

2 Fundamentos da colorimetria

Em todas as áreas das ciências e da engenharia, a medição assume papel relevante já que da sua confiabilidade dependem os processos de manufatura e está presente em praticamente todas as transações do inter-relacionamento humano. No comércio, produtos são comprados e vendidos essencialmente baseados em medições de massa e de volume. Se não houvesse sistemas padronizados de massa, comprimento e tempo, certamente a vida moderna seria bastante difícil. Na presente pesquisa de mestrado relacionada à estamperia digital têxtil, tornam-se não menos importantes os processos de medição e padronização da cor, indispensáveis para a avaliação da conformidade e da qualidade do tecido a ser produzido.

Com o acelerado avanço tecnológico do setor têxtil, o controle da cor assume papel de extrema relevância sendo importantíssimo para o sucesso neste exigente mercado. Em alguns casos, como na indústria alimentícia, a cor é utilizada para uniformizar a aparência do produto. Já nas embalagens, uma escolha adequada das cores pode resultar em elemento de grande atratividade e promoção do produto. Pode também desestimular o consumo quando, pela não uniformidade de cor nas embalagens posicionadas na prateleira, o cliente infere que a qualidade do conteúdo não atende às expectativas.

A cor de um objeto depende de uma série de fatores, dentre os quais a iluminação, tamanho da amostra, textura, cores no entorno que podem contaminar a cor da amostra. Por ser um fenômeno subjetivo, a sensação de cor depende também do observador.

Por definição, Colorimetria é a técnica, e a ciência, que busca com o auxílio de modelos matemáticos, descrever, quantificar e simular a percepção da cor pelo homem. É a interação da luz com os materiais que, como sensação, é percebida pelo olho e interpretada pelo cérebro.

Essa percepção da cor pode ser dividida nos níveis físico, psicofísico, psicométrico e visual.

2.1. A cor ao nível físico

No nível físico, a cor é definida pela distribuição espectral da radiação emitida, refletida ou transmitida. Verifica-se a composição da luz por comprimentos de onda, seu efeito na cor do objeto e de que forma o objeto modifica a luz que incide sobre ele. Essas modificações são representadas por meio de curvas de transmitância ou de refletância espectral. Explica também a mistura subtrativa de cores.

2.1.1. Composição da luz

A luz é uma forma de energia constituída por ondas eletromagnéticas irradiadas de sua origem a uma velocidade de aproximadamente 300000 km/s, no vácuo. O comprimento de onda de uma radiação eletromagnética, distância entre dois pontos homólogos de ondas adjacentes, pode ter medidas que variam de angstroms (10^{-10} m) a quilômetros (10^3 m).

De uma forma geral o olho humano percebe comprimentos de onda compreendidos entre 380 nm e 760 nm (figura 1). Para expressar a medida dos comprimentos de onda visíveis utilizamos normalmente a unidade nanômetro ($1\text{nm} = 10^{-9}$ m).

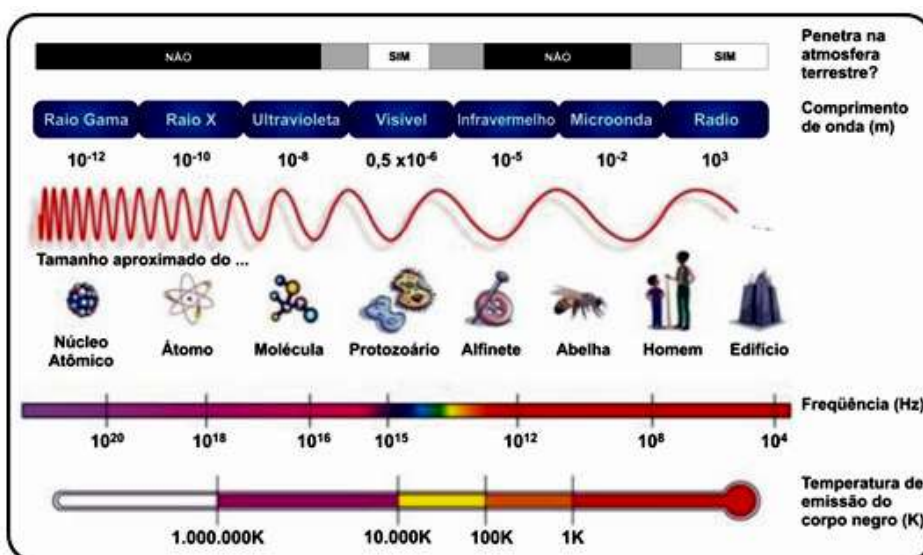


Figura 1.: O espectro eletromagnético.

A luz do sol é composta por radiações de diferentes comprimentos de onda, cada um correspondendo a uma cor particular. Pela decomposição da luz (branca) em um prisma, experimento realizado por Isaac Newton em 1676, é possível observar a projeção de uma série de diferentes cores (figura 2).

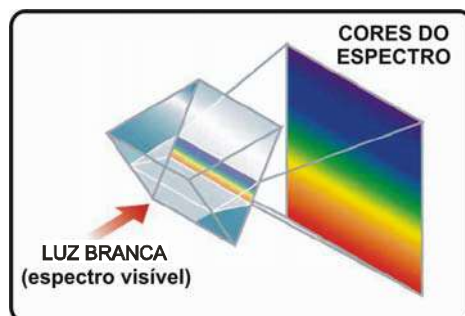


Figura 2. :A decomposição da luz branca, surgindo o espectro visível

Pela dispersão da luz policromática no prisma surge o *espectro*, seqüência de radiações *monocromáticas*, com comprimento de onda de 380 a 760 nm.

Observa-se na figura 3 que a luz branca (a) possui todas as cores monocromáticas. O espectro da luz azul (b) contém os raios do primeiro terço do espectro, já o espectro da luz verde (c) contém os raios do segundo terço do espectro. O espectro da luz vermelha (d) mostra os raios do terceiro terço do espectro, enquanto a luz azul ciano (e) possui as cores monocromáticas do primeiro mais a do segundo terço do espectro. A luz amarela (f) possui as cores monocromáticas do segundo mais a do terceiro terço do espectro e finalmente a luz magenta (g) apresenta as cores monocromáticas do primeiro mais a do terceiro terço do espectro.

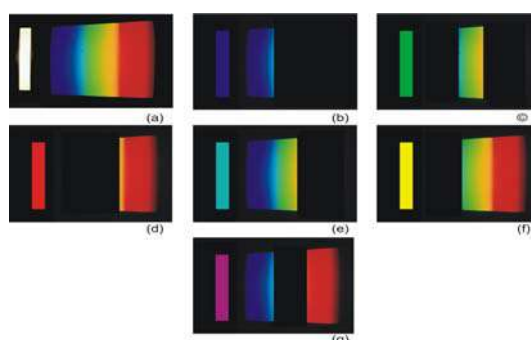


Figura 3.: A decomposição do espectro. (a) luz branca, (b) luz azul, (c) luz verde, (d) luz vermelha, (e) luz ciano, (f) luz amarela e (g) luz magenta

O termo “fonte de luz” é usado em colorimetria para identificar a fonte física da luz, ou seja, algo pode ser ligado e desligado. Já a distribuição espectral de potência

radiante (Spectral Power Distribution - SPD) é a expressão numérica da potência relativa que esta fonte emite em cada comprimento de onda.

A figura 4 mostra a curva de distribuição espectral de potência radiante, que representa a luz emitida por uma fonte luminosa ou de um iluminante, em cada comprimento de onda.

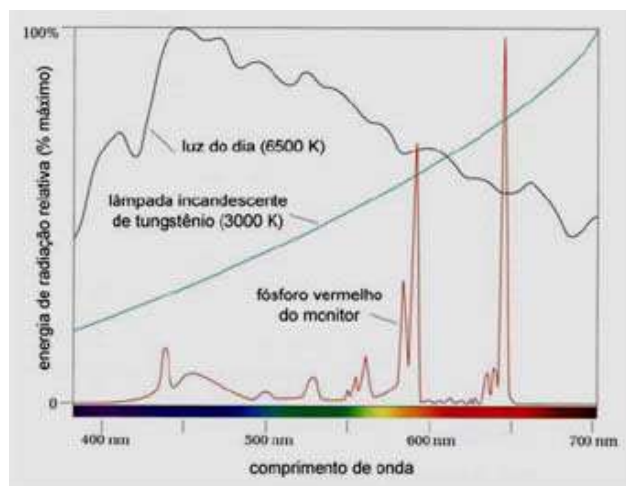


Figura 4.: Distribuição espectral (SPD) de alguns iluminantes

O termo “iluminante” é adotado no estudo de modelos teóricos. A SPD de um iluminante pode ser criada mesmo que não exista uma fonte real com essa distribuição espectral.

As Fontes de luz e os iluminantes podem ser caracterizados por sua distribuição espectral e por sua temperatura de cor.

O corpo negro ou radiador de Planck é um corpo ideal que absorve toda energia e a emite na forma de radiação. A temperatura Kelvin está diretamente relacionada com a cor da energia emitida, como mostra a figura 5.

Quando o corpo negro apresenta pouco aquecimento, gera radiações visíveis de baixas energias, logo com grandes comprimentos de onda, o que corresponde a faixas da região do vermelho. A 2000 K obtém-se um vermelho forte, chamado de “vermelho quente”. Nas temperaturas entre 3000 K e 4000 K, a cor da luz muda do vermelho forte para laranja e então para o amarelo. O filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente opera entre 2850 K e 3100 K, resultando em uma luz amarelada. Entre 5000 K e 7000 K, a luz emitida pelos corpos negros é representada na forma relativamente horizontal no espectro visível, produzindo um branco neutro. Nas altas temperaturas, acima de 9000 K, predomina a emissão de energia de comprimentos de onda curtos, produzindo uma luz mais azulada.

Com base neste sistema é possível descrever a cor da luz, em função de sua temperatura *Kelvin*, alaranjada, amarelada, neutra ou azulada.

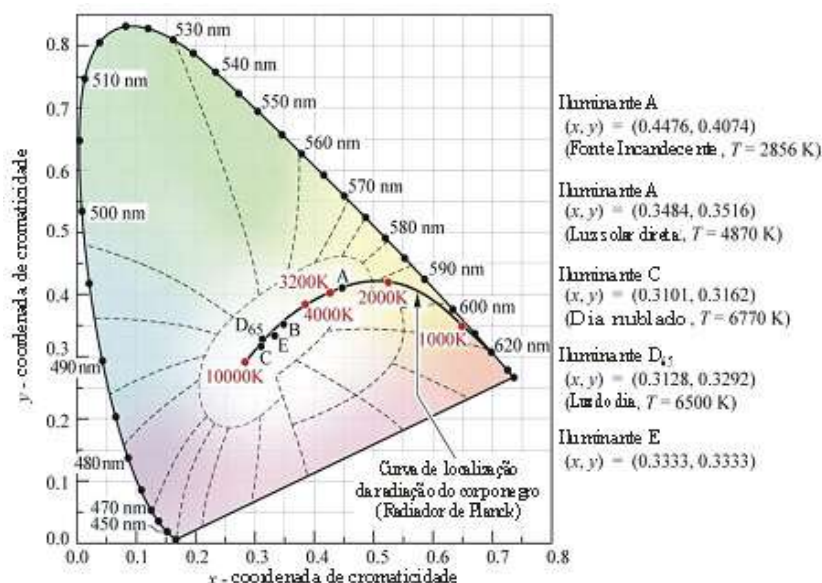


Figura 5.: Localização do radiador de Planck no plano de cromaticidade

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE - *Comission Internationale de l'Eclairage*) padronizou todos os termos relativos à iluminação e possui um comitê técnico para estudar o sistema visual e as cores, tornando-se uma diretriz para o estudo da colorimetria.

