

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL  
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO

NOTAS DE AULA DE  
**COMPUTAÇÃO GRÁFICA**

PAULO PAGLIOSA

CAMPO GRANDE, MS

## CAPÍTULO 4

# Modelos de Iluminação

### 4.1 Introdução

Um *modelo de iluminação* é um conjunto de equações que determinam quantitativamente qual é a cor de um ponto da superfície de um objeto em função das propriedades materiais da superfície e da luz que incide direta e/ou indiretamente no ponto. Um *modelo de iluminação local* é aquele que leva em consideração apenas a luz emitida a partir das fontes de luz da cena, ou seja, *iluminação direta*. Um *modelo de iluminação global* leva em conta ainda a *iluminação indireta*, ou seja, proveniente da inter-reflexão e refração da luz entre os objetos da cena, como é o caso do algoritmo de traçado de raios introduzido no Capítulo 1.

A determinação da energia luminosa em torno de um ponto é fisicamente descrita pela *equação de radiância*, cuja solução pode ser não imediata dependendo do material da superfície e das condições de iluminação da cena. Por isso, em computação gráfica, adotam-se equações mais simples para cálculo da iluminação. Dentre os vários modelos existentes, veremos neste capítulo um modelo local bastante utilizado chamado *modelo de iluminação de Phong*.

Na Seção 4.2 são descritas alguns tipos de fontes virtuais de luz (dizemos que a luz é virtual pois a fonte luminosa em si não aparece na imagem, apenas seus efeitos sobre os atores). O modelo de Phong é então abordado na Seção 4.3. Na Seção 4.4 discutimos sobre o traçado de raios secundários, responsáveis pelos efeitos de iluminação indireta.

### 4.2 Tipos de Luzes Virtuais

Dentre os vários tipos de luz virtual em computação gráfica, veremos a luz pontual, a luz direcional e a luz *spot*.

**Luz pontual** Uma fonte de luz pontual  $l$  localiza-se em um ponto  $P_l$  no espaço a partir do qual esta emite luz de cor  $C_l$  em todas as direções e sentidos, como represen-

tado na Figura 4.1(a). Um raio de luz que parte da fonte de luz pontual ilumina um ponto  $P$  trafegando na direção do vetor unitário  $\mathbf{L}_l$  dado por:

$$\mathbf{L}_l = \frac{P - P_l}{\|P - P_l\|}. \quad (4.1)$$

À medida que o raio viaja no espaço perde intensidade em uma razão inversamente proporcional ao quadrado da distância  $d_l$  entre  $P_l$  e  $P$ . Neste caso, a cor do raio no ponto  $P$  é:

$$I_l = \frac{C_l}{d_l^2}.$$

Contudo, tal decaimento quadrático muitas vezes pode não ser adequado na prática, uma vez que  $C_l/d_l^2$  não varia muito se a luz estiver muito distante, mas varia bastante se esta estiver próxima, o que pode ocasionar diferenças consideráveis na tonalização. Embora tal comportamento seja correto para fontes de luz pontuais, em cenas nas quais deseja-se realismo fotográfico os objetos tipicamente não são iluminados por luzes pontuais (nem a iluminação calculada por modelos simplificados como o visto neste capítulo). Uma alternativa é considerar que o decaimento seja linear ou até mesmo independente da distância  $d_l$ . Assim, a cor do raio no ponto  $P$  pode ser dada como:

$$I_l = \frac{C_l}{d_l^{f_l}}, \quad (4.2)$$

em que o fator de decaimento, ou *falloff*,  $f_l$  é

$$f_l = \begin{cases} 0, & \text{sem decaimento,} \\ 1, & \text{decaimento linear,} \\ 2, & \text{decaimento quadrático.} \end{cases} \quad (4.3)$$

**Luz direcional** Uma luz direcional  $l$  emite raios de intensidade constante  $C_l$ , ou seja, sem decaimento, em uma direção fixa dada por um versor  $\mathbf{D}_l$ , Figura 4.1(b). Assim, a cor de um raio de luz direcional em um ponto  $P$  qualquer é sempre  $I_l = C_l$ . Essa abstração é usada para representar, por exemplo, a luz do sol em relação à Terra.

