

## Capítulo 11

# Cores e Sistemas de Cores

### 11.1 Percepção de Cor

A cor é o atributo da percepção visual que pode ser descrito através dos nomes usados para identificar as cores, como branco, cinza, preto, amarelo, etc., ou da combinação delas. As diferentes cores, ou espectros luminosos, que podem ser percebidos pelo sistema visual humano correspondem a uma pequena faixa de frequências do espectro eletromagnético, que inclui as ondas de rádio, microondas, os raios infravermelhos e os raios X, como mostrado na Figura 11.1.

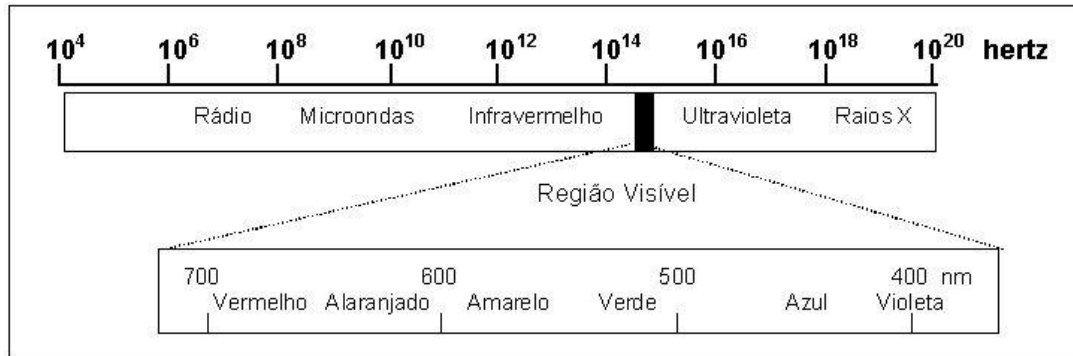


Figura 11.1: Espectro eletromagnético [Gro94].

A frequência mais baixa do espectro visível corresponde à cor vermelha ( $4.3 \times 10^{14}$  hertz) e a mais alta à cor violeta ( $7.5 \times 10^{14}$  hertz). Os valores de frequência intermediários correspondem a cores que passam pelo alaranjado e amarelo e por todas as outras cores, até chegar nos verdes e azuis. As cores são ondas eletromagnéticas descritas pelo seu comprimento de onda ( $\lambda$ ) e especificadas, tipicamente, em nanômetros (nm).

Os comprimentos de onda maiores possuem distâncias focais maiores e, conseqüentemente, requerem maior curvatura da lente do olho para serem focalizados, (a cor vermelha possui a maior distância focal e a azul, a menor). A utilização simultânea de cores localizadas em extremos opostos do espectro fazem com que a lente altere o seu formato constantemente, causando cansaço no olho. A visão estereoscópica da cor é um efeito relacionado ao processo de focalização da imagem na retina, que faz com que cores puras localizadas à mesma distância do olho pareçam estar a distâncias diferentes; por exemplo, a cor vermelha parece estar mais próxima e a cor azul parece estar mais distante.

Uma fonte de luz (como, por exemplo, o sol ou uma lâmpada) emite em todas as frequências do espectro visível, produzindo a luz branca que incide sobre um objeto. Parte dessa luz é absorvida e a outra parte é refletida, determinando a cor resultante do objeto. Quando há predominância das frequências baixas, diz-se que o objeto é vermelho, ou que a luz percebida possui uma frequência dominante (ou um comprimento de onda dominante) na frequência baixa do espectro. A frequência dominante também é chamada de matiz ou, simplesmente, de cor da luz.

O matiz é o atributo de uma sensação visual que faz com que uma área pareça ser similar a uma ou 2 das cores percebidas vermelha, amarela, laranja, azul, púrpura [Hun78]. A partir dessa definição, pode-se diferenciar a cor cromática, que possui matiz, da acromática, que é desprovida de matiz. As características da luz são descritas através de propriedades como o matiz e as sensações de brilho e saturação. O matiz é usado para dar um nome a uma cor, o brilho corresponde ao grau de luminância

de uma cor em relação à luminância de outra ou em relação ao fundo, e a saturação é a pureza aparente de um matiz. Quanto maior o domínio de um comprimento de onda, maior é a sua saturação. As cores preta, branca e cinza possuem saturação uniforme em todos os comprimentos de onda e, por isso, são diferenciadas apenas pelo brilho. As propriedades de saturação e de matiz de uma cor são referenciadas como cromaticidade.

