

CAPÍTULO V

MODELO DE ILUMINAÇÃO

Introdução

Até o momento estudamos como representar objetos tridimensionais, alterar sua forma e posicionamento e como gerar sua imagem bidimensional. Em nenhum momento, porém, tivemos preocupação de fazer com que esses objetos parecessem realistas. Eles eram sempre “desenhados” em *wireframe*, ou seja, suas faces eram representadas pelas retas definidas por suas arestas da malha poligonal que define sua superfície.

Agora, imagine que queremos dar ao objeto uma aparência sólida. Para isso vamos pintar a sua superfície com a mesma cor do objeto. O algoritmo a seguir apresenta como essa idéia seria implementada – considerando sempre que o objeto é representado como uma malha poligonal.

Algoritmo PintaObjeto3D;

para cada face da aproximação da superfície do objeto faça
pintar toda a face da cor do objeto;

Fim-para;

Fim.

A aplicação desse algoritmo simples em um objeto esférico branco sobre um fundo preto pode ser vista na figura 100b. Na verdade o objeto que estamos vendo na figura em nada se difere de um círculo branco sobre um fundo preto. Tal fato está relacionado ao funcionamento da nossa visão. Para que possamos perceber a sensação de que uma imagem representa algo tridimensional, é indispensável que essa imagem apresente variações de intensidade de luz que ocorrem na superfície do objeto⁴.

⁴ Sendo mais rigoroso, a noção de volume que vemos se deve ao fato de possuímos dois olhos. Isso permite que nosso cérebro aplique uma técnica de reconstrução que com base nas duas imagens bidimensionais geradas por nossos olhos, a terceira dimensão dos objetos seja obtida. É o que chamamos de *Visão Estéreo*.

Esse é o caso da figura 100a. Nela temos a mesma esfera, porém a variação de intensidade luminosa em sua superfície está evidenciada, permitindo que a “sensação” de volume da esfera se torne evidente.

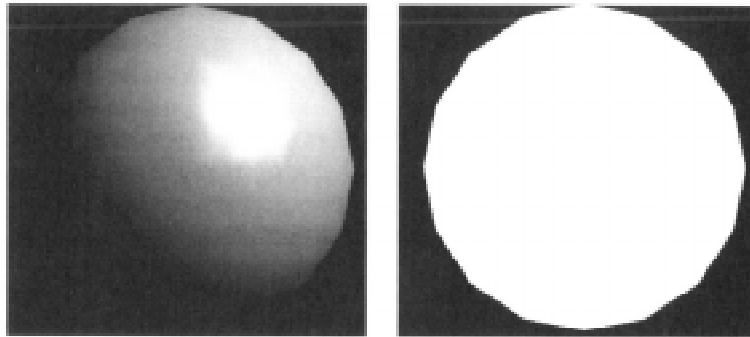


Figura 100- Duas esferas brancas sobre um fundo preto. (a) À esquerda com variação de intensidade da luz refletida. (b) À direita sem levar em conta variações de intensidade de luz.

O objetivo desse capítulo é discutir um modelo de iluminação que permita que, dado um objeto descrito por uma malha poligonal, seja possível calcular a variação de intensidade de luz em sua superfície. Dessa forma essa intensidade pode ser levada em consideração quando do preenchimento de suas faces.

Para tanto precisamos compreender como o processo físico de interação luz/objeto/sistema visual acontece. Esse é o objetivo básico desse capítulo, apresentar o modelo no qual iremos nos basear para o cálculo da iluminação de um objeto.

Modelo de Iluminação

A base para a construção de imagens realistas (no sentido de representarem de forma adequada a noção de volume de um objeto) é a análise a interação fonte de luz / objeto. Podemos caracterizar essa interação de duas formas. A primeira se dá quando um objeto recebe luz diretamente de uma fonte luminosa. Tomando por base a figura 101 é o que ocorre nos pontos P_1 e P_2 . Os raios de luz que emanam da fonte, percorrem o espaço e atingem de forma direta o ponto P_1 e P_2 . Nesses casos estamos diante do que chamamos de **iluminação direta**.