O modelo de cor CIE foi desenvolvido para ser completamente independente de qualquer dispositivo ou outro meio de emissão e reprodução. Está baseado na percepção das cores pelo sistema visual humano. Os elementos-chave do modelo CIE são as definições de iluminantes padrões e especificações para o observador padrão.

A CIE padronizou diversos SPD de iluminantes e recomenda seu uso nas avaliações colorimétricas.

Os principais iluminantes padrão CIE são o Iluminante A e o D65. Existem vários outros iluminantes secundários, como TL84 e CWF.

O iluminante A, apresentado na figura 6, é um caso específico, onde sua radiação é bem próxima da SPD de um corpo negro, e por isso pode ser descrita pelas equações e leis da física fundamental (Schanda,2007), pela lei de Planck, com uma temperatura de cor de 2856K.

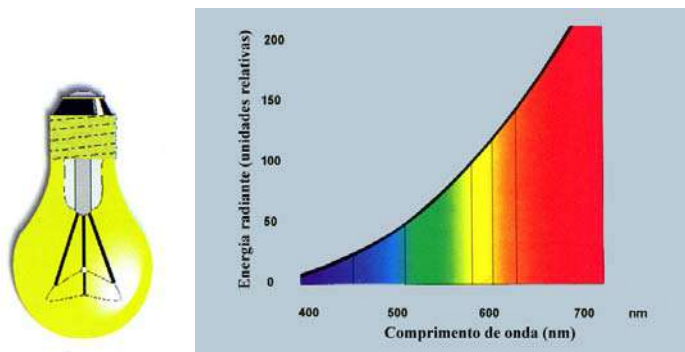


Figura 6.: Distribuição espectral de um iluminante A, lâmpada de Tungstênio de 100W

O sol é provavelmente a mais importante de todas as fontes de luz que o sistema visual humano conhece. A distribuição dos comprimentos de onda da luz do sol, que aparecem na figura 7, se modifica de acordo com a época do ano, a hora do dia, condições atmosféricas e posição geográfica.

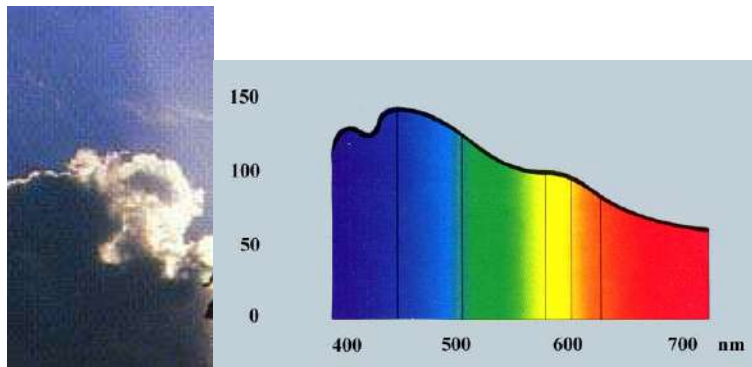


Figura 7.: Distribuição espectral da luz natural

A CIE divide os iluminantes por grupos com características semelhantes. O grupo D, por exemplo, é constituído por uma série de iluminantes, que representam a luz do dia de várias formas.

Os mais adotados são o D50 e o D65, cuja distribuição espectral é mostrada na figura 8. Esses iluminantes possuem temperaturas correlatas de cor (CCT – Correlated Color Temperature) de 5003 K e 6504 K, respectivamente.

No Diagrama de Cromaticidade, a temperatura correlata de cor pode ser definida como a temperatura de um ponto na curva de um radiador de Planck, de cuja coordenada de cor do iluminante encontra-se mais próxima.

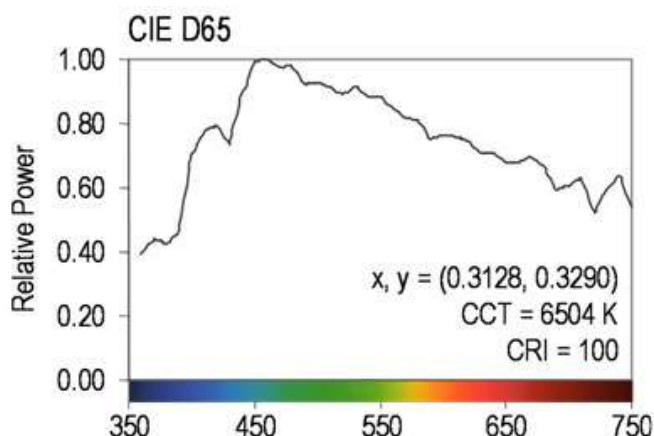


Figura 8.: Distribuição espectral do iluminante D65

No domínio da colorimetria, os raios infravermelhos —situados acima de 700 nm— não interferem no processo de formação da cor, enquanto que as radiações ultravioletas —abaixo de 400 nm— são aquelas que diretamente interferem nesse processo. Determinados aditivos na superfície do objeto (e.g.: alvejantes ópticos) absorvem as radiações UV e reemitem essas radiações em comprimentos de onda visíveis. Este fenômeno denomina-se fluorescência e encontra-se representado esquematicamente na figura 9.

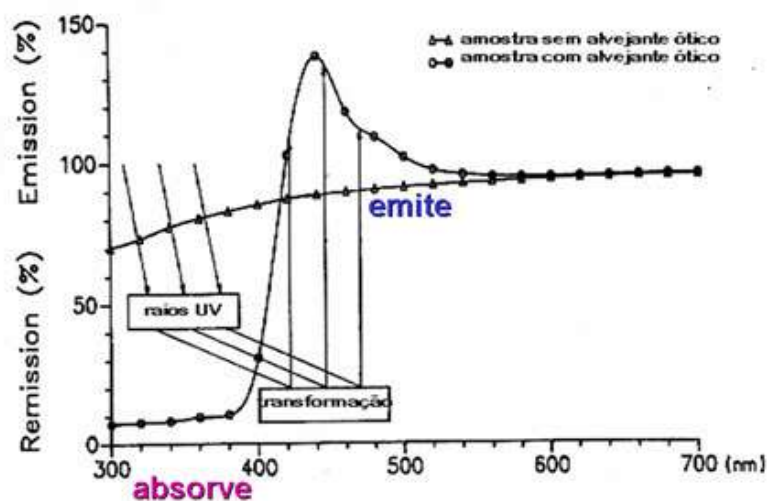


Figura 9.: Representação esquemática da re-emissão de UV na faixa visível (o fenômeno da fluorescência)

Os três fatores fundamentais na formação das cores são: a fonte de luz (radiação), o objeto e o observador (sensação).

Para avaliação visual de cor são empregadas cabines de luz padrão, que possuem diferentes fontes luminosas. Observa-se, na figura 10 que, conforme muda a

distribuição espectral da fonte, muda em consequência, a composição da luz refletida pelo objeto colorido.



Figura 10.: Uma mesma amostra exposta a diferentes fontes de luz

numa mesma cabine de luz padrão

Materiais transparentes absorvem e transmitem parcialmente a luz que sobre eles incidem. Materiais opacos parcialmente a absorvem e refletem. A figura 11 ilustra três formas distintas segundo as quais um corpo material pode modificar a luz que sobre ele incide: (i) absorção (fenômeno pelo qual um feixe de radiação transfere sua energia, parcial ou totalmente, para o meio material que atravessa); (ii) transmitância (fração desta energia que é transmitida pelo sistema) e (iii) refletância (fração da luz incidente que não foi absorvida ou transmitida, mas que foi refletida pelo sistema).



Figura 11.: Formas como um material pode modificar a luz

Já a figura 12 ilustra a forma segundo a qual parcela da luz incidente é refletida na forma especular. Isto é, os raios incidentes formam com a normal do plano de reflexão o mesmo ângulo entre os raios incidentes e os raios refletidos. Esse conjunto de feixes paralelos refletido especularmente causa a sensação que é denominada de brilho. A reflexão difusa (espalhada) produz, no observador, uma sensação que tecnicamente recebe o nome de cor.



Figura 12.: Reflexão difusa e especular em uma superfície opaca

O fenômeno da transmitância pode ocorrer de forma regular e com absorção não seletiva. A figura 13. mostra que parte da luz transmitida atravessa o objeto sem sofrer modificação enquanto outra parte é absorvida pelo meio.

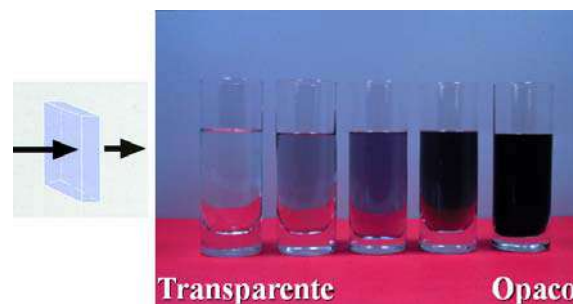


Figura 13.: Transmitância regular e absorção não-seletiva. Fonte: experimentos realizados nos laboratórios do SENAI-Cetiqt.

Quando a luz passa pelo meio sofrendo dispersão diz-se que o meio está transmitido difusamente (figura 14 obtida pelo uso de líquido com concentrações crescentes de partículas sólidas em suspensão). Nos objetos translúcidos, parte da luz incidente é refletida.

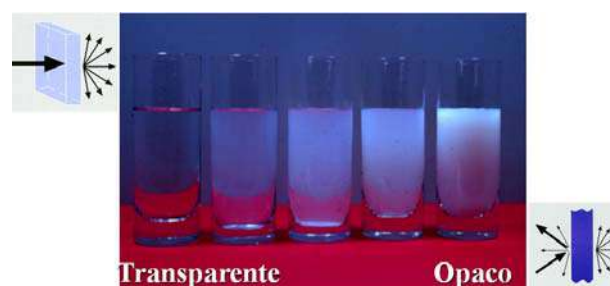


Figura 14.: Transmitância difusa não-seletiva, sem absorção. Fonte: experimentos realizados nos laboratórios do SENAI-Cetiqt.

Quando a luz (monocromática ou heterogênea) incide sobre um meio homogêneo, uma parcela da luz incidente é refletida, outra é absorvida pelo meio e o restante transmitido.