Algumas pessoas possuem uma anomalia, denominada daltonismo, que impede a distinção de uma ou mais cores. O daltonismo se deve a um defeito na constituição dos cones e está vinculada ao sexo. Ele atinge cerca de 8% dos homens, e apenas 0.5% das mulheres. Esse defeito pode se manifestar em 1, 2 ou nos 3 tipos de receptores. Os tricromatas são daltônicos que possuem os 3 sistemas de pigmentos, mas que utilizam os sistemas em proporções diferentes das pessoas normais e das pessoas com o mesmo defeito. Os dicromatas percebem as cores defeituosamente porque combinam apenas 2 sistemas. Os monocromatas percebem apenas graduações de claro e de escuro, pois sua estimulação visual se baseia em um único sistema cromático. Um outro aspecto que também influencia na percepção de cores é o amarelamento das lentes do olho que ocorre com o passar dos anos, fazendo com que as pessoas se tornem menos sensíveis, por exemplo à cor amarela do que à cor azul.

## 11.2 Sistemas de Cores Primárias

O conteúdo desta seção, que descreve alguns sistemas de cores primárias, foi baseado principalmente em Hearn [Hea94], Capítulo 15.

Um sistema de cores é um método que explica as propriedades ou o comportamento das cores num contexto particular. Não existe um sistema que explique todos os aspectos relacionados à cor. Por isso, são utilizados sistemas diferentes para ajudar a descrever as diferentes características da cor que são percebidas pelo ser humano. Existem vários sistemas de cores, sendo que serão apresentados apenas alguns dos principais: o XYZ, o RGB, o HSV e o HLS.

As cores primárias são as 2 ou 3 cores que um sistema utiliza para produzir outras cores. As cores podem ser produzidas a partir de uma combinação das primárias, ou então, da composição de 2 combinações. O universo de cores que podem ser reproduzidas por um sistema é chamado de espaço de cores (color space ou color gamut). Alternativamente, um espaço de cores (color space) pode ser definido como uma representação visual de um modelo de cores, como o cubo definido pelas componentes do modelo RGB, ou o cone definido pelo modelo HSV. Não existe um conjunto finito de cores primárias que produza todas as cores visíveis, mas sabe-se que uma grande parte delas pode ser produzida a partir de 3 primárias.

O estudo da utilização de 3 fontes de luz espectral para a geração de cores é chamado de colorimetria, e tem como um de seus objetivos determinar espaços de cor perceptualmente uniformes. Um espaço de cores (ou sistema de cores) perceptualmente uniforme é um no qual distâncias perceptuais iguais separam todas as cores. Por exemplo, a escala de cinzas do espaço deve transmitir uma transição suave entre o preto e o branco. A definição de um espaço de cores uniforme é feita através de medições empíricas obtidas sob condições experimentais rigidamente controladas - as condições do ambiente e outros parâmetros importantes devem ser mantidos constantes, como o tamanho das amostras de cores, o espaçamento entre as amostras, a luminância e cromaticidade do fundo e da luz ambiente. Apesar dessa limitação, os espaços perceptuais de cores fornecem ferramentas adequadas para a solução de problemas como a compressão de imagens (para decidir o nível de codificação da informação de cor) e pseudo-coloração<sup>1</sup> (para mapear as cores da imagem em um conjunto com espaçamento perceptual máximo).

Os sistemas de cores podem ser aditivos ou subtrativos. Nos modelos aditivos (por exemplo, RGB e XYZ), as intensidades das cores primárias são adicionadas para produzir outras cores. A Figura 11.2 ilustra a demonstração do funcionamento desses modelos através da sobreposição de círculos coloridos.

Pode-se pensar que o branco é a mistura das intensidades máximas das 3 cores primárias aditivas (vermelha, verde e azul). Os matizes intermediários (amarelo, turquesa e magenta) são obtidos através da combinação das intensidades máximas de 2 cores.