Ao atingir o ponto P_2 parte da energia luminosa pode ser refletida e atingir novamente o ponto P_1 . Esse raio de luz que não parte de uma fonte luminosa mais sim de outro objeto da cena faz parte do que denominamos **iluminação indireta**. Em um mundo real os objetos estão sujeitos sempre aos dois tipos de iluminação.

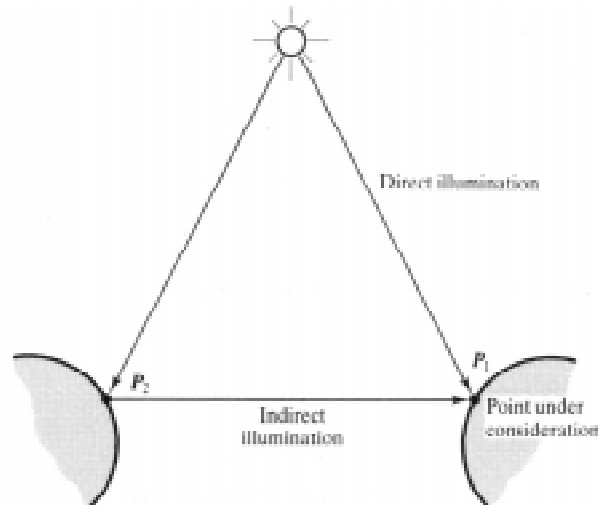


Figura 101 - Exemplo de iluminação direta e indireta.

A iluminação direta é relativamente simples de ser calculada, visto que depende unicamente da avaliação da fonte de luz e do objeto em questão. Já a luz indireta é muito mais complexa, pois é função do número de objetos da cena. Afinal todos os objetos podem contribuir indiretamente para a iluminação de um único ponto da superfície de um objeto.

O modelo de iluminação que apresentaremos a seguir irá levar em conta apenas a iluminação direta de uma cena. Modelos que pertencem a essa classe são denominados **modelos de iluminação local**. No capítulo VII apresentaremos um **modelo de iluminação global** (que irá levar em conta a iluminação indireta).

Modelo Físico

Um modelo de iluminação geral deve considerar todos os tipos de fenômenos que podem ocorrer com um raio de luz ao entrar em contato com a superfície de um objeto. A figura 102 representa essa situação. As possibilidades são :

Reflexão;

Em última análise a reflexão de um raio de luz na superfície de um objeto é o que permite que um observador enxergue esse objeto.

Transmissão;

Alguns materiais – tais como vidro, cristal, acrílico, água, etc – permitem que um raio de luz os atravesse. Esse tipo de interação está sujeito ao efeito da refração – passagem da luz de um meio para outro.

Absorção;

Cada material possui entre suas características a capacidade de reter determinados comprimentos de onda luminosa, convertendo essas frequências em outro tipo de energia (tipicamente térmica, e em alguns casos elétrica). A percepção da cor de um material se dá em função da sua capacidade de absorção. Por exemplo, se um material tem cor azul significa que é capaz de absorver todas as frequências da luz exceto aquela correspondente ao azul⁵. Portanto, todos os raios refletidos a partir desse material contém apenas ondas luminosas de frequência equivalente a cor azul.

Emissão.

Certos corpos quando aquecidos ou sujeitos a algum tipo de processo químico são capazes de emitir ondas luminosas.

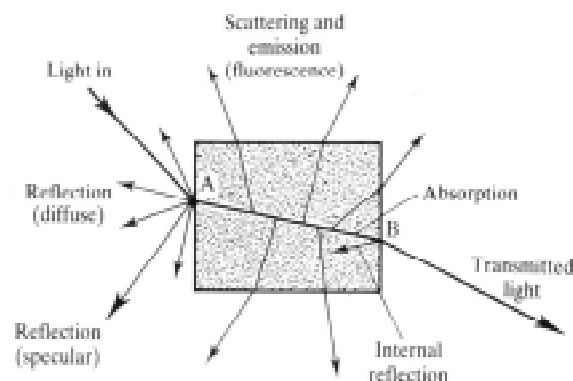


Figura 102 – Possíveis formas de interações entre um raio de luz e um objeto.