Se a intensidade da radiação da luz incidente for representada por I_o , a luz absorvida por I_a , a transmitida por I_t e a refletida por I_r , então:

$$I_o = I_a + I_t + I_r \quad (2-1)$$

Parte da luz incidente é refletida (I_r) na interface ar-cubeta. Cubeta é a célula onde são colocadas as soluções a serem analisadas (mensurando). Fazendo uso de uma cubeta de comparação (vazia) elimina-se o termo I_r na equação acima. O detector irá comparar o sinal da cubeta que contém o mensurando ($I_o - I_a - I_r$) com o sinal que passou pela cubeta vazia ($I_o - I_r$). Assim, a expressão acima se simplifica para:

$$I_o = I_a + I_t \quad (2-2)$$

Entre as primeiras investigações sobre a relação existente entre as intensidades de radiação incidente e a transmitida destacam-se as experiências de Pierre Bouguer (1729) e de Johann Heinrich Lambert (1760). Estes dois cientistas efetuaram observações independentes e verificaram que as propriedades associadas ao processo de absorção de luz podem ser enunciadas em termos de duas leis fundamentais, que ainda hoje são utilizadas:

a intensidade de luz (monocromática) transmitida por um corpo homogêneo é proporcional à intensidade de luz incidente. Isto é: $I_t = k I_o$.

a intensidade de luz (monocromática) transmitida decresce exponencialmente com o aumento da espessura da camada do corpo homogêneo.

Desta forma, dependendo da transmitância/absorbância do meio e do comprimento de onda, após percorrer certa distância no meio, toda ou parte desta luz será absorvida. Pode-se, assim, obter uma transmitância regular com absorção seletiva, conforme mostrado na figura 15. Ao ser intercalado um filtro transparente e colorido (azul) entre a fonte e o objeto, parte da luz sofrerá absorção seletiva e outra parte atravessará o meio sem sofrer modificação. No exemplo caracterizado são mostradas as fontes de luz branca, vermelha, amarela, verde e azul. Cada filtro deixa passar a luz da sua própria cor e parte de sua cor presente na luz branca (e.g.: o filtro azul deixa passar a luz azul e o componente azul presente na luz branca).

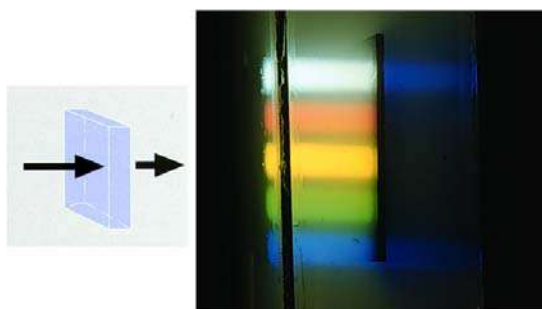


Figura 15.: Transmitância regular e absorção seletiva com filtro azul. Fonte: experimentos realizados nos laboratórios do SENAI-Cetiqt.

A figura 16 representa o mesmo fenômeno de transmitância regular com absorção seletiva para o filtro vermelho intercalado; i.e.: deixa passar a parte vermelha da luz branca, a luz vermelha e o componente vermelho da luz amarela já que esta resulta da mistura das luzes verde e vermelha.

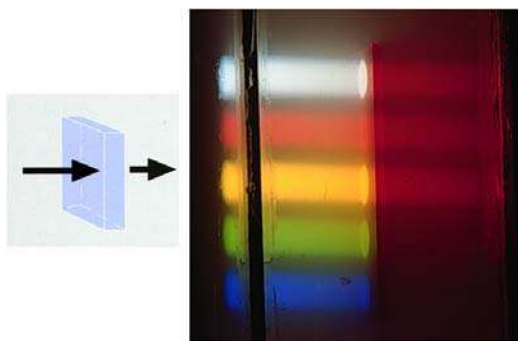


Figura 16.: Transmitância regular e absorção seletiva com filtro vermelho. Fonte: experimentos realizados nos laboratórios do SENAI-Cetiqt.

Seguindo a mesma lógica as figuras 17 e 18 ilustram a transmitância regular com absorção seletiva para o caso dos filtros verde e amarelo, respectivamente.

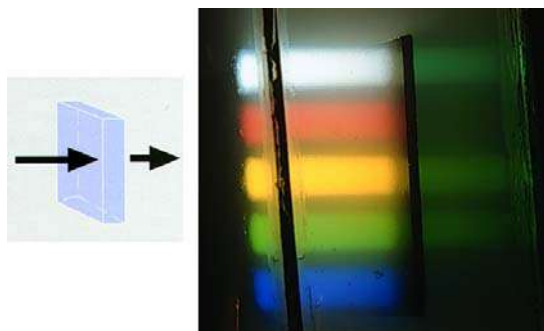


Figura 17.: Transmitância regular e absorção seletiva com filtro verde. Fonte: experimentos realizados nos laboratórios do SENAI-Cetiqt.

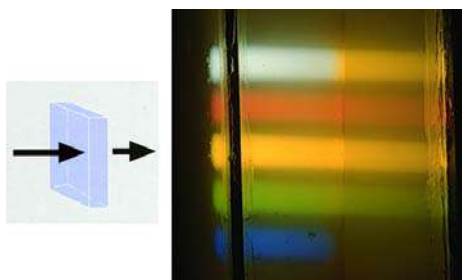


Figura 18.: Transmitância regular e absorção seletiva com filtro amarelo. Fonte: experimentos realizados nos laboratórios do SENAI-Cetiqt.

2.1.2. Curvas de distribuições de refletância espectrais

A curva de distribuição de refletância espectral (curva de refletância) mostra o quanto de energia está sendo refletida pela superfície de um objeto por comprimento de onda do espectro visível (figura 19). O eixo das ordenadas X indica os valores dos comprimentos de onda e o eixo das abcissas Y a quantidade de energia, tomando-se como parâmetro a refletância de 100% em cada comprimento de onda de um corpo branco ideal.

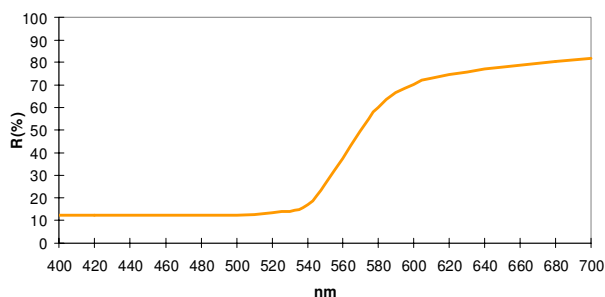


Figura 19.: Exemplo de curva de refletância de um substrato colorido

Teoricamente, a curva de refletância de um objeto de cor branca (ideal) apresenta 100% de refletância em todos os comprimentos de onda. Contudo, na prática (caso real), um objeto com a melhor cor branca possível mostra um valor próximo de 100% de refletância na faixa de comprimentos de onda visível (figura 20).

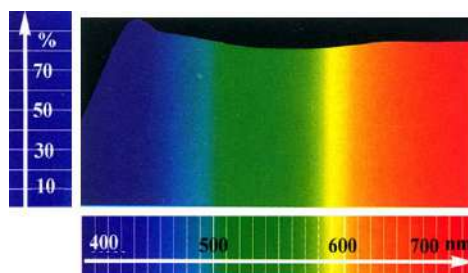


Figura 20.: Curva de refletância de um objeto branco REAL

A curva de refletância de um objeto de cor preta (ideal) apresentaria 0% de refletância em todos os comprimentos de onda. Contudo, na prática (caso real), um objeto com a melhor cor preta possível mostra um valores de refletância próximo de 0%, na faixa de comprimentos de onda visível (figura 21).

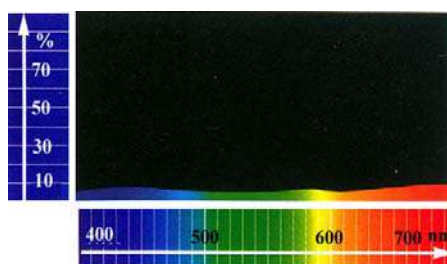


Figura 21.: Curva de refletância de um objeto preto REAL

O corpo de cor cinza ideal seria aquele com 50% de refletância em todos os comprimentos de ondas, ou qualquer outro valor uniforme, mostrado na figura 22.

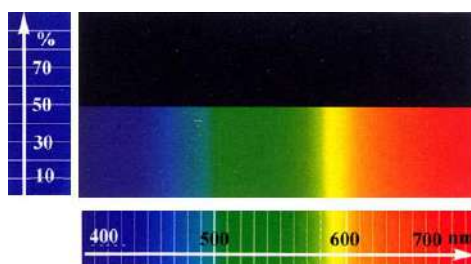


Figura 22.: Curva de refletância de um objeto cinza IDEAL

As curvas de refletância dependem da iluminação, por isso é necessário especificar sob qual iluminante essas curvas foram obtidas.

Quando um dado objeto está submetido a diferentes fontes de luz percebe-se mudança em sua cor. Este fenômeno é conhecido como Metameria.

O Metamerismo, apresentado (figura 23), ocorre quando um par de objetos (par metamérico) apresenta a mesma cor sob uma determinada fonte de luz (ou iluminante) e cores diferente quando visualizado sob outra fonte de luz (ou iluminante).

Isto ocorre porque essas cores foram produzidas com corante(s) ou pigmento(s) quimicamente diferentes.

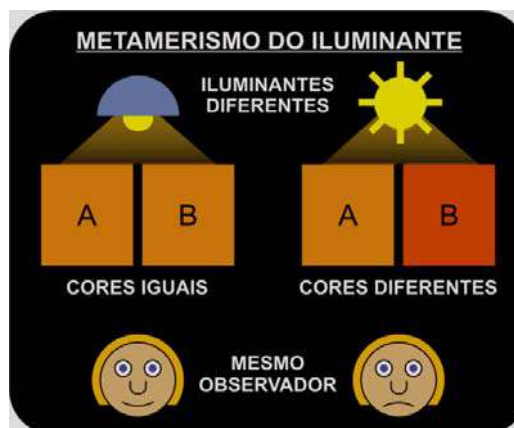


Figura 23.: Metamerismos de Iluminação

O Metamerismo pode ocorrer também quando um observador vê um par de objetos com a mesma cor e outro observador os vê com cores diferentes, ambos sob a mesma fonte de luz.

2.1.3

Mistura subtrativa de cores

As cores primárias do sistema aditivo, formadas por luzes são vermelho (R=red), o verde (G=green) e o azul (B=blue). Este é, por exemplo, o padrão utilizado nos monitores. Já o sistema subtrativo refere-se ao sistema para cores impressas, onde são utilizadas as cores, azul ciano (C=Cian), magenta (M=Magenta), amarelo (Y=Yellow) e mais o preto (K=black).

As cores primárias do sistema subtrativo são as secundárias do sistema aditivo, como pode ser visto na figura 24.