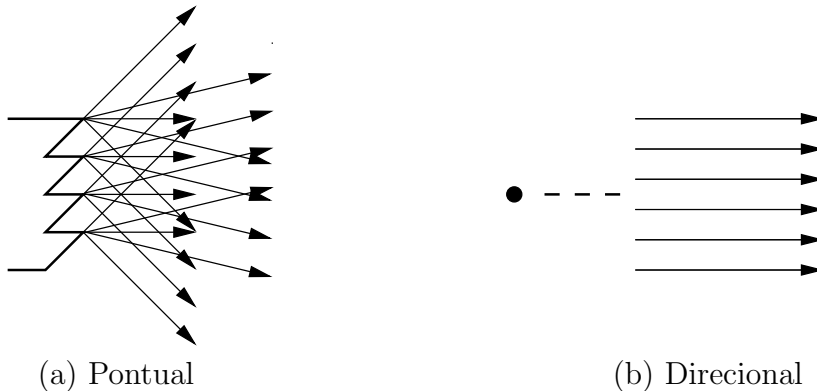


Figura 4.1: Dois tipos simples de luz virtual.

**Luz *spot*** Uma luz do tipo *spot* é uma luz pontual cujo fluxo é restrito ao interior de um cone reto semi-infinito, como ilustrado na Figura 4.2. A exemplo da luz pontual, a intensidade da luz em um ponto  $P$  decresce em função da distância  $d_l$  entre a posição  $P_l$  do *spot* e  $P$  e do fator de decaimento  $f_l$ , conforme a Equação (4.2). Em adição, a intensidade também decresce à medida que  $P$  se afasta do eixo do cone em direção às geratrizes (fora do cone, o *spot* não ilumina o ponto  $P$ ). Além da posição do vértice do cone  $P_l$  e do fator de decaimento  $f_l$ , a luz é caracterizada por um vetor unitário  $\mathbf{D}_l$ , o qual define a direção do eixo do cone, um ângulo  $\gamma_l$  entre o eixo e qualquer geratriz do cone,  $0 \leq \gamma_l \leq 90^\circ$ , e um expoente de decaimento  $e_l$ . A intensidade da luz no ponto  $P$  é dada por:

$$I_l = \frac{C_l}{d_l^{f_l}} \cos(\psi_l)^{e_l}, \quad (4.4)$$

em que  $\psi_l$  é o ângulo entre o eixo do cone e o vetor de incidência da luz em  $P$ , Equação (4.1) (se  $\psi_l > \gamma_l$ , o ponto  $P$  está fora do cone). O expoente de decaimento pode ter valores, por exemplo, iguais a 0, 1 ou 2.

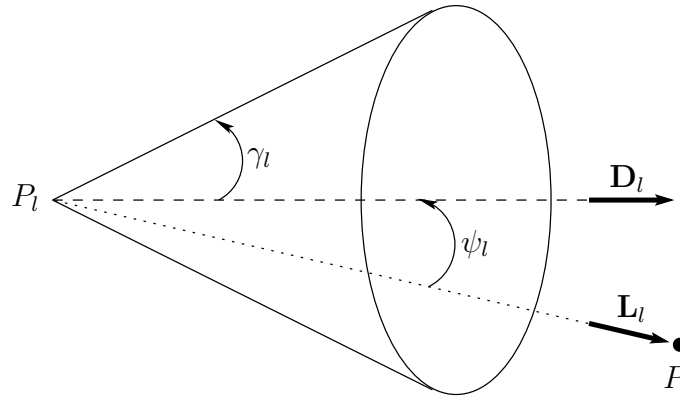


Figura 4.2: Luz *spot*.

