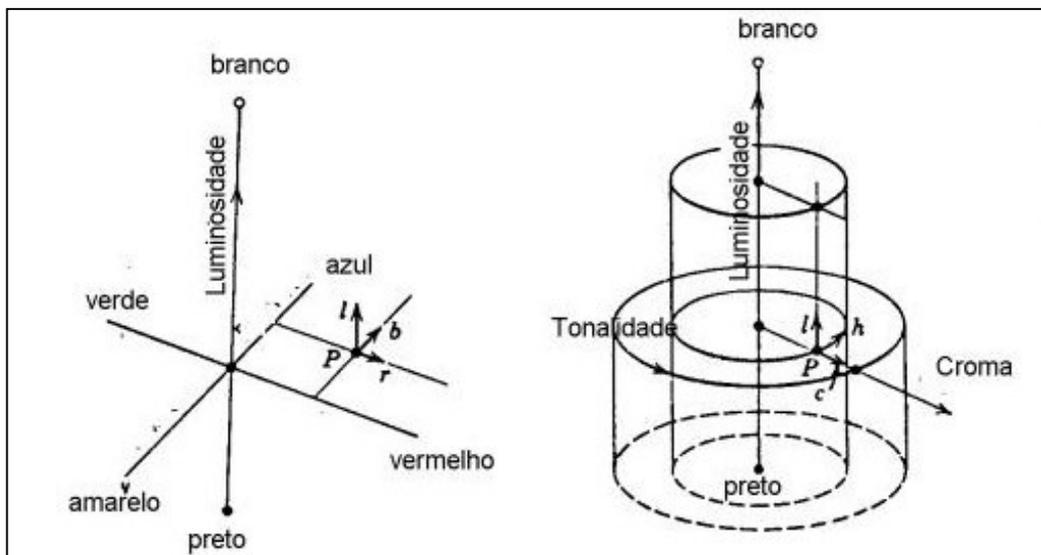


Figura 7. Coordenadas cartesianas do espaço psicométrico CIELAB (Judd e Wyszecki, 1975)

A figura 8 apresenta o significado geométrico destes conjuntos de coordenadas colorimétricas.

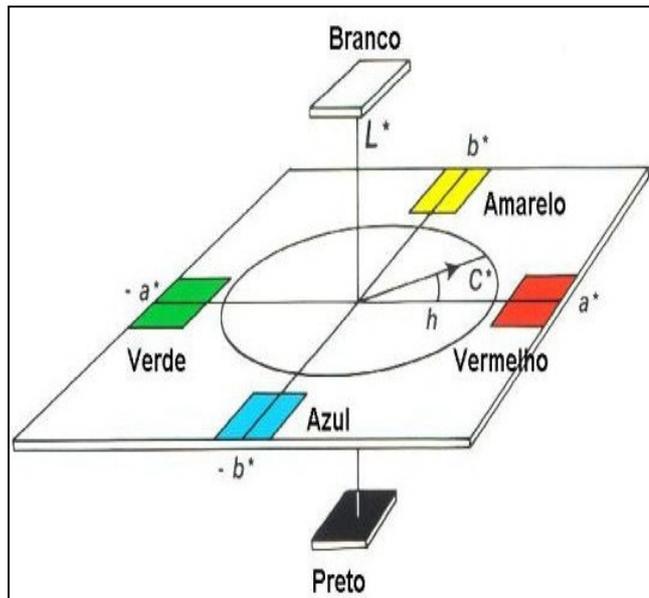


Figura 8. O significado geométrico das coordenadas  $L^*a^*b^*$  e  $L^*C^*h^\circ$  (HunterLab, 1978)

As equações 9, 10, 11, 12 e 13 (CIE, 1986) definem as coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  e  $L^*C^*h^\circ$ . Verifica-se que tais coordenadas foram obtidas a partir dos valores triestímulos, sendo que o valor triestímulo  $Y$  se refere somente a 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 de um observador.

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad (\text{luminosidade métrica}) \quad \text{eq. (9)}$$

$$a^* = 500 [(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \quad (\text{eixo vermelho (+) / verde (-)}) \quad \text{eq. (10)}$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \quad (\text{eixo amarelo (+) / azul (-)}) \quad \text{eq. (11)}$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (\text{croma métrica}) \quad \text{eq. (12)}$$

$$H^\circ = \arctan b^*/a^* \quad (\text{tonalidade métrica}) \quad \text{eq. (13)}$$

para  $X/X_0, Y/Y_0$  e  $Z/Z_0 > 0,008856$

No espaço CIELAB é possível quantificar as diferenças em termos psicométricos de  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  e  $\Delta E^*$  ou  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C^*$ ,  $\Delta H^*$  e  $\Delta E^*$  de acordo com a figura 9. A diferença de cor é denominada pela expressão  $\Delta E^*$ .