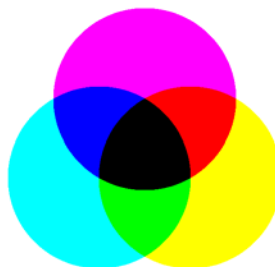


Figura 24.: Cores primárias subtrativas nas bordas (ciano, magenta e amarelo) e primárias aditivas nas intercessões (vermelho, verde e azul)

Seria mais correto pensar em “-B” para o amarelo, “-G” para o magenta e “-R” para o ciano. Isto porque no sistema subtrativo se subtrai essas cores do branco (luz policromática).

$$\text{BRANCO} - B = (R + G + B) - B = R + G = \text{Amarelo}$$

$$\text{BRANCO} - G = (R + G + B) - G = R + B = \text{Magenta}$$

$$\text{BRANCO} - R = (R + G + B) - R = G + B = \text{Ciano}$$

Da subtração da cor azul do branco (com filtro ou pigmento) resulta o amarelo (R+G). Quando se retira da cor branca (com filtro ou pigmento) o vermelho resulta o ciano (G+B). Quando se utilizam os dois filtros, figura 25, obtem-se:

$$\text{da filtragem do azul: BRANCO} - B = (R + G + B) - B = R + G = Y$$

$$\text{da filtragem do vermelho: } (R + G + B) - R = G + B = \text{Ciano}$$

$$\text{da filtragem do azul: BRANCO} - B = (R + G + B) - B = R + G = Y$$

$$\text{da filtragem do vermelho: } Y - R = (R + G) - R = G$$

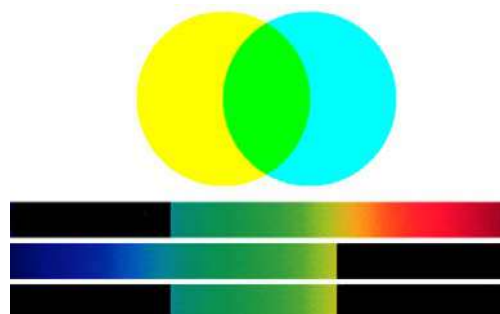


Figura 25.: Representação do sistema subtrativo obtida quando os espectro azul e vermelho são filtrados

A mistura de cores no sistema subtrativo pode também ser explicada por suas respectivas curvas de refletância. O resultado acima pode ser obtido pela sobreposição das curvas de refletância do amarelo e ciano. Desta forma é obtida a curva de refletância correspondente à cor verde, vista na figura 26. Esta propriedade é utilizada pelo software do espectrofotômetro para o cálculo de receita de cores, utilizando um banco de cores previamente instalado.

A curva da cor amarela remove boa parte do azul; a curva do ciano retira o amarelo e vermelho, restando a curva de refletância do verde.

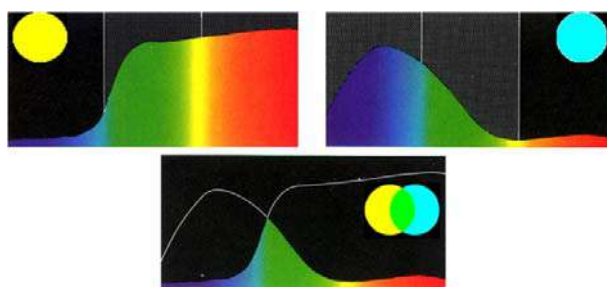


Figura 26.: Curvas de refletância do amarelo, do ciano e do verde

De semelhante modo, ao subtrair do branco a cor azul (com filtro ou pigmento) resulta no amarelo, retirando do branco a cor verde (com filtro ou pigmento) resulta no magenta e subtraindo ambas resulta no vermelho (figura 27) assim:

$$\text{Só filtrando o azul: BRANCO} - B = (R + G + B) - B = R + G = Y$$

$$\text{Só filtrando o verde: } (R + G + B) - G = R + B = \text{Magenta}$$

Simultâneo:

$$\text{Filtrando o azul: BRANCO} - B = (R + G + B) - B = R + G = Y$$

$$\text{Filtrando o verde: } Y - G = R + G - G = R$$

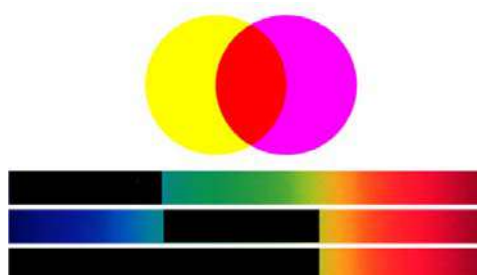


Figura 27.: Representação do sistema subtrativo filtrando o espectro azul e o verde

Também a sobreposição das curvas de refletância do amarelo com a curva do magenta resulta na curva de refletância correspondente à cor vermelha, mostrado na figura 28.



Figura 28.: Curvas de refletância do amarelo e do magenta

A curva de refletância da cor amarela subtrai boa parte do azul e a curva magenta remove o verde, resultando na curva de refletância do vermelho (figura 29).



Figura 29.: curva de refletância do vermelho

Ao subtrair do branco a cor vermelha (com filtro ou pigmento) resulta no ciano, retirando do branco a cor verde (com filtro ou pigmento) resulta no magenta e subtraindo ambas resulta no azul, assim:

Só filtrando o vermelho: BRANCO – R = (R + G + B) – R = G + B = C

Só filtrando o verde: (R + G + B) – G = R + B = Magenta

Simultâneo:

Filtrando o azul: BRANCO – B = (R + G + B) – B = R + G = C

Filtrando o verde: C – G = G + B – G = B

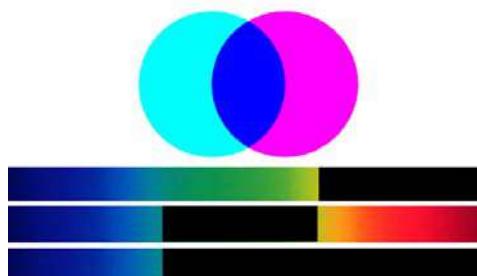


Figura 30.: Representação do sistema subtrativo filtrando o vermelho e o verde

A sobreposição das curvas de refletância do ciano com a curva do magenta resulta na refletância correspondente a cor azul, representada na figura 30.

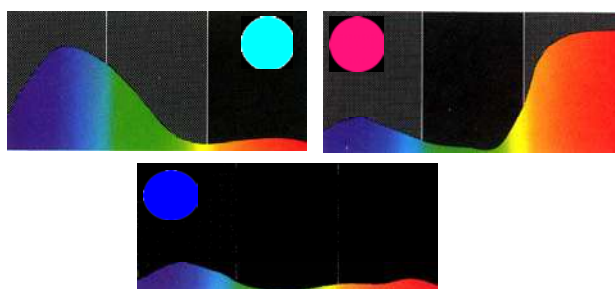


Figura 31.: Curvas de refletância do amarelo, do magenta e do vermelho

Todo o processo de impressão, doméstico e industrial, tem por base o sistema subtrativo (CMY) acrescido da cor preta. Esta cor poderia ser formado pela sobreposição de três camadas com 100%, das cores ciano, magenta e amarelo. Resultaria no triplo de consumo (custo), excesso de depósito de tinta na superfície do

material além de uma cor não totalmente preta (camurça). Isto ocorre porque as tintas CMY, hoje produzidas, não são cores primárias perfeitas.

Uma tinta ciano ideal teria que absorver totalmente o vermelho e refletir todo azul e todo o verde, como mostra a figura 32 (a). Este fato não ocorre, devido ao estágio tecnológico da indústria de corantes e pigmento. Atualmente, parte do espectro do azul e do verde é absorvido além de parte do vermelho ser refletido, apresentado na figura 32 (b).

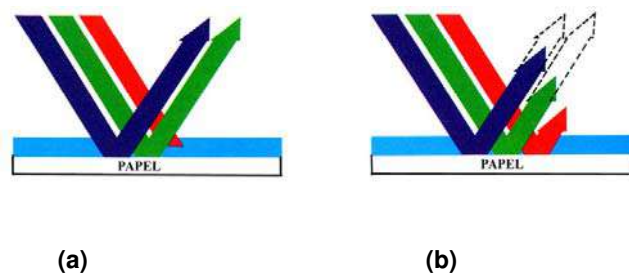


Figura 32.: Reflexão em um pigmento ideal (a) e no pigmento real (b)

2.2. A cor ao nível psicofísico

O nível psicofísico estuda as relações entre a mente e os fenômenos físicos da cor e de que forma o olho humano percebe os processos aditivos de cores e as misturas partitivas.

2.2.1. O Sistema visual humano e a percepção de cor

A base do sistema visual humano é composta por uma rede de sensores especializados existentes nos olhos.

A retina é a parte do olho sensível à luz e sua superfície é composta por fotorreceptores e terminações nervosas. Existem dois tipos de fotorreceptores, ou seja, células sensíveis à luz, chamados de cones e bastonetes, os quais podem ser vistos esquematicamente na figura 33.

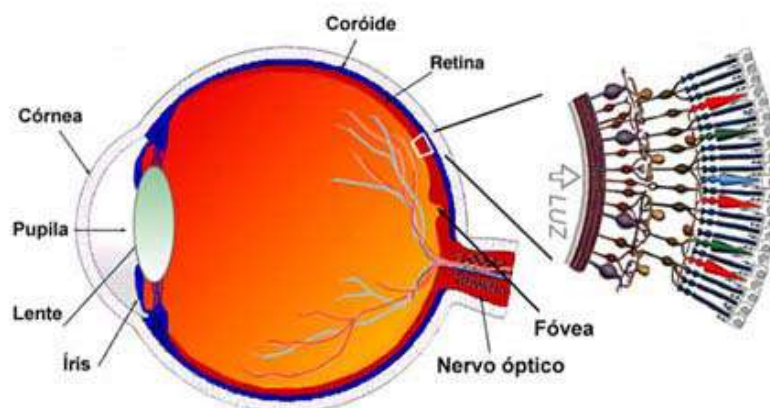


Figura 33.: Representação do olho humano, mostrando os cones e bastonetes.

Os cones são sensíveis a diferentes comprimentos de onda e responsáveis pela transmissão do sinal elétrico para o cérebro.

Este complexo sistema utiliza o método mais eficiente para o processamento de grande quantidade de comprimentos de onda. Ele divide o espectro visível dentro das regiões mais dominantes, o vermelho (cone L), verde (cone M) e azul (cone S), onde se concentram as informações da cor, conforme ilustrado na figura 34.

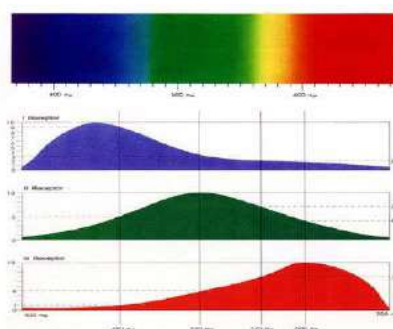


Figura 34.: Distribuição do nível de sensibilidade dos três tipos de cones da retina

Os três tipos de cones interconectados na retina enviam sinais de cores oponentes para o cérebro, isto é, vermelho-verde, azul-amarelo e preto-branco (figura 35 a). Os sinais de cores oponentes, nível psicométrico, chegam ao cérebro que os interpretam como sensação, nível perceptual (figura 35 b).