Nos modelos subtrativos (por exemplo, o CMY), as cores são geradas subtraindo-se o comprimento da onda dominante da luz branca, por isso, a cor resultante corresponde à luz que é refletida. A Figura 11.3 ilustra a demonstração do funcionamento desses modelos através da sobreposição de círculos coloridos.

Pode-se pensar que o preto é a combinação das 3 cores subtrativas (turquesa, magenta e amarela). A quantidade de preto numa cor é indicada pela diferença entre o branco e a intensidade máxima das 3 cores primárias aditivas. E, da mesma forma, a quantidade de branco numa cor é indicada pela diferença entre o preto e a intensidade mínima das 3 cores primárias aditivas.

---

<sup>1</sup>A coloração “falsa” (“pseudocoloring”) ocorre quando as cores “verdadeiras” de uma imagem são mapeadas em outro conjunto de cores, ou quando uma imagem adquirida em tons de cinza é colorida.

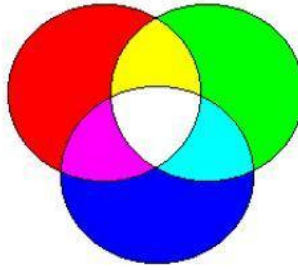


Figura 11.2: Ilustração da mistura de cores aditivas [For94].

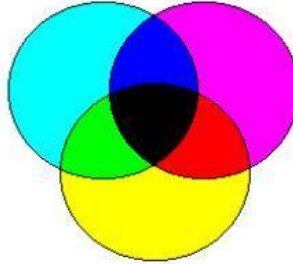


Figura 11.3: Ilustração da mistura de cores subtrativas [For94].

As cores puras e saturadas não representam toda a classe de cores possíveis, existem ainda os tints, shades e tones que correspondem, respectivamente, às cores obtidas através da adição de branco, preto e cinza às cores saturadas, causando uma alteração no efeito da cor. A Figura 11.4<sup>2</sup> ilustra de tints, shades e tones obtidos a partir da cor vermelha.

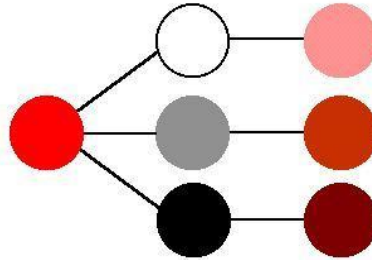


Figura 11.4: Ilustração da obtenção de tints, shades e tones.

A adição de branco clareia uma cor e cria um tint (por exemplo, adicionando branco ao vermelho para obter a cor pink). A adição de preto escurece uma cor e cria um shade (por exemplo, adicionando preto ao vermelho para obter um castanho-avermelhado (maroon)). Além disso, a adição de cinza reduz o brilho de uma cor e cria um tone. Uma composição monocromática é formada inteiramente de tints, shades e tones da mesma cor.

### 11.3 Modelo XYZ

O sistema *XYZ* de cores primárias da CIE (Comissão Internacional de Iluminação) é um sistema aditivo que descreve as cores através de 3 cores primárias virtuais *X*, *Y* e *Z*. Esse sistema foi criado devido à inexistência de um conjunto finito de cores primárias que produza todas as cores visíveis possíveis. Nesse sistema, as cores  $C_l$  podem ser expressas pela seguinte equação:

$$C_l = x.X + y.Y + z.Z \quad (11.1)$$

<sup>2</sup>reproduzida de <http://www.contrib.andrew.cmu.edu:8001/usr/dw4e/color/tints.html>.

em que  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  especificam as quantidades das primárias padrões necessárias para descrever uma cor espectral. A normalização dessa quantidade em relação à luminância ( $X + Y + Z$ ) possibilita a caracterização de qualquer cor. As cores desse sistema podem ser expressas como combinações das quantidades normalizadas abaixo:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (11.2)$$

com  $x + y + z = 1$ . Assim, qualquer cor pode ser definida apenas pelas quantidades de  $x$  e  $y$  que, por dependerem apenas do matiz e da saturação, são chamadas de coordenadas de cromaticidade. A descrição completa de uma cor é dada pelas coordenadas de cromaticidade e pelo valor de um dos 3 estímulos originais, normalmente do  $Y$ , que contém a informação de luminância. Essa descrição possibilita a obtenção das quantidades de  $X$  e  $Z$  com as equações abaixo:

$$X = \frac{x}{y}Y \quad Z = \frac{z}{y}Y \quad (11.3)$$

onde  $z = 1 - x - y$ .