## 4.3 Modelo de Iluminação de Phong

Um modelo local considera a iluminação de um ponto por raios de luz provindos diretamente daqueles objetos considerados como fontes de luz virtual. Um modelo local desconsidera a iluminação indireta resultante da inter-reflexão difusa e especular e da transmissão difusa e especular que ocorre entre superfícies da cena e que podem afetar a iluminação de um ponto. O modelo de Phong é um modelo local que considera somente reflexão difusa e reflexão especular. Neste modelo, a inter-reflexão difusa é aproximada por uma luz constante arbitrária fictícia chamada *luz ambiente*.

### 4.3.1 Luz Ambiente

Seja então um ponto  $P$  cuja iluminação é dada por uma quantidade de energia representada por uma cor RGB  $I$ . A iluminação de  $P$  derivada da luz ambiente é:

$$I = k_a O_a I_a, \quad (4.5)$$

em que  $k_a$  e  $O_a$ ,  $0 \leq k_a \leq 1$ , características do material em  $P$ , são o *coeficiente de reflexão difusa ambiente* e a *cor de reflexão difusa ambiente*, respectivamente, e  $I_a$  é a cor da luz ambiente. Alguns autores resumem a Equação (4.5) como:

$$I = O_a I_a, \quad (4.6)$$

em que  $O_a$  é  $k_a O_a$  da Equação (4.5). A operação de “multiplicação de cores” nas equações acima resulta em uma cor cujos componentes são iguais aos componentes das duas cores multiplicados:

$$C(r, g, b) = C_1 C_2 = (r_1 r_2, g_1 g_2, b_1 b_2).$$

### 4.3.2 Reflexão Difusa

Na reflexão difusa, fótons provindos de uma fonte de luz e que incidem em um ponto  $P$  de uma superfície refletem, após o choque em  $P$ , em direções arbitrárias. Esta reflexão decorre da rugosidade do material da superfície, causando uma difusão de luz em torno de  $P$  que pode ser observada igualmente com uma intensidade que independente da posição do observador.

A iluminação de um ponto devida à reflexão difusa é definida pela lei dos cossenos de Lambert. No modelo de Phong, para uma fonte de luz  $l$ , cujos raios incidem em  $P$  na direção do vetor  $L_l$  e com intensidade  $I_l$ , a iluminação devida à reflexão difusa é:

$$I = k_d O_d I_l \cos \theta, \quad (4.7)$$

em que  $k_d$  e  $O_d$ ,  $0 \leq k_d \leq 1$ , características do material em  $P$ , são o *coeficiente de reflexão difusa* e *cor de reflexão difusa*, respectivamente, e  $\theta$  é o ângulo entre  $\mathbf{L}_l$  e  $\mathbf{N}$ , como ilustrado na Figura 4.3. Se  $\mathbf{L}_l$  e  $\mathbf{N}$  forem versores, tem-se que:

$$\cos \theta = (-\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l).$$

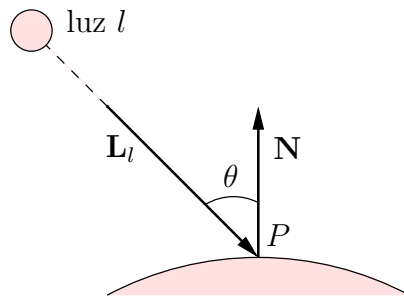


Figura 4.3: Reflexão difusa.

Como feito na luz ambiente, pode-se embutir  $k_d$  em  $O_d$ , eliminando-se, assim, uma característica do material, resultando, para uma luz  $l$ :

$$I = O_d I_l (-\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l). \quad (4.8)$$