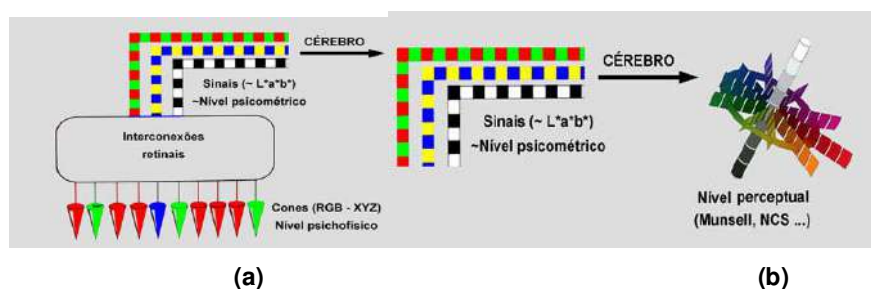


Figura 35.: a e b: Esquema de envio de sinais ao cérebro

Existem algumas anomalias na visão de cor causadas pela deficiência nos cones, como mostrado na figura 36. O Daltonismo ocorre de três formas diferentes. A Protanopia quando o problema ocorre no cone L (long = grandes comprimentos de onda) e o indivíduo apresenta deficiência vermelho/verde. Deuteranopia que ocorrer no cone M (middle= médios comprimentos de onda), produzindo deficiência vermelho/verde e por último a Tritanopia como deficiência no cone S (short = pequenos comprimentos de onda).



Figura 36.: A visão normal e as formas de daltonismo

2.2.2. O observador padrão

A CIE possui duas especificações para o observador padrão, a primeira desenvolvida em 1931 e outra revisada em 1964. Em ambas, o observador padrão é composto por um pequeno grupo de cerca de 20 indivíduos com o sistema visual normal.

A diferença significativa entre os observadores padrões de 1931 e 1964 é a área do campo de visão. O observador de 1931 utilizou um ângulo sub-tenso de 2° (dois

graus) de campo de visão. Mais tarde foi considerado inadequado por não ser suficiente para atingir a visão periférica do observador, atingindo apenas a fóvea.

A especificação de 1964 aumentou o campo de visão do observador para 10° (dez graus), possibilitando que uma área maior da retina fosse alcançada e como consequência melhor acuidade visual.

A experimentação ao tri-estímulo foi realizada com o observador visualizando duas cores, separadas horizontalmente. Na metade superior a cor era produzida por uma fonte de luz de cor conhecida e na outra metade horizontal a cor era “criada” pelo ajuste da potência de três fontes luminosas de cores primárias aditivas, sobrepostas. Esses ajustes eram feitos até que não existisse diferença visual entre a cor em cada lado, conforme mostra a figura 37.

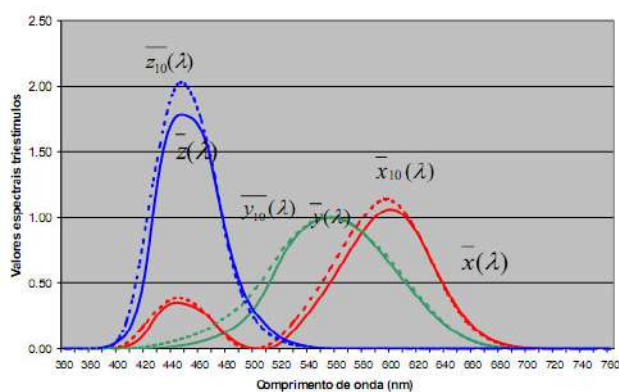


Figura 37.: Experimentação do triestímulo

Após vários experimentos e observações a CIE determinou os valores espectrais triestímulos do observador, que são mostrados na figura 38.

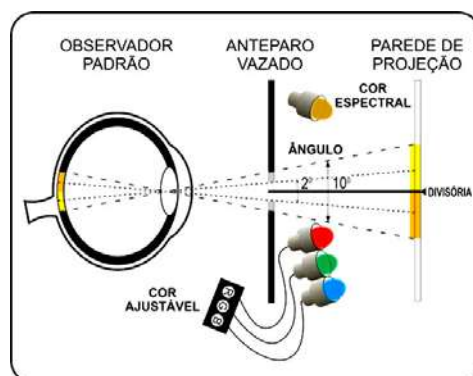


Figura 38.: Curvas dos valores triestímulo para observadores de 2° e 10°

2.2.3. Mistura aditiva de cores

É a combinação de luzes coloridas e o resultado de suas misturas aditivas. São estímulos que ao atingirem as células especializadas do olho possibilitam a percepção visual humana.

O Diagrama de Cromaticidade do sistema CIE (Commission Internationale de l'Eclairage), ilustrado na figura 39, mostra os limites de todas as cores visíveis que representam as combinações de cores monocromáticas do espectro.

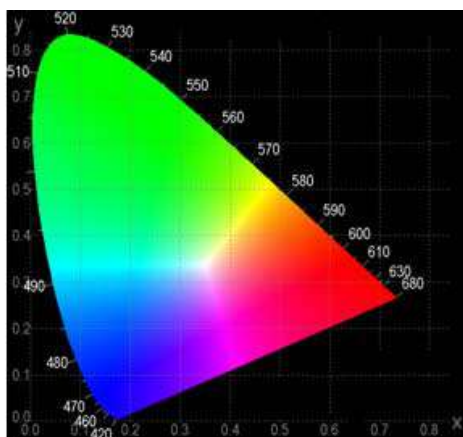


Figura 39.: Diagrama de Cromaticidade da CIE. (Schandra, 2007)

A medição das cores pelo sistema CIE é baseada na possibilidade de matizar qualquer cor com uma combinação de três cores primárias.

A mistura aditiva, representada na figura 40, tem como cores primárias o vermelho (R), o verde (G) e o azul (B). A soma dessas cores primárias resulta no branco, sendo o preto a ausência total de luz.

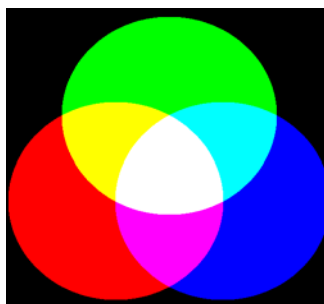


Figura 40.: Representação do sistema aditivo de cores

Quando há sobreposição de duas dessas cores a nova cor tem nível de cromaticidade (tonalidade e croma) correspondente à média das duas cores originais e luminosidade igual à soma das duas.

A combinação de luzes verde com azul resulta em azul ciano, figura 41 (a). A combinação de luzes vermelha com azul resulta em magenta, figura 41 (b) e a combinação da luz vermelha com a luz verde resulta no amarelo, visto na figura 41 (c).

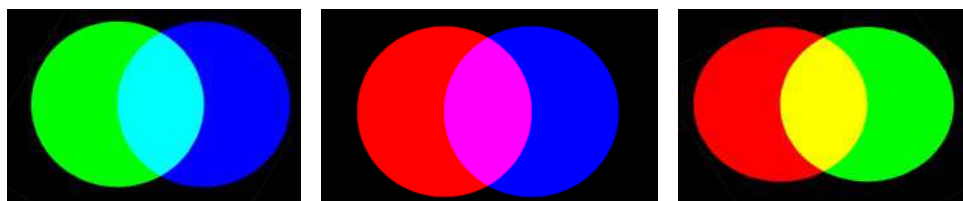


Figura 41.: Combinação de luzes verde/azul (a), vermelho/azul (b) e vermelho/verde (c)

Pela sobreposição da luz vermelha com a verde resulta luz amarela. A cromaticidade é a média das duas cores e sua luminosidade é a soma das luminosidades individuais.

No Diagrama de Cromaticidade CIE, figura 41, mostra uma reta com extremidades em determinada luz verde e em uma luz vermelha, que representa todas as possíveis combinações dessas duas cores. Qualquer nova cor sobre essa reta teria como nível de luminosidade a soma das luminosidades das cores dos extremos.

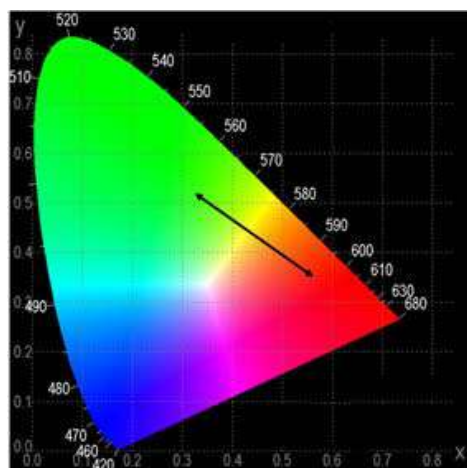


Figura 42.: Reta de mesma luminosidade no Diagrama de Cromaticidade CIE

2.2.4. Mistura partitivas de cores

As misturas partitivas são classificadas em seqüenciais e pontilismo.

Mistura seqüencial é aquela obtida quando o disco de Maxwell com duas cores (figura 43-a) é colocada em movimento (figura 43-b) e o observador percebe apenas uma cor. As coordenadas da cor de uma mistura partitiva (seqüencial ou pontilismo) estão localizadas, no Diagrama de Cromaticidade, sobre a reta que une as duas cores originais.

Na mistura aditiva (luzes) de cores a luminosidade final é igual a soma da luminosidade das cores originais. Já na mistura partitiva (cores refletidas) a luminosidade da cor resultante corresponda à média da luminosidade de cada cor original.

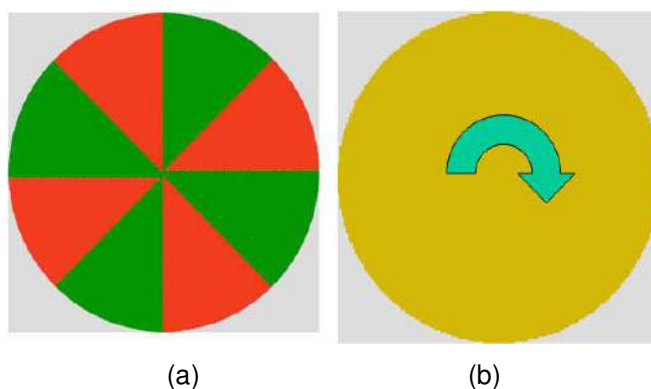


Figura 43.: Disco de Maxwell estático (a) e em movimento (b)

O pontilismo caracteriza-se por áreas pequenas e de cores diferentes que se misturam na retina, dando a sensação de uma única cor. Neste caso a cor não depende de movimento mas do tamanho do ponto e da distância que se encontra do observador. Pode ser comparado a retículas de quadricromia (CMYK) de uma foto nítida quando observada com uma lente potente mostra pontos coloridos (retícula) e não mais uma “imagem”.

Ao se misturar cada vez mais intimamente fibras de cores diferentes (figura 44) chega-se ao ponto de perceber apenas uma cor, o que caracteriza o pontilismo

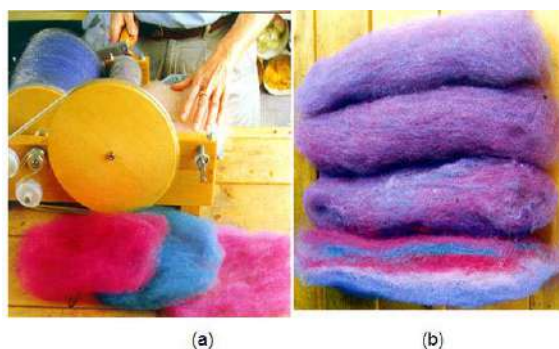


Figura 44.: Fibras antes da mistura (a) e após mistura íntima (b)

2.3. A cor ao nível psicométrico

Nesse nível o espaço visual é representado por valores numéricos, baseados em medições instrumentais. Surgem os sistemas tridimensionais de representação que traduzem por números as cores dos objetos, como é o caso das coordenadas L^* , a^* , b^* , do sistema CIELAB.