O sistema XYZ é formado por cores imaginárias que são definidas matematicamente. Nesse sistema, as combinações de valores negativos e outros problemas relacionados à seleção de um conjunto de primárias reais são eliminados. As coordenadas de cromaticidade  $x$  e  $y$  permitem representar todas as cores num gráfico bidimensional. O traçado dos valores normalizados de  $x$  e  $y$  para as cores no espectro visível resulta na curva ilustrada na Figura 11.5.

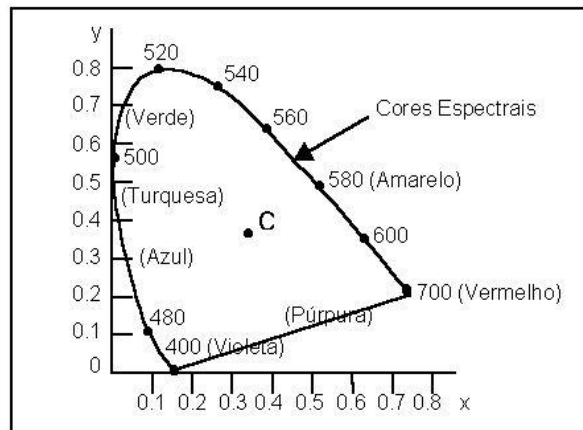


Figura 11.5: Diagrama de cromaticidade do CIE [Hea94].

Os pontos que representam as cores puras no espectro eletromagnético são rotulados de acordo com os seus comprimentos de onda e estão localizados ao longo da curva que vai da extremidade correspondente à cor vermelha até a extremidade correspondente à cor violeta. A linha reta que une os pontos espectrais vermelho e violeta é chamada linha púrpura, e não faz parte do espectro. Os pontos internos correspondem a todas as combinações possíveis de cores visíveis, e o ponto C corresponde à posição da luz branca.

Devido à normalização, o diagrama de cromaticidade não representa os valores de luminância. Por isso, as cores com luminâncias diferentes e cromaticidades iguais são mapeadas no mesmo ponto. Através desse diagrama, é possível determinar e comparar os espaços de cores dos diferentes conjuntos de primárias, identificar as cores complementares (2 cores que, somadas, produzem a cor branca) e determinar o comprimento de onda dominante e a saturação de uma cor.

Os espaços de cor são representados no diagrama, ilustrado na Figura 11.6a, através de linhas retas ou de polígonos. Todas as cores ao longo da linha que une os pontos  $C_1$  e  $C_2$  na Figura 11.6a podem ser obtidas através da mistura de quantidades apropriadas das cores correspondentes a esses pontos. A escala de cores para 3 pontos (por exemplo,  $C_3$ ,  $C_4$  e  $C_5$  na Figura 11.6a) é representada por um triângulo cujos vértices são definidos pelas cores correspondentes às 3 posições e inclui cores contidas no interior e nas margens fronteiriças desse triângulo.

Observando o diagrama é possível perceber que nenhum conjunto formado por 3 primárias pode gerar todas as cores, pois nenhum triângulo contido no diagrama abrange todas as cores possíveis. As cores complementares são identificadas por 2 pontos localizados em lados opostos do ponto C e conectados por uma linha reta. Por exemplo, misturando quantidades apropriadas de 2 cores  $C_1$  e  $C_2$  (Figura 11.6b), obtém-se a luz branca.