### 4.3.3 Reflexão Especular

A reflexão especular ocorre em superfícies lisas ou polidas em uma direção preferencial. O efeito da iluminação devida à reflexão especular depende da posição do observador, causando um *spot* em torno do ponto  $P$  para um observador que o vê de uma direção dada pelo versor  $\mathbf{V}$ , Figura 4.4 (*spot* é o círculo brilhante causado pela reflexão especular). Phong define empiricamente a parcela de reflexão especular como:

$$I = k_s O_s I_l (\cos \phi)^{n_s}, \quad (4.9)$$

em que  $k_s$  e  $O_s$ ,  $0 \leq k_s \leq 1$ , características do material em  $P$ , são o *coeficiente de reflexão especular* e *cor de reflexão especular*, respectivamente,  $n_s$  é o *expoente de reflexão especular* do material em  $P$  e  $\phi$  é o ângulo entre  $\mathbf{V}$  e  $\mathbf{R}_l$  (direção de reflexão). Se  $\mathbf{V}$  e  $\mathbf{R}_l$  forem versores, tem-se que:

$$\cos \phi = (-\mathbf{R}_l \cdot \mathbf{V}).$$

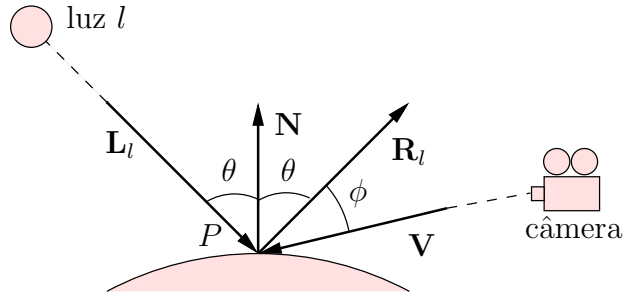


Figura 4.4: Reflexão especular.

Condensando-se  $k_s$  e  $O_s$ , vem:

$$I = O_s I_l (-\mathbf{R}_l \cdot \mathbf{V})^{n_s}. \quad (4.10)$$

O vetor  $\mathbf{R}_l$  pode ser determinado como segue. Primeiro, observa-se que

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{R}_l = -\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l. \quad (4.11)$$

Como  $\mathbf{L}_l$ ,  $\mathbf{N}$  e  $\mathbf{R}_l$  são coplanares,  $\mathbf{R}_l$  pode ser descrito como uma combinação linear de  $\mathbf{N}$  e  $\mathbf{L}_l$ :

$$\mathbf{R}_l = \alpha \mathbf{N} + \beta \mathbf{L}_l, \quad (4.12)$$

com  $\alpha \neq 0$  e  $\beta \neq 0$  arbitrários. Levando-se a Equação (4.12) na Equação (4.11), vem

$$\mathbf{N} \cdot (\alpha \mathbf{N} + \beta \mathbf{L}_l) = -\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l,$$

donde tem-se que

$$\alpha = -(\beta + 1) \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l. \quad (4.13)$$

Como  $\alpha$  e  $\beta$  são arbitrários, tomemos  $\beta = 1$ . Logo:

$$\alpha = -2 \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l. \quad (4.14)$$

Finalmente, levando-se a Equação (4.14) na Equação (4.12), tem-se

$$\mathbf{R}_l = \mathbf{L}_l - 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l)\mathbf{N}. \quad (4.15)$$

Combinando-se as Equações (4.6), (4.8) e (4.10) para NL fontes de luz de uma cena, a iluminação de um ponto  $P$ , de acordo com o modelo de Phong é:

$$I = O_a I_a + \sum_{l=1}^{NL} [O_d I_l (-\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}_l)] + \sum_{l=1}^{NL} [O_s I_l (-\mathbf{R}_l \cdot \mathbf{V})^{n_s}]. \quad (4.16)$$

## 4.4 Traçado de Raios Secundários

Neste curso, o modelo global de iluminação estudado é embutido no algoritmo de traçado de raios. Conforme introduzido no Capítulo 1, a iluminação indireta em um ponto  $P$  pode ser determinada no traçado de raios da seguinte forma:

- Traça-se recursivamente, a partir do ponto  $P$  de intersecção de um raio de pixel com um objeto, um novo raio  $R_r$  na direção de reflexão, chamado raio de reflexão, somando-se a cor de  $R_r$  à cor devida à iluminação direta no ponto de intersecção  $P$ . Um raio de reflexão é traçado apenas se o material da superfície do objeto no ponto  $P$  for “suficientemente” polido. A direção de reflexão, neste caso, é calculada como feito na reflexão especular do modelo de Phong, sendo dada pelo versor

$$\mathbf{R}_V = \mathbf{V} - 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})\mathbf{N}, \quad (4.17)$$

em que  $\mathbf{V}$  é a direção do raio de pixel e  $\mathbf{N}$  é a normal em  $P$  (veja a Figura 4.4).