A questão principal que se coloca é como relacionar resultados obtidos visualmente com resultados instrumentais.

2.3.1. O experimento de MacAdam

Em 1940, MacAdam construiu um aparelho óptico com campo visual bipartido para avaliar 25 cores padrões. Em um dos lados colocava essas amostras coloridas sob iluminação padronizada e na outra metade buscava ajustar por meio de filtros a cor da luz projetada, tentando igualar a tonalidade em ambos os lados. As medições colorimétricas ao final foram plotadas no diagrama, bidimensional, x,y de cromaticidade, formando elipses, como visto na figura 45, que apresentam cores visualmente idênticas no entorno do padrão.

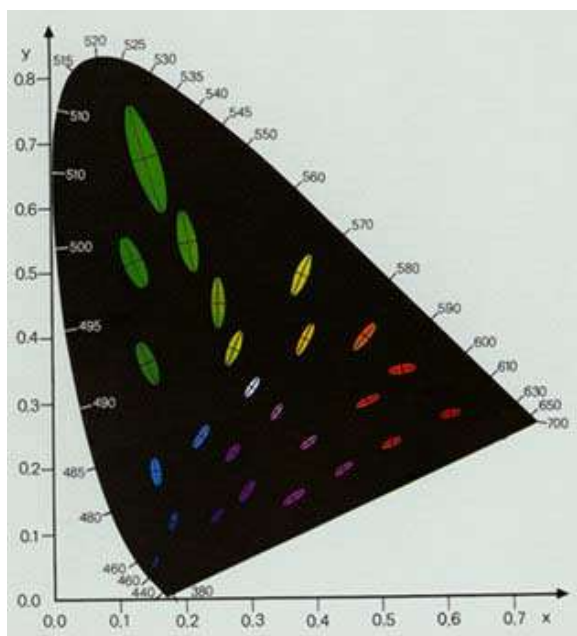


Figura 45.: Elipses de MacAdam mostrando a variação de cromaticidade

Posteriormente, junto com WRJ Brown, foi introduzida uma terceira dimensão, a Luminosidade, que formavam elipsóides, figura 46. Em 1960 a CIE aprovou o diagrama que passou a ser denominado CIE-UCS. A CIE, Juntamente com outros colaboradores, definiu as equações para o cálculo de diferença de cor entre dois pontos, no espaço tridimensional.

$$u = 4x / (-2x + 12y + 3) \quad \text{e} \quad v = 6y / (-2x + 12y + 3) \quad (2-3)$$

em que x e y são as coordenadas colorimétricas do objeto.

As coordenadas do espaço de cor são descritas como:

$$U^* = 13 W^* (u - u_0), \quad V^* = 13 W^* (v - v_0) \quad \text{e} \quad W^* = 25 Y^{1/3} - 17 \quad (2-4)$$

Em que u_0 e v_0 são valores da fonte luminosa e Y o valor triestímulo da luminosidade do objeto.

E a diferença de cor é dada por:

$$\Delta E_{CIEUVW} = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2} \quad (2-5)$$

O asterisco na variável indica que ela representa o espaço de cor mais homogêneo. Os termos $(u - u_0)$ e $(v - v_0)$ indicam a medida da saturação da cor que, ao ser multiplicada pela variável de luminosidade W^* , produz as variáveis de croma da cor U^* e V^* .

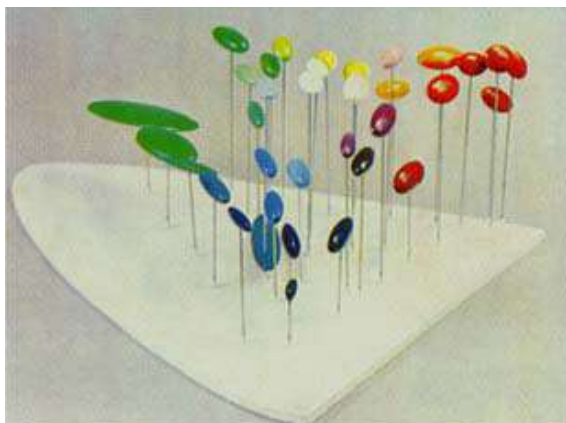


Figura 46.: Elipsóides de MacAdam-Brown no espaço xyY

2.3.2. O espaço colorimétrico CIELAB

Em 1931 a CIE determina os valores triestímulos do observador padrão, que em composição com a distribuição espectral (SPD) do iluminante e com a curva de refletância do objeto, permitiria transformar esse estímulo em um valor numérico.

Determinavam-se assim os valores triestímulos X , Y e Z do sistema CIE de colorimetria, por meio das seguintes equações:

$$X = k \sum S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta_{\lambda} \quad (2-6)$$

$$Y = k \sum S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta_{\lambda} \quad (2-7)$$

$$Z = k \sum S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta_{\lambda} \quad (2-8)$$

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta_{\lambda}} \quad (2-9)$$

Sendo S_{λ} a SPD do iluminante padrão, R_{λ} o fator de refletância do objeto, as funções triestímulos espectrais do observador padrão, Δ_{λ} o intervalo de comprimento de onda medido, k o fator de normalização para fazer $Y=100$, branco ideal, válido para qualquer combinação de iluminante/observador. Finalmente X, Y e Z , que são os valores triestímulos buscados.

Para o cálculo das coordenadas de cromaticidade (x, y e z), utilizam-se as equações abaixo.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2-10)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2-11)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2-12)$$

Nas equações acima, pode ser visto que $x+y+z=1$ para qualquer cor. São suficientes apenas duas coordenadas de cromaticidade, para se construir um gráfico bidimensional, como da figura 47. Também X e Z podem ser facilmente calculados a partir de x, y e Y .

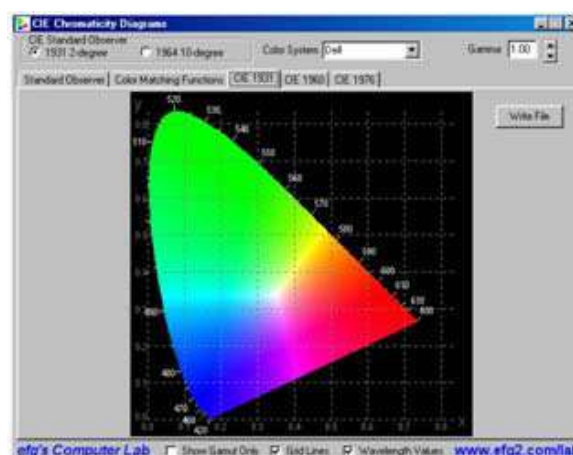


Figura 47.: Diagrama de cromaticidade.

Neste espaço, distâncias iguais não correspondem a diferenças iguais de cores, o que torna esse diagrama visualmente não uniforme. Se este espaço fosse uniforme as linhas de tonalidade constante seriam retas radiais e as cores de croma constante formariam círculos concêntricos. Para superar essas dificuldades foi criado o espaço CIELAB, mostrado na figura 48.

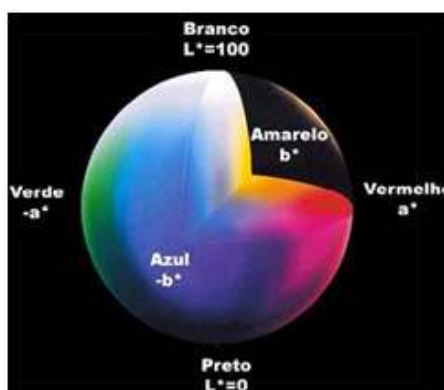


Figura 48.: O espaço CIELAB

O espaço CIELAB é composto por três eixos. O vertical, que representa a luminosidade variando do nível zero (preto) ao 100 (branco). O eixo a varia de +a (vermelho) até o -a (verde), e o eixo b indo de +b (amarelo) ao -b (azul).

Em função dos valores triestímulos a CIE determinou as novas coordenadas LAB que definiram o espaço CIELAB, conforme abaixo.

$$L^* = 116[f(Y/Y_n) - 16/116] \quad (2-13)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (2-14)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (2-15)$$

sendo

$$f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3} \text{ para } X/X_n > 0,008856 \quad (2-16)$$

ou $7,787(X/X_n) + 16/116$, caso contrário

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3} \text{ para } Y/Y_n > 0,008856 \quad (2-17)$$

ou $7,787(Y/Y_n) + 16/116$, caso contrário

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3} \text{ para } Z/Z_n > 0,008856 \quad (2-18)$$

ou $7,787(Z/Z_n) + 16/116$, caso contrário

Desta forma pode ser quantificada a distância nesse espaço, entre as coordenadas do padrão e de amostra,

$$\Delta L^* = L^*_{amostra} - L^*_{padrão} \quad (2-19)$$

$$\Delta a^* = a^*_{amostra} - a^*_{padrão} \quad (2-20)$$

$$\Delta b^* = b^*_{amostra} - b^*_{padrão} \quad (2-21)$$

E assim determinada ΔE^*_{ap} , distância nesse espaço entre um padrão e uma amostra, pela equação:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2-22)$$

2.4. A cor ao nível perceptual

No nível visual ou perceptual as cores são representadas por sistemas de ordenações que se caracterizam em termos de tonalidade, luminosidade e croma, como no sistema Munsell. Outras formas tridimensionais semelhantes são encontradas no sistema NCS (Natural Color System) e no sistema Ostwald.

2.4.1. O sistema Munsell

O mais influente sistema de ordenação de cor – Sistema Munsell - foi criado pelo artista americano *Albert Henry Munsell* figura 49. Ele desenvolveu uma maneira racional para descrever a cor prevendo uma notação que pudesse ser usada internacionalmente, identificável visualmente por qualquer pessoa e com uma linguagem para descrevê-la e comunicá-la.

A publicação da sua primeira edição ocorreu em 1905, intitulada “*A Color Notation*”. Munsell foi o primeiro a modelar um sistema utilizando um sistema numérico (alfanumérico) para classificar a cor.

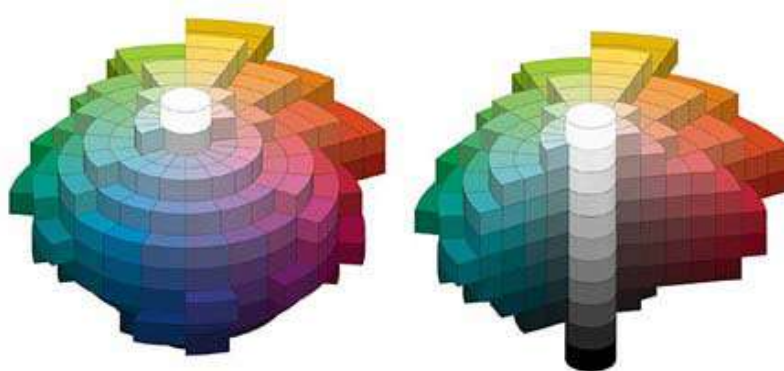


Figura 49.: Representação tridimensional do Sistema Munsell

Ao redor do círculo estão as diferentes cores, ou seja, as tonalidades, mostradas na figura 50.