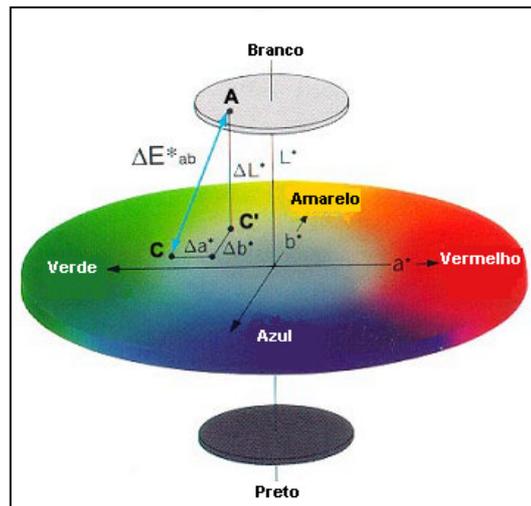


Figura 9. Diagrama de cálculo de  $\Delta E^*$  no diagrama CIELAB (Minolta, 1993)

A diferença de cor entre dois estímulos, por exemplo, padrão e amostra, pode ser quantificada no diagrama  $L^*a^*b^*$  (figura 10) proposto por Berns (2000) cuja distância entre as duas posições é dada pela equação 14.

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad \text{eq. (14)}$$

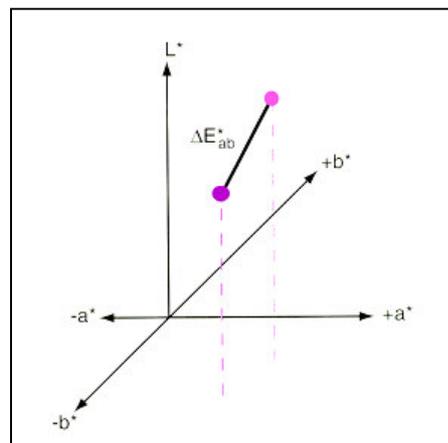


Figura 10. Representação gráfica de dois estímulos no espaço  $L^*a^*b^*$  (Berns, 2000)

As diferenças  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  que fisicamente representam as diferenças entre a amostra analisada e o padrão estabelecido, são calculadas conforme as equações abaixo:

$$\Delta L^* = L^*_{amostra} - L^*_{padr\tilde{a}o} \quad \text{eq. (15)}$$

$$\Delta a^* = a^*_{amostra} - a^*_{padr\tilde{a}o} \quad \text{eq. (16)}$$

$$\Delta b^* = b^*_{amostra} - b^*_{padr\tilde{a}o} \quad \text{eq. (17)}$$

$$\Delta C_{ab}^* = C^*_{ab,amostra} - C^*_{ab,padr\tilde{a}o} \quad \text{eq. (18)}$$

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad \text{eq. (19)}$$

$$\Delta H^*_{ab} = [(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} \quad \text{eq. (20)}$$

### 2.5.2. Espaço CIELUV

Neste espaço de cor, as diferenças entre as coordenadas correspondem aproximadamente as mesmas diferenças de cor perceptíveis. Este é um dos espaços mais uniformes de cor definidos pela CIE em 1976, o qual está apresentado em “Colorimetry” (CIE, 1986). Os valores de  $L^*$ ,  $u^*$ , e  $v^*$  são calculados através das equações 21, 22 e 23.

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{quando } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856 \quad \text{eq. (21)}$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_0) \quad \text{eq. (22)}$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_0) \quad \text{eq. (23)}$$

Nessas equações:

$Y$  = valor triestímulo  $Y$ ;

$u'$ ,  $v'$  = coordenadas de cromaticidade do diagrama UCS – CIE 1976;

$Y_0$ ,  $u'_0$ ,  $v'_0$  = valor triestímulo  $Y$  e coordenadas de cromaticidade do difusor perfeito de refletância.

A diferença de cor no espaço de cor  $L^*u^*v^*$ , o qual indica o grau de diferença de cor mas não a direção, é definida pela equação 24.