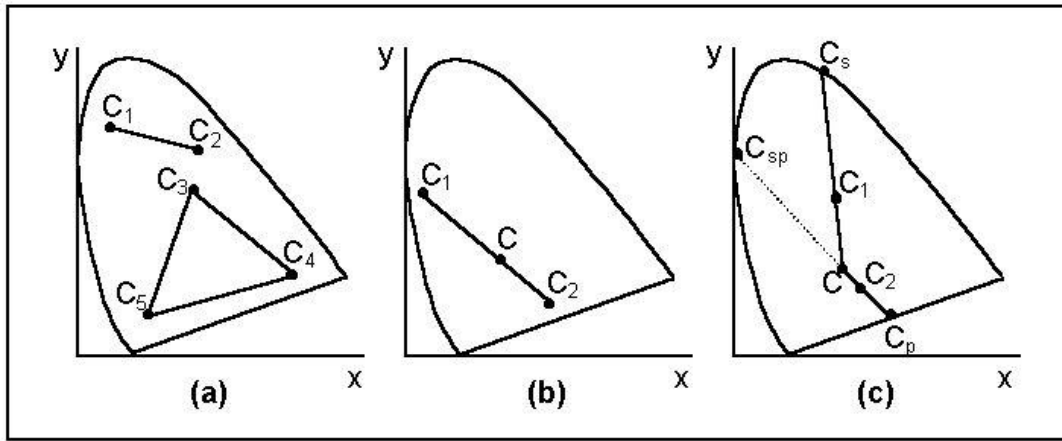


Figura 11.6: Representação de escalas de cor no diagrama de cromaticidade do CIE [Hca94].

A determinação do comprimento de onda dominante de uma cor pode ser feita interpretando-se a escala de cores entre 2 primárias. O comprimento de onda dominante da cor  $C_1$ , representada na Figura 11.6c, é determinado traçando-se uma linha reta que parte do ponto  $C$  passando pelo ponto  $C_1$  e intersectando a curva espectral no ponto  $C_s$ . A cor  $C_1$ , corresponde então, à combinação da luz branca com a cor espectral  $C_s$ , pois  $C_s$  é o comprimento de onda dominante de  $C_1$ . O comprimento de onda dominante das cores que estão entre o ponto  $C$  e a linha púrpura é determinado de outra forma. Traça-se uma linha a partir do ponto  $C$  (Figura 11.6c) passando pelo ponto  $C_2$  e intersectando a linha púrpura no ponto  $C_p$ . Como esse ponto não pertence ao espectro visível, o ponto  $C_2$  é referenciado como sendo uma cor não espectral e o seu comprimento de onda dominante é obtido através do prolongamento da reta até que ela intercepte a curva espectral, no ponto  $C_{sp}$ . As cores não espectrais estão entre púrpura e magenta, e são geradas através da subtração do comprimento da onda dominante (como, por exemplo, o  $C_{sp}$ ) da luz branca.

A pureza de uma cor (por exemplo, de  $C_1$  na figura 11.6c) é determinada através da distância relativa do ponto  $C_1$ , que corresponde à linha reta que vai do ponto  $C$  até o ponto  $C_s$ . Pode-se calcular a pureza do ponto  $C_1$  através da relação  $\frac{d_{c1}}{d_{cs}}$ , onde  $d_{c1}$  representa a distância entre  $C$  e  $C_1$  e  $d_{cs}$  representa a distância entre  $C$  e  $C_s$ . A cor  $C_1$  é cerca de 25% pura porque está situada a aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da distância total entre  $C$  e  $C_s$ .

## 11.4 Modelo RGB (Red, Green, Blue)

O sistema RGB de cores primárias também é aditivo e está baseado na teoria dos 3 estímulos (*Tristimulus Color Theory*) proposta por Young-Helmholtz e discutida na seção 2.3. Segundo essa teoria, o olho humano percebe a cor através da estimulação dos 3 pigmentos visuais presentes nos cones da retina, que possuem picos de sensibilidade aproximada nos seguintes comprimentos de onda: 630 nm (Vermelho-Red), 530 nm (Verde-Green) e 450 nm (Azul-Blue). Esse sistema pode ser representado graficamente através do cubo unitário definido sobre os eixos R, G e B, como ilustrado na Figura 11.7.