- Idem para a transmissão ou refração, se considerada.

Raios de pixel são também chamados de raios *primários* e raios de reflexão (e refração) são chamados raios *secundários*.

A seguinte métrica pode ser usada para definir se um material é “suficientemente” polido: seja  $O_r$  uma cor RGB cujos componentes são os *coeficientes de reflexividade* do material em  $P$ ; então, se  $O_r \neq (0, 0, 0)$ , o material é considerado polido o suficiente para gerar o raio de reflexão. A propriedade de material  $O_r$  pode ser dada explicitamente ou tomada como sendo igual à cor de reflexão especular  $O_s$  (ou  $k_s O_s$ ). A cor do raio  $R_r$  é  $O_r C_r$ , em que  $C_r$  é determinada recursivamente pelo traçado de raios.

A recursão no algoritmo de traçado de raios é controlada por dois critérios:

- Nível de recursão. Todo raio de pixel ou de reflexão (e transparência, se considerada) tem um *nível de recursão*, igual a 1 para o raio primário e incrementado de 1 para cada raio secundário traçado recursivamente. Portanto, o nível de recursão de um raio secundário  $s$  é  $l_s = l_p + 1$ , em que  $l_p$  é o nível de recursão do raio “pai” de  $s$  (o qual pode ser um raio de pixel ou outro raio secundário). Um raio secundário só é traçado se seu nível de recursão for menor que determinado nível máximo de recursão. Se este parâmetro for igual a 1, apenas raios primários são traçados. Em consequência, traçado de raios primários somente (*ray casting*, em inglês), não leva em conta os efeitos de iluminação indireta.

- **Peso.** Todo raio tem também um *peso*, igual a 1 para o raio primário e, para um raio de reflexão  $s$ ,  $w_s = w_p \max(C_r)$ , em que  $w_p$  é o peso do raio “pai” de  $s$  e  $\max(C_r)$  é o componente de maior módulo de  $C_r$ . Um raio de reflexão só é traçado se seu peso for maior que determinado peso mínimo.

## 4.5 Exercícios

Considere um material  $M$  com as seguintes propriedades:  $k_a O_a = (0.5, 0.4, 0.6)$ ,  $k_d O_d = (0.7, 0.8, 0.6)$ ,  $k_s O_s = (0.2, 0.3, 0.4)$  e  $n_s = 1$ .

- 4.1 Seja um objeto com cor de reflexão difusa ambiente  $(0.5, 0.7, 0.3)$  e  $k_a = 1$ , iluminado por uma luz ambiente branca. Qual a cor de qualquer ponto do objeto?
- 4.2 Seja uma fonte de luz branca localizada no ponto  $(1, 1, 1)$ . Seja um ponto  $P(3, 1, 3)$  sobre uma superfície de material  $M$ . A normal na superfície em  $P$  é  $\mathbf{N}(3/5, 0, 4/5)$ . Considerando decaimento linear, qual é a cor do ponto  $P$  observado por alguém situado em  $(5, 4, 6)$ , de acordo com o modelo de Phong?
- 4.3 Seja um plano com normal na direção do vetor  $(1, 1, 1)$ , passando pela origem e com material  $M$ . Seja uma luz ambiente vermelha e uma luz amarela localizada em  $(0, 0, 5)$ . Desprezando o decaimento, qual é a cor no ponto de interseção do raio  $R$ , que parte do ponto  $O_R(8, 4, 6)$  na direção  $\mathbf{D}_R(4/5, 0, -3/5)$ , com o plano? O observador está na posição  $(0, 10, 0)$ .