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad \text{eq. (24)}$$

### 2.5.3. Diagrama UCS (Uniform Chromaticity Scale) CIE 1976

O diagrama UCS foi definido pela CIE em 1976, o qual está apresentado em “Colorimetry” (CIE, 1986). Ele foi projetado para fornecer um diagrama perceptivelmente mais uniforme do que o diagrama  $xy$  da CIE 1931 (figura 11). Onde as coordenadas  $u'$  e  $v'$  são calculadas através das equações 25 e 26.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad \text{eq. (25)}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad \text{eq. (26)}$$

Em algumas aplicações o diagrama de cromaticidade da CIE 1960 ( $u, v$ ) é usado, e as suas coordenadas podem ser calculadas pelas coordenadas  $u'$  e  $v'$ :

$$v = \frac{2}{3} v', \quad u = u'. \quad \text{eq. (27)}$$

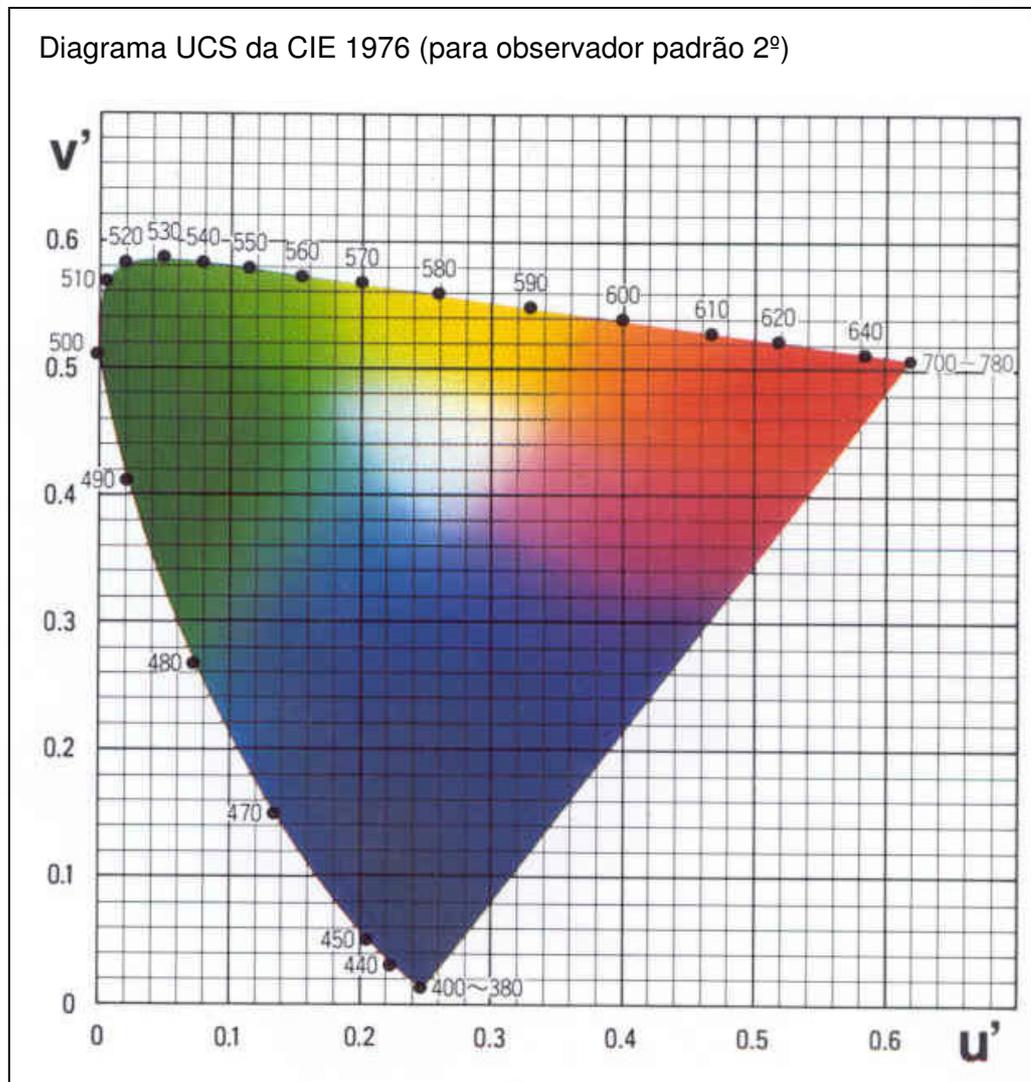


Figura 11. Diagrama do espaço uniforme de cor (UCS) da CIE 1976 (Minolta, 1993)