A origem representa a cor preta, o vértice de coordenadas (1, 1, 1) representa a cor branca, os vértices que estão sobre os eixos representam as cores primárias e os demais vértices representam o complemento de cada cor primária. Cada ponto no interior do cubo corresponde a uma cor que pode ser representada pela tripla  $(R, G, B)$ , com os valores  $R$ ,  $G$  e  $B$  variando de 0 a 1. Os tons de cinza são representados ao longo da diagonal principal do cubo, que vai da origem (ponto correspondente a cor preta) até o vértice que corresponde à cor branca. Cada tom ao longo dessa diagonal é formado por contribuições iguais de cada primária. Logo, um tom de cinza médio entre o branco e o preto é representado por (0.5, 0.5, 0.5). As cores  $C_i$  desse sistema podem ser expressas na forma:

$$C_i = r.R + g.G + b.B \quad (11.4)$$

A resposta do olho aos estímulos espectrais não é linear e, por isso, algumas cores não podem ser reproduzidas pela sobreposição das 3 primárias. Isso significa que algumas cores existentes na natureza não podem ser mostradas nesse sistema. Por isso, um fenômeno natural colorido como, por exemplo, de formação de rochas, não pode ser reproduzido com precisão (conforme discutido em Wolf [Wol93]).

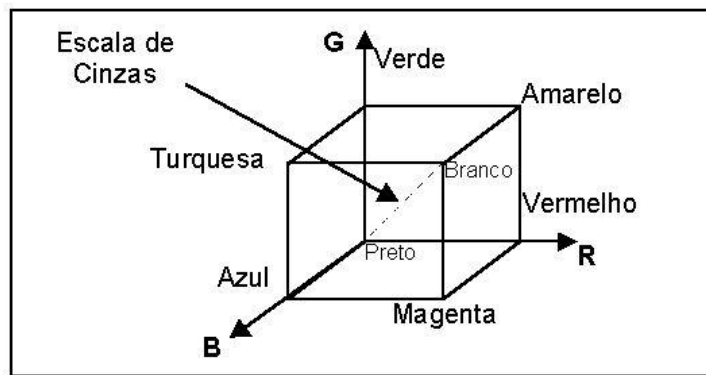


Figura 11.7: Cubo do RGB [Fol96].

## 11.5 Modelo HSV (Hue, Saturation, Value)

O sistema HSV utiliza descrições de cor que são mais intuitivas do que combinações de um conjunto de cores primárias e, por isso, é mais adequado para ser usado na especificação de cores em nível de interface com o usuário. A cor é especificada através de uma cor espectral e das quantidades de branco e preto que serão adicionadas para a obtenção de shades, tints e tones diferentes. A representação gráfica tridimensional do sistema HSV é um cone de 6 lados derivado do cubo RGB, mostrado na figura 11.8.

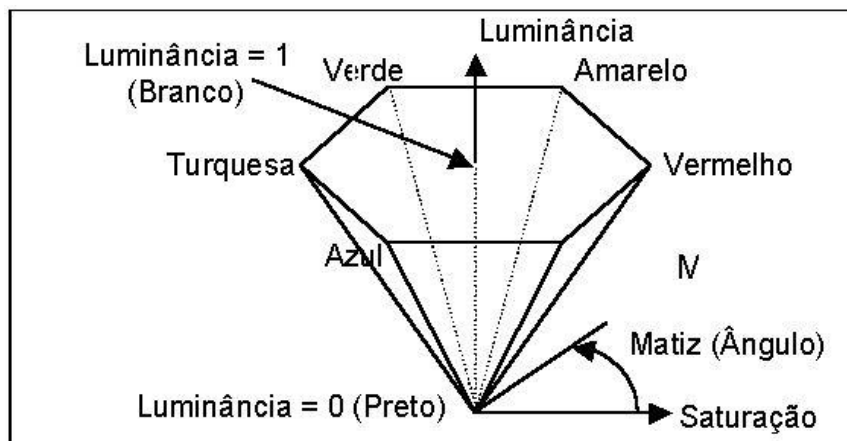


Figura 11.8: Cone hexagonal do HSV [Fol96].