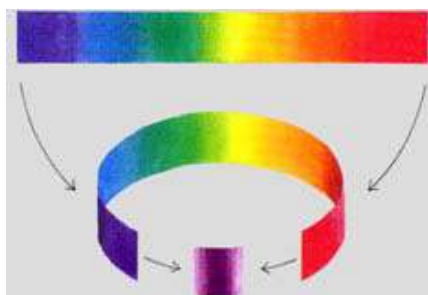


Figura 50.: Representação do círculo de tonalidade

No eixo central vertical encontram-se os níveis de cinzas, tendo com extremos o preto (abaixo) e o branco (parte superior) visto na figura 51. Na medida em que se afasta do eixo central (no sentido do raio) o valor do cinza é gradativamente

modificado, ganhando croma até atingir uma cor totalmente saturada. *Munsell* denominou estas características como *Hue* (tonalidade), *Value* (luminosidade) e *Chroma* (croma), respectivamente.

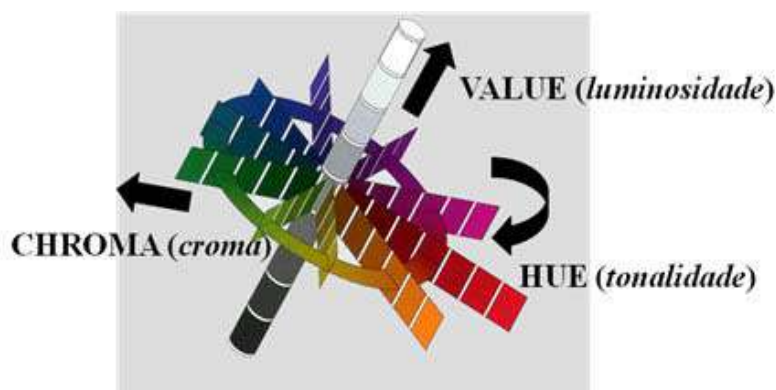


Figura 51.: Sistema Munsell de ordenação de cores

O círculo de tonalidades de Munsell (que aparece na figura 52) foi o primeiro sistema de ordenação de cores numérico (alfanumérico) e contava com cinco cores principais: o amarelo, o vermelho, o púrpura, o azul e o verde. As cores complementares (aquelas cuja combinação produz um tom de cinza neutro) ficam em posições diametralmente opostas.

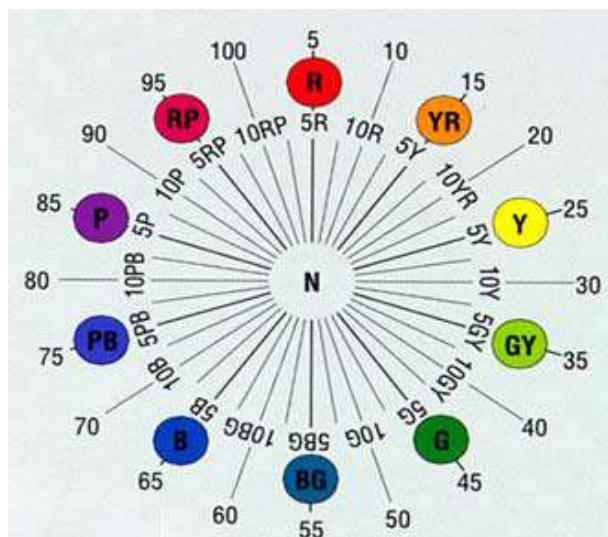


Figura 52.: Representação do círculo de tonalidade de Munsell

Nas páginas do livro Munsell apresentada na figura 53, todas as cores têm mesma tonalidade (H=hue), sendo que cada coluna apresenta luminosidade (V=value) crescente, de baixo para cima, e Croma (C=chroma) constante. Nas linhas horizontais

o Cromo é crescente do cinza para as cores mais puras; na folha de Munsell, cada linha possui o mesmo nível de luminosidade.

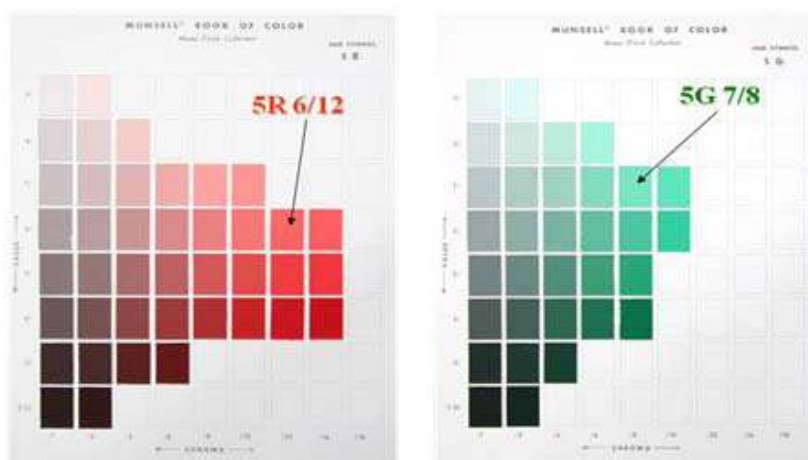


Figura 53.: Folhas do livro de cores de Munsell (Munsell Book of Colors)

As amostras do Livro de Cores Munsell possuem uma estrutura lógica em conformidade com a percepção visual em termos de diferenças. Sua notação não está ligada ou limitada por amostras existentes permitindo a interpolação e extrapolação de novas cores. São produzidos de forma a apresentarem diferenças mínimas de cores entre edições, garantindo assim sua reprodutibilidade.

2.4.2. Outros sistemas

Foram criados diversos sistemas para representar ordenadamente as cores. Ostwald e o NCS (Natural color Sistem) e outros, utilizam como característica o conceito da mistura de pigmento de cor pura com o Branco (tint), com cinza (tone) e com preto (shade) como na figura 54.

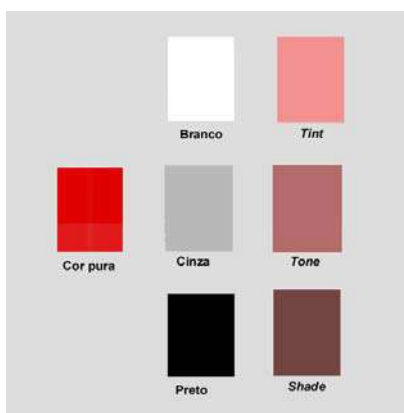


Figura 54.: Conceito do sistema Ostwald e NCS

No sistema NCS, representado na figura 55, o círculo perceptual é formado pelas tonalidades principais, amarelo-azul e verde-vermelho.

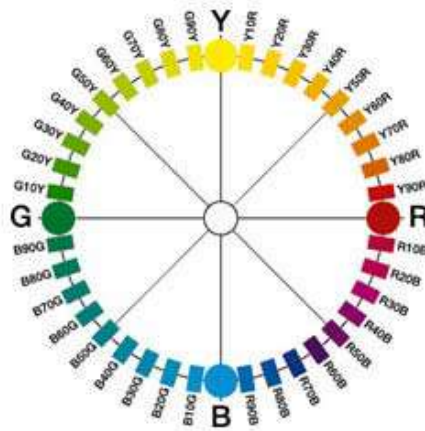


Figura 55.: Representação do círculo de tonalidade NCS

Neste sistema, cores situadas em posição opostas não são necessariamente complementares. Na figura 56 pode-se observar a apresentação tridimensional das cores do sistema NCS.

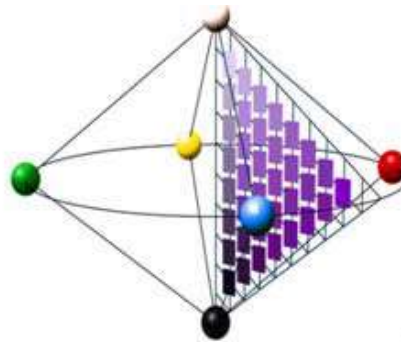


Figura 56.: Representação tridimensional das cores do sistema NCS

Vários artistas famosos como Goethe (figura 57a) e Chevreul (figura 57b) criaram seus próprios círculos de tonalidade, que variavam de 6 até 100 ou mais cores.

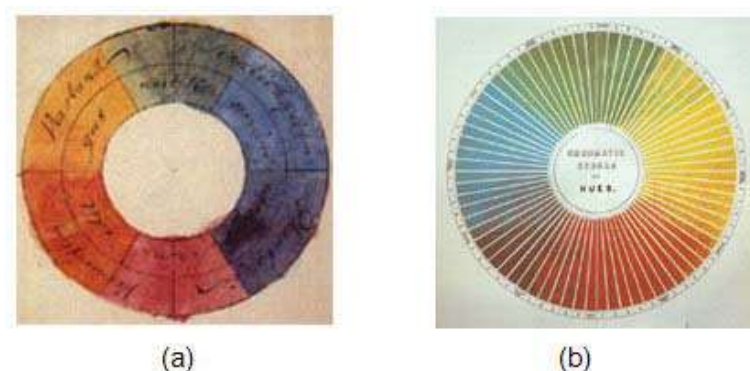


Figura 57.: Círculo de tonalidades de Goethe (a) e de Chevreul (b)

Normalmente círculos de tonalidades usam 12 cores, caso dos círculos de Itten (figura 58 a), Feisner (figura 58 b) e Birren. O de Munsell e o NCS contam com até 40 cores.

As três cores “primárias” do círculo de Itten, são o amarelo, o vermelho e o azul. Não é um círculo de misturas subtrativas, nem um círculo perceptual. As cores “complementares” não ficam em posições opostas no círculo.



Figura 58.: Círculo cromático de Itten (a) e de Feisner (b)

Existem vários círculos de tonalidade que não estão baseados em qualquer princípio lógico de cor. Eles mostram apenas combinação de cores voltadas para aquarela, para a web (figura 59) e também para jardinagem (figura 60).

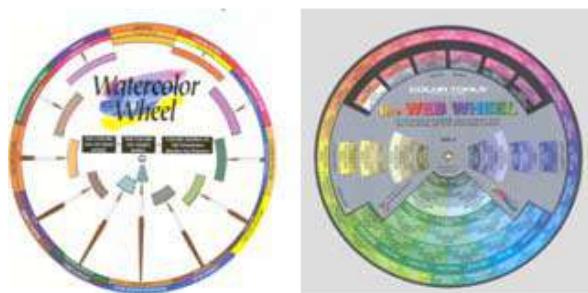


Figura 59.: Círculo cromático para aquarela e trabalhos na web, respectivamente



Figura 60.: Círculo de tonalidade para organizar cores do jardim.

2.5. Métodos de avaliação por colorimetria

Em todas as áreas das ciências e da engenharia a medição tem um importante papel. No comércio, produtos são comprados e vendidos por massa ou volume. Se não houvessem sistemas padronizados de massa certamente ocorreriam muitas reclamações. Em outra medida, também os consumidores têm direito à uniformidade de cor dos produtos adquiridos. Isto gerou a necessidade do controle e classificação da cor com atribuição de valores numéricos, que a identificasse universalmente. A colorimetria evoluiu e hoje dispõe de espectrofotômetros calibrados, rastreáveis a padrões primários, que fornecem precisamente a posição de uma cor no espaço colorimétrico tridimensional.

2.5.1. Métodos Visuais

É indiscutível a eficiência e qualidade das medições instrumentais de cor, sejam elas executadas em colorímetros, ou melhor, em espectrofotômetros. No entanto o observador humano não pode ser totalmente substituído no controle de reprodução de cores e na avaliação final de imagens complexas, ou nos limites de aceitabilidade ou quando se comparam cores em amostras de materiais com texturas diferentes.

O ideal seria avaliar a cor nas condições em que o cliente, ou designer, compara e aprova cada cor, em cada ciclo de produção, o que não é viável. Então é necessário que as condições de observação sejam claramente definidas entre as partes e sejam utilizadas condições padronizadas baseadas em norma internacionais.

A norma mais difundida mundialmente é a ASTM D 1729-96 publicada em 1960 que estabelece os critérios para a construção e utilização de cabines, tais como:

a iluminação, a cor interna de paredes e fundo, a preparação de amostras, a seleção do observador, formato de relatório etc. A norma estabelece ainda que a qualidade de iluminação deve seguir a orientação CIE 51.2-1999.

2.5.2. Métodos Instrumentais

O colorímetro e o espectrofotômetro são dois tipos de instrumentos utilizados para a avaliação colorimétrica.

O Colorímetro separa as componentes RGB da luz, funcionando de forma análoga ao sistema visual humano. Utiliza filtros que simulam a resposta dos cones do olho gerando resultados numéricos em um dos modelos padronizados de cores CIE. Na figura 61, é apresentado o espaço de cor CIEXYZ como referência, e convertidos para as coordenadas $L^* a^* b^*$, sendo $L^* = 51.18$, $a^* = +48.88$ e $b^* = +29.53$.

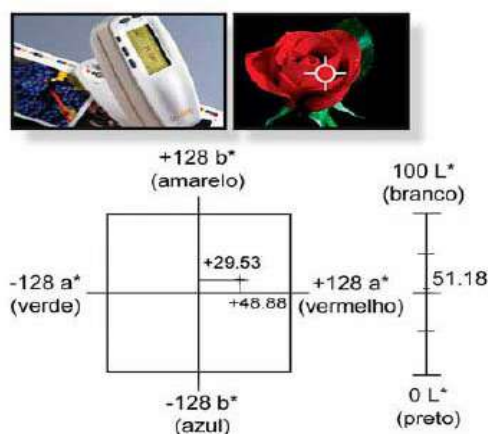


Figura 61.: Colorímetro e os valores CIE $L^*a^*b^*$

A maior parte dos modelos de colorímetros permite algumas opções de valores de leitura de cores, sendo geralmente em CIEXYZ ou em CIELAB, e a determinação do valor ΔE , entre um padrão e uma amostra.

Esses equipamentos geralmente são limitados na especificação da *Iluminação Padrão e Observador padrão*. Alguns colorímetros possibilitam diferenciar os iluminantes, com opções de D50 e D65. A grande deficiência do colorímetro é a incapacidade de detectar metamerismo.

O espectrofotômetro de refletância tem por finalidade fornecer a curva de distribuição de refletância de amostra, em cada comprimento de onda da faixa de medição do instrumento. O seu princípio de funcionamento, mostrado esquematicamente na figura 62, é composto por um feixe de luz policromático que, de

forma difusa, espalhada, ilumina a amostra. Parte deste feixe é refletido por ela, seguindo para o prisma ou para uma grade de difração.

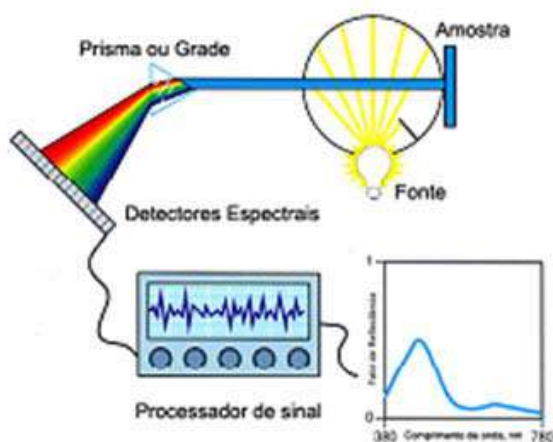


Figura 62.: Diagrama esquemático de funcionamento de um espectrofotômetro

Os componentes monocromáticos, resultantes desta difração, atingem os detectores espectrais especializados em cada faixa de comprimento de onda. Esses detectores enviam para o processador o sinal correspondente à energia relativa recebida e o fator de refletância. São então registrados e apresentados em forma de gráfico.

Um fator importante na análise colorimétrica é a geometria do instrumento (figura.63). O ângulo pelo qual a amostra é iluminada ou detectada pode afetar sua curva de refletância. A CIE recomenda quatro diferentes geometrias de instrumentos para a medição de cor.

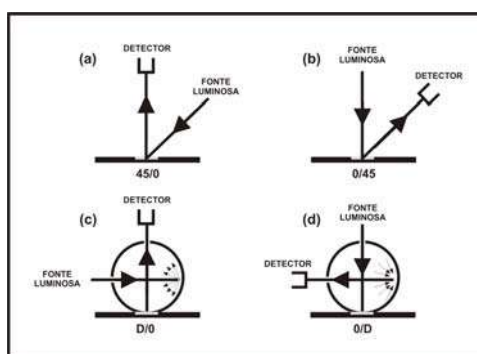


Figura 63.: Geometrias padronizadas recomendadas pela CIE para os espectrofotômetros

A geometria 45/0 (o primeiro algarismo refere-se à iluminação) a amostra é iluminada por um ou mais feixes de luz que fazem um ângulo de $45^{\circ} \pm 2^{\circ}$ partindo da normal até o plano que contém a amostra. O ângulo entre a direção da visada e a

normal ao plano da amostra não pode ser maior que 10° . O ângulo entre o eixo e qualquer raio do feixe de luz não pode exceder 8° . Essa mesma restrição deve ser observada no feixe de visada.

Na geometria 0/45 a amostra é iluminada por um feixe cujo eixo não excede em 10° a normal do plano que a contém. A amostra é vista de um ângulo de $45^\circ \pm 2^\circ$ a partir da normal. O ângulo entre o eixo do feixe de luz e qualquer raio de luz não pode ser maior que 8° . Essa mesma restrição deve ser observada no feixe de visada.

Na geometria Difusa/ 0° , a amostra é iluminada de modo difuso por uma esfera de integração. O ângulo entre a normal ao plano da amostra e o eixo do feixe de visada não pode exceder 10° . A esfera de integração deve ter um diâmetro tal que a área total das suas portas não exceda 10% da sua área de reflexão interna.

Na geometria 0° /Difusa, a amostra é iluminada por um feixe cujo eixo não excede em 10° da normal ao plano que a contém. O fluxo refletido é coletado por uma esfera de integração. O ângulo entre o eixo e qualquer raio do feixe de iluminação não pode exceder de 5° . A esfera de integração deve ser de um diâmetro tal que a área total de suas portas não exceda em 10% a sua área interna de reflexão.

A vantagem da geometria esférica, figura 64, segundo Gundlach e Terstiege (1994) é a captação completa da refletância e a baixa sensibilidade a textura da amostra.

A tecnologia altamente desenvolvida aliada à informática permitiu a criação de instrumentos que possibilitam a aplicação prática desses fundamentos teóricos com grande repetitividade.

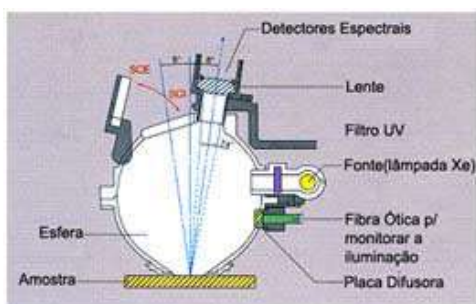


Figura 64.: Diagrama esquemático de um espectrofotômetro com esfera de integração e utilização de specularidade incluída ou excluída

O resultado da medição de um espectrofotômetro é a curva de refletância espectral do material sob análise. A figura 65 apresenta exemplos de curvas de refletância de amostras de cores verde, magenta, branco real e branco ideal.

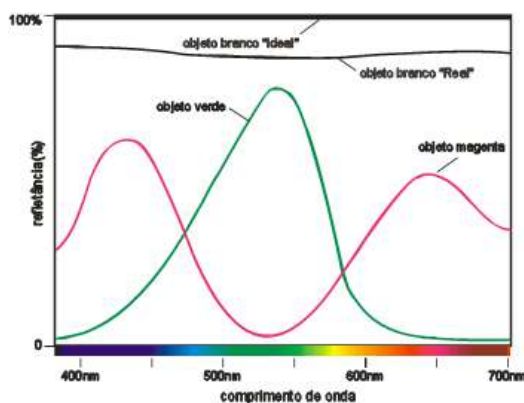


Figura 65.: Curva de distribuição da refletância espectral de três objetos

2.5.3. Potencial do método espectrofotométrico

No início da industrialização o atributo cor, de um objeto, era considerado apenas como mero acabamento. A competição aumentando fez a cor passar ao estágio de diferencial do produto. Anteriormente era muito difícil para o colorista garantir a “qualidade da cor”, utilizando pigmentos que não possuíam concentrações constantes, pesá-los em balanças sem exatidão e aplicá-los em processos produtivos instáveis. As diferenças de cor assim geradas teriam que ser corrigir visualmente, em algum momento da produção.

O desenvolvimento das ciências trouxe grande precisão aos instrumentos. Os processos produtivos melhoraram sua reprodutibilidade e a física óptica teve grandes avanços. Neste contexto surge a colorimetria, uma ciência de medição que começa com uma sensação visual, progride através de várias tecnologias e termina por buscar a correlação máxima com a sensação visual humana (Green at All , 2002). Atingir este objetivo não é nada fácil. Muitos obstáculos foram encontrados e tiveram que ser superados. Somente à algumas décadas a comunicação absoluta da cor pôde ser realizada.

Anteriormente quando se desejava produzir cor em outro lugar era necessário o envio da amostra física, e não se podia determinar o iluminante nem o observador, a fim de evitar o metamerismo.

Atualmente os equipamentos para medição de cor, espectrofotômetros e colorímetros, são capazes de fornecer coordenadas colorimétricas ($L^*a^*b^*$) universais, sob iluminantes e observador padronizados. Esses dados podem ser enviados pela internet e a cor reproduzida com grande exatidão rapidamente em qualquer lugar do mundo.

Os modernos espectrofotômetros, de matrizes de diodos, são muito mais rápidos e precisos, pois emitem simultaneamente todos os comprimentos de ondas sobre a amostra. Os equipamentos convencionam fazer a varredura de toda a faixa de medição visível, em intervalos discretos de 1, 5, 10 ou 20 nm, de acordo com sua resolução.

O potencial do método espectrofotométrico de refletância é excelente. Controla a qualidade da cor de forma eficaz, conta com ótima correlação com a visão e estão se tornando equipamentos cada vez mais exatos, práticos e acessíveis.