Um modelo que se proponha a representar todos esses tipos de interação torna-se bastante complexo, tanto do ponto de vista físico/matemático quanto do ponto de vista computacional. Como nosso objetivo principal é dar uma impressão “realista” as imagens de modelos sintéticos, podemos fazer algumas

⁵ Considerando que estamos usando um azul “puro”, ou seja, que possui apenas uma determinada frequência de onda correspondente ao azul.

suposições a respeito desses tipos de interação da luz e simplificar os requisitos do nosso modelo.

A primeira delas é quanto a emissão. Em geral a emissão, quando ocorre, é o tipo de interação predominante. Da mesma, poucos são os materiais capazes de, em condições normais, emitir ondas de luz. Resumindo, podemos simplificar nosso modelo considerando que os objetos ou são emissores, e nesse caso podem ser encarados apenas como tal (fontes luminosas) ou não irão possuir componente emissora (considerada desprezível).

Podemos considerar também que todos os nossos modelos serão constituídos de materiais opacos. Dessa forma não precisaremos, nesse momento, nos preocupar com a transmissão do material. Estaremos perdendo em poder de representação, mas ganhando em simplicidade / velocidade de processamento do modelo.

Por fim podemos associar a componente de absorção como uma função do material do objeto. Dessa forma, uma vez conhecido o material a componente absorção é constante para esse material.

A forma de interação restante é a reflexão. É com base nessa componente que somos capazes de enxergar os objetos, já que a imagem que se forma em nossa retina é resultado dos raios de luz refletidos pelos objetos.

Em resumo, iremos transformar o *modelo físico* em um *modelo de reflexão*. Historicamente essas simplificações fazem sentido, uma vez que os recursos computacionais necessários para se implementar modelos completos de iluminação eram proibitivos a maioria das aplicações a alguns anos atrás. Atualmente, com a popularização de placas aceleradoras 2D e 3D, diminuição do custo de memória e aumento na capacidade de processamento, muitas dessas barreiras foram quebradas. No entanto, esses modelos ainda se justificam quando queremos ter visualização interativa (em tempo real) de modelos complexos e com efeitos de iluminação.

Modelo de Reflexão Local

Nosso objetivo é formular um modelo que permita calcular a intensidade da luz refletida em um ponto da superfície de um objeto. Para isso vamos considerar uma fonte de luz pontual, que emite raios de luz uniformemente em todas as direções. Cada raio de luz tem intensidade I_r .

O motivo pelo qual dizemos que esse é um *modelo de reflexão local* é que iremos considerar para efeitos de sua formulação, apenas contribuições resultantes de iluminação direta. Interações entre objetos não serão levadas em consideração – de forma precisa – pelo nosso modelo.

Porém, não deixaremos de representar a componente de iluminação indireta. Utilizaremos uma aproximação que irá considerar que essa contribuição é uniforme em toda a cena.

A seguir vamos apresentar os três componentes nos quais o nosso modelo de reflexão local estará baseado.

Componente Ambiente

Conforme foi dito anteriormente um objeto pode ser iluminado direta ou indiretamente. Modelar a contribuição indireta de cada objeto da cena pode ser muito custoso. No entanto, uma forma simples de aproximar essa contribuição é considerá-la uma constante dentro da cena. Dessa forma iremos calcular um valor de intensidade luminosa que chega a todos os pontos de todos os objetos da cena de forma idêntica. A essa componente damos o nome de **componente de luz ambiente**, já que está representando a luz dispersa no ambiente, resultado das reflexões entre objetos.

O valor dessa componente é dado pela equação :

$$I_g = I_a \cdot k_a$$

onde I_g é a *intensidade de luz “global” ou indireta* que chega em um dado ponto da superfície do objeto, I_a é a *intensidade da luz ambiente* da cena e k_a é um valor definido no intervalo [0,1] denominado **coeficiente de reflexão ambiente**. Essa constante visa atenuar a contribuição da luz ambiente em função do material do objeto. Sua determinação é empírica (visual) e não tem qualquer correspondência com propriedades físicas reais dos materiais.

A componente ambiente sozinha não tem muita utilidade, já que o seu efeito equivale a aplicação de uma cor constante em todas faces do objeto (como na figura 1b). Sua principal função é, em composição com as demais componentes da luz refletida, permitir que haja alguma intensidade luminosa em locais onde não há incidência direta de luz.

Componente Difusa

Materiais foscos, sem brilho, como papel, giz, etc são denominados **refletores Lambertianos perfeitos**. A principal característica desse tipo de material é que ele reflete a luz incidente em todas as direções. Dessa forma não há noção de reflexo.

Nesse caso, a intensidade de luz refletida em uma direção particular é função apenas da orientação da superfície no ponto a ser analisado.

Para definirmos a orientação da superfície em um dado ponto P utilizamos um vetor ortogonal ao plano tangente a superfície em P . Esse vetor denominamos **vetor normal** N , como na figura 103.

Nessa mesma figura, temos um raio de luz proveniente de uma fonte pontual, que incide em na superfície de um objeto em um ponto. O vetor L , definido com base no ponto da superfície e na posição da fonte de luz, representa a direção do raio de luz incidente.

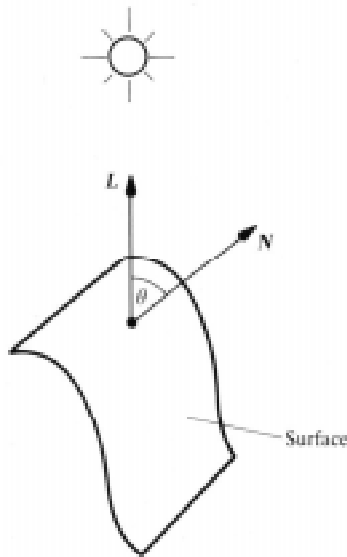


Figura 103 – Parâmetros relacionados com o cálculo da componente difusa da luz refletida em um ponto de uma superfície.

Um resultado básico da óptica geométrica é que a intensidade de luz refletida de forma difusa é proporcional ao ângulo que o raio de luz incidente forma com a normal à superfície em um dado ponto. Esse resultado é expresso pela **lei de Lambert**:

$$I_d = I_i \cdot k_d \cdot \cos(\theta) \quad (1)$$

Onde :

I_d é a intensidade da luz refletida,

I_i é a intensidade da luz incidente,

θ é o ângulo que o vetor normal faz com a direção do raio de luz incidente e

k_d é uma constante com valores no intervalo [0,1].

O valor de k_d é uma constante definida em função de cada tipo de material. A influência da constante k_d em uma imagem pode ser vista na figura 104.

Uma forma de aumentar a velocidade do cálculo da componente difusa é substituir o termo $\cos(\theta)$ por um produto escalar dos vetores L e N . Como sabemos o produto escalar é dado pela expressão :

$$L.N = |L|.|N|. \cos(\theta)$$

Como os dois vetores L e N podem ser considerados unitários⁶ temos que :

$$\cos(\theta) = L.N$$

Dessa forma podemos reescrever (1) como :

$$I_d = I_i.k_d.(L.N) \quad (2)$$

O produto escalar pode ser feito através de operações de soma e produto, enquanto que a função \cos em geral é implementada através de uma expansão de uma série, que é bem mais custoso que o produto escalar.

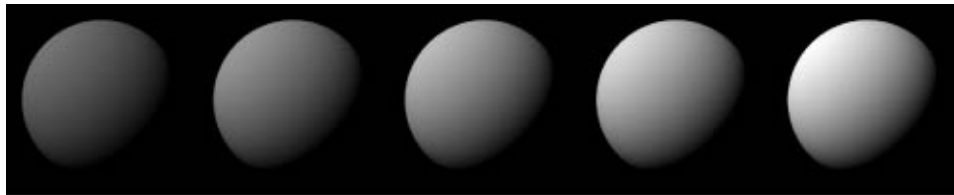


Figura 104 – Esferas iluminadas a partir da aplicação da equação (2). Para todas as esferas o valor de $I_i=1.0$. Da esquerda para a direita os valores de k_d são respectivamente 0.4, 0.55, 0.7, 0.85 e 1.0. (Foley et al.)

Na figura 105 podemos ver o efeito da composição das duas componentes definidas até o momento : ambiente e difusa. Na esfera mais à esquerda, onde temos somente a componente difusa, podemos observar que a região posterior da esfera, que não recebe iluminação direta, fica completamente escura. Conforme a componente ambiente é aumentada essa região passa a receber iluminação.

Vale lembrar novamente que o nosso objetivo (por enquanto) não é construir um modelo rigoroso do ponto de vista da física envolvida na iluminação de um objeto ou cena. Queremos obter um modelo o mais simples possível, mas que seja visualmente aceitável, ou seja, o resultado final visual seja capaz de

⁶ o que importa para o nosso modelo é a direção dos vetores e não seus módulos.

“enganar” o olho humano e dar a este a sensação de estar vendo algo próximo da realidade. E nesse sentido nosso modelo para a representação da componente difusa da luz refletida ainda apresenta uma falha.



Figura 105 – Esferas iluminadas com as componentes difusa e ambiente. Para todas as esferas temos $I_g=I_d=1.0$ e $k_d=0.4$. Da esquerda para a direita temos os valores de k_a assumindo os valores 0.0, 0.15, 0.30, 0.45 e 0.60 respectivamente. (Foley et al.)

Suponha que dois objetos estejam posicionados de forma idêntica em relação a uma fonte de luz (suas orientações sejam as mesmas), mas suas distâncias a essa fonte sejam diferentes. Nesse caso a aplicação da equação (2) irá gerar a mesma intensidade de luz para os dois objetos. Por quê ? Ora, em momento algum levamos em consideração o fato de que quanto mais distante um objeto da fonte de luz, menor será a intensidade da luz que ele recebe.

Para que essa característica possa ser levada em conta, basta acrescentarmos uma fator de atenuação que diminua a intensidade da luz incidente em função da distância da fonte ao objeto. Mas precisamente a atenuação da fonte é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o objeto. Levando-se em conta esse fator temos que :

$$I_d = f_{att} \cdot I_r \cdot k_d \cdot (L \cdot N) \quad (3)$$

O fator de atenuação f_{att} é usualmente expresso por :

$$f_{att} = 1 / d^2$$

onde d é a distância da fonte de luz ao objeto. Essa forma de cálculo, apesar de ser simples e intuitiva, não apresenta bons resultados na prática. Para objetos próximos a fonte de luz a variação de f_{att} é muito rápida, enquanto que para objetos a grandes distâncias da fonte a variação de f_{att} é muito pequena. Uma versão alternativa para o fator de atenuação f_{att} é :

$$f_{att} = 1 / (c_1 + c_2 \cdot d + c_3 \cdot d^2)$$

onde c_1 , c_2 e c_3 são constantes definidas pelo usuário em função das características de atenuação que este quer associar a uma dada fonte de luz.

O efeito obtido em um objeto quando esse tipo de fator de atenuação é aplicado pode ser observado na figura 106. Para cada esfera em uma dada linha temos a distância d variando. Em cada linha temos constantes os valores de c_1 , c_2 e c_3 . Na primeira linha o fator de atenuação equivale a expressão $1/d^2$, enquanto que na última linha esse mesmo fator pode ser reduzido a expressão $1/d$, em função das escolhas das constantes c_1 , c_2 e c_3 .

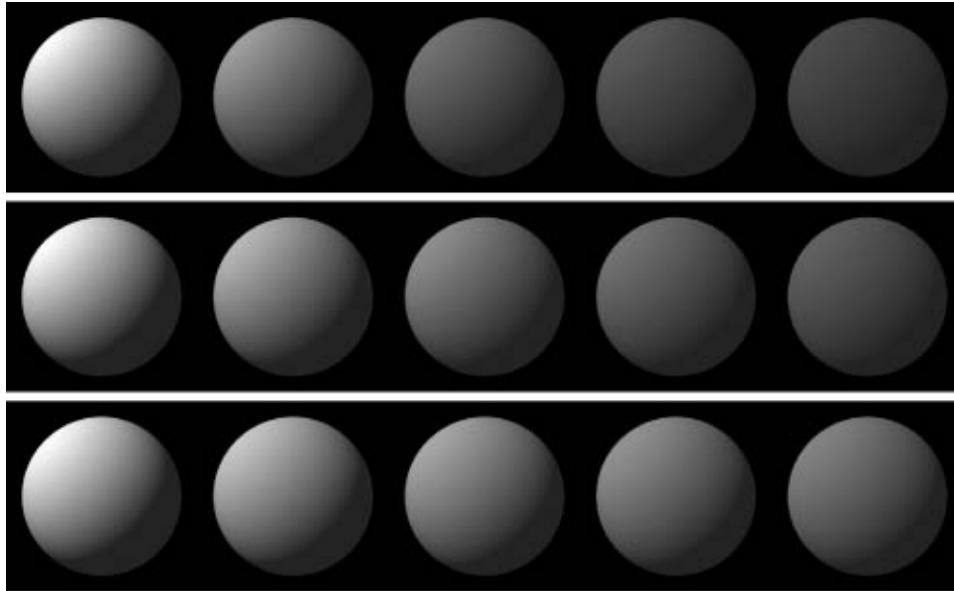


Figura 106 – Esferas iluminadas com as componentes ambiente e difusa da luz refletida. Para todas as esferas temos $I_g=I_d=1.0$ e $k_d=0.9$ e $k_a=0.1$. De cima para baixo temos os valores de (c_1, c_2, c_3) , que definem o fator de atenuação da componente difusa, assumindo os valores (em cada linha) : $(0.0, 0.0, 1.0)$, $(0.25, 0.25, 0.5)$ e $(0.0, 1.0, 0.0)$ respectivamente. Em cada coluna temos os valores de d assumindo os valores : $1.0, 1.375, 1.75, 2.125$ e 2.5 respectivamente. (Foley et al.)

Componente Especular

Certos materiais ao invés de refletir a luz incidente em todas as direções – como as superfícies Lambertianas – refletem a luz em uma única direção. Esse tipo de superfície é chamada de “**espelho perfeito**”. A componente de luz refletida nesse caso é dita **especular**.

Superfícies que possuem componente especular, mas não são espelhos perfeitos refletem a luz segundo uma direção preferencial. Nessa direção temos a intensidade de luz refletida (de forma especular) máxima. Conforme nos afastamos dessa direção, a intensidade de luz refletida especular diminui.

Como essa componente define uma direção na qual os raios de luz refletidos seguem, devemos levar em consideração a posição do observador no cálculo da sua intensidade.

Considere a figura 107. Da óptica geométrica temos que o **ângulo de incidência** θ (formado pelos vetores L e N), deve ser igual ao **ângulo de reflexão** (formado pelos vetores R e N). Portanto com esse resultado podemos calcular qual será a direção em que a luz refletida especular será máxima.

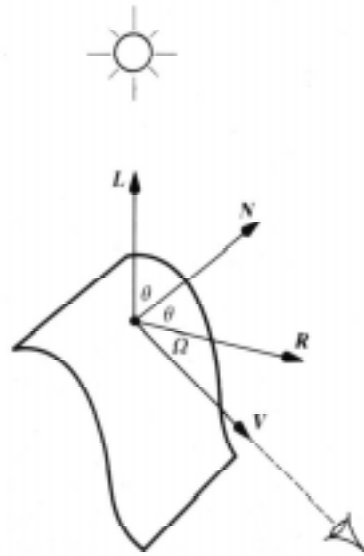


Figura 107 – Parâmetros relacionados com o cálculo da componente especular da luz refletida em um ponto de uma superfície.

No entanto o que precisamos saber é, em relação a essa direção máxima, onde se localiza o observador. Na figura 107 podemos ver que essa medida será dada pelo ângulo Ω (definido pelos vetores R e V). Quanto maior o valor de Ω menor será a intensidade da componente especular na direção V do observador.

A expressão matemática que representa esse modelo é dada por :

$$I_e = I_r \cdot k_e \cdot \cos^n(\Omega) \quad (4)$$

O valor de k_e , a semelhança de k_d no modelo de reflexão difusa, é uma constante definida em função de cada tipo de material. Podemos observar o efeito de sua variação na figura 108 – em cada linha o valor de k_e é constante.

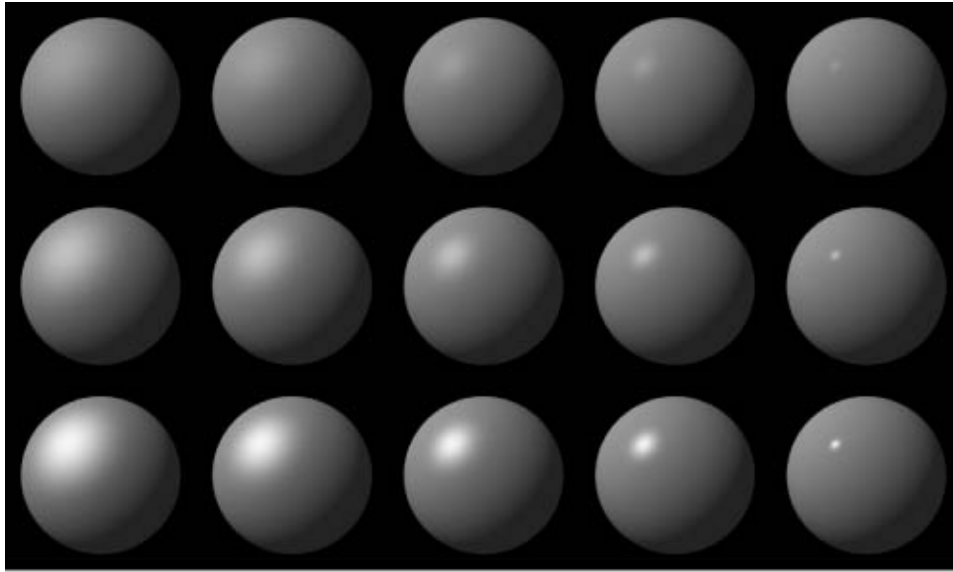


Figura 108 - Esferas iluminadas com as componentes ambiente, difusa e especular da luz refletida. Para todas as esferas temos $I_g=I_d=I_e=1.0$ e $k_d=0.45$ e $k_a=0.1$. Da esquerda para a direita temos os valores do expoente n da equação 4 assumindo os valores (em cada coluna) : 3.0, 5.0, 10.0 27.0 e 200.0 respectivamente. Em cada linha temos os valores de k_e assumindo os valores : 0.1, 0.25 e 0.5 respectivamente. (Foley et al.)

Tal como foi feito para a componente difusa, podemos substituir o termo $\cos^n(\Omega)$ pelo produto escalar dos vetores \mathbf{R} e \mathbf{V} . Dessa forma a expressão da luz refletida pode ser escrita como :

$$I_e = I_r \cdot k_e \cdot (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n \quad (5)$$

A função do expoente n associado ao $\cos(\Omega)$ é produzir o efeito de atenuação da intensidade da luz refletida. Analisando o comportamento da função \cos em relação ao expoente n temos os gráficos da figura 109. Podemos observar que quanto maior o expoente mais rapidamente o valor da função tende a zero.

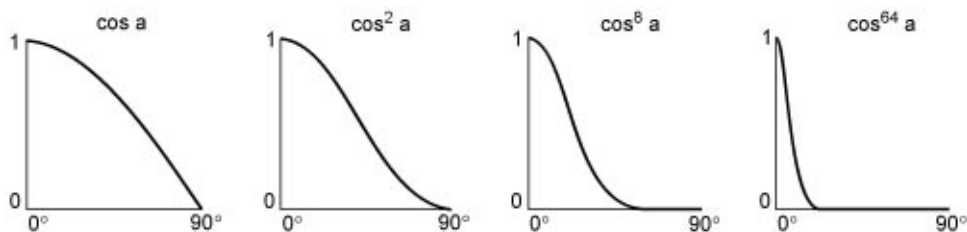


Figura 109 - Variação da função $\cos^n(a)$, no intervalo $[0^\circ, 90^\circ]$, em relação ao valor do expoente n .

O efeito que esse expoente produz na avaliação da componente refletida especular pode ser visto na figura 110. Quanto maior o expoente mais rápido a intensidade da luz refletida especular diminui, conforme o observador se afasta da direção de reflexão especular máxima. Na figura 110a temos um valor de n maior que na figura 110b.

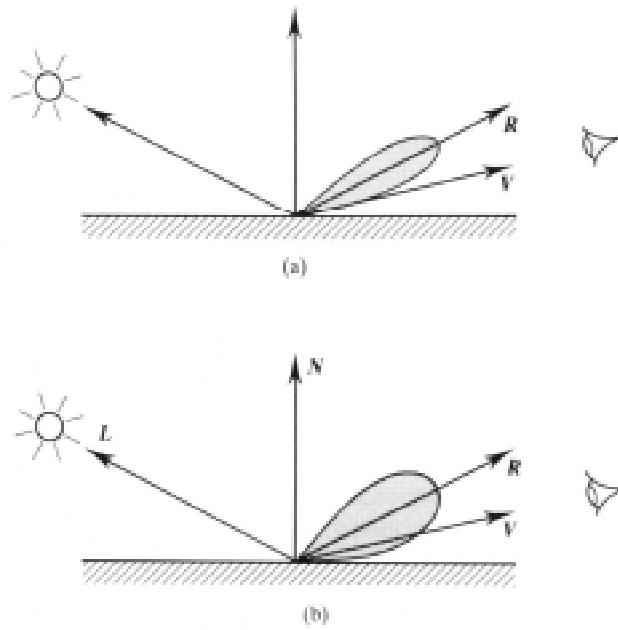


Figura 110 – Efeito da variação do expoente n no termo $\cos(\Omega)$ da expressão (3).

Composição da Componentes

Uma vez definidos os componentes do nosso modelo de reflexão, temos agora que compo-los. Dessa forma teremos um modelo geral para o cálculo da intensidade da luz refletida. Esse modelo composto foi primeiro proposto por Phong e por isso é usualmente denominado **modelo de reflexão de Phong**.

Dada uma fonte de luz de intensidade I_i o valor da intensidade refletida I_r será a dado pela composição das componentes difusa, especular e ambiente, ou seja :

$$I_r = I_g + I_d + I_e = I_a \cdot k_a + I_i (k_d \cdot \cos(\theta) + k_e \cdot \cos^n(\Omega)) \quad (6)$$

O gráfico da função que representa a distribuição da intensidade de luz refletida a partir de um ponto P , dado um raio de luz incidente na direção L , pode ser visto na figura 111. Nesse gráfico temos de forma clara a composição da

reflexão difusa com a especular. Quanto mais afastado um observador estiver da direção de reflexão especular máxima maior a tendência a componente difusa ser predominante. Nessa figura podemos ver novamente o efeito do expoente n na variação dessa função.

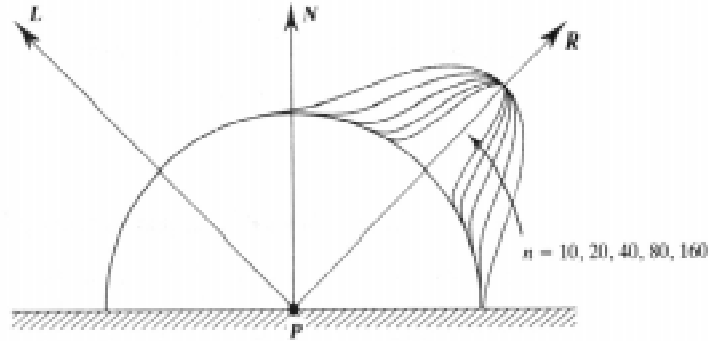


Figura 111 – Função de distribuição da intensidade da luz refletida visão de um corte bidimensional.

A participação da luz ambiente só faz com que o gráfico seja “expandido”, já que sua contribuição é