Os parâmetros de cor utilizados nesse sistema são o matiz (*hue*), a saturação (*saturation*) e a luminância (*value*). Os vários matizes estão representados na parte superior do cone, a saturação é medida ao longo do eixo horizontal e a luminância é medida ao longo do eixo vertical, que passa pelo centro do cone. O matiz, que corresponde às arestas ao redor do eixo vertical, varia de  $0^\circ$  (vermelho) a  $360^\circ$ , e o ângulo entre os vértices é de  $60^\circ$ . A saturação varia de 0 a 1 e é representada como sendo a razão entre a pureza de um determinado matiz e a sua pureza máxima ( $S = 1$ ). Um determinado matiz possui  $\frac{1}{4}$  de pureza em  $S = 0.25$ . Quando  $S = 0$  tem-se a escala de cinzas. A luminância varia de 0 (no pico do cone), que representa a cor preta, a 1 (na base), onde as intensidades das cores são máximas.

## 11.6 Modelo HLS (Hue, Lightness, Saturation)

O sistema HLS<sup>3</sup> também é baseado em parâmetros mais intuitivos para a descrição de cores.

A representação gráfica tridimensional desse sistema é um cone duplo, como mostra a figura 9. Os 3 parâmetros de cor utilizados são o matiz (*hue*), a luminosidade (*lightness*<sup>4</sup>) e a saturação (*saturation*).

<sup>3</sup>Outros autores denominam esse sistema como *Hue, Luminance, Saturation* [Rog93a].

<sup>4</sup>Luminosidade (*lightness*): Segundo Foley [Fol96], esse termo está relacionado à noção acromática da intensidade percebida de um objeto que reflete luz. Brilho (*brightness*) é usado no lugar de luminosidade para denotar a intensidade percebida de um objeto que emite luz.

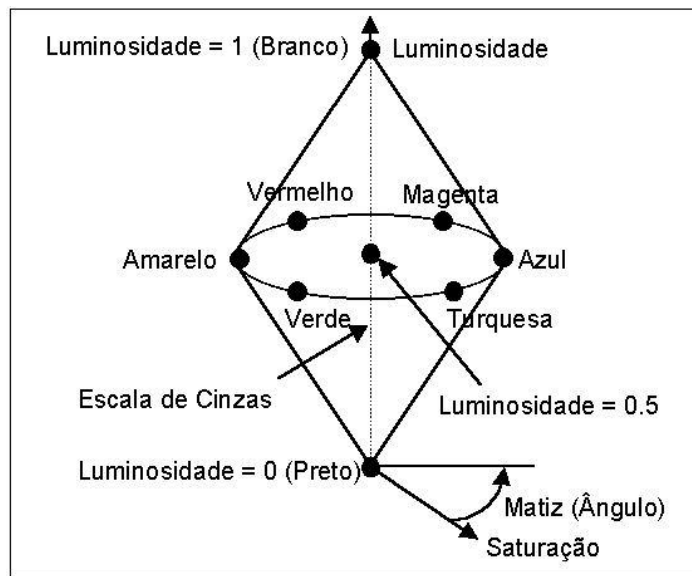


Figura 11.9: Cone duplo do HLS [Fol96].

O ângulo em relação ao eixo vertical varia de  $0^\circ$  (matiz azul) a  $360^\circ$  em intervalos de  $60^\circ$  e especifica um matiz. O eixo vertical corresponde à luminosidade e varia de 0 (preto) a 1 (branco) e é onde se encontra a escala de cinzas. A saturação varia de 0 a 1, e os matizes puros são encontrados no plano onde a luminosidade é igual a 0.5 e a saturação é igual a 1. Quanto menor o valor da saturação menor é a pureza do matiz; e quando a saturação é igual a 0, tem-se a escala de cinzas.

Os sistemas HLS e HSV permitem que se pense em termos de cores mais “claras” e mais “escuras”. As cores são especificadas através de um ângulo, e os diversos *shades*, *tints*, e *tones* de cada cor são obtidos através do ajuste do brilho ou luminosidade e da saturação. As cores mais claras são obtidas através do aumento do brilho ou da luminosidade e as cores mais escuras pela diminuição dos mesmos. As cores intermediárias são obtidas através da diminuição da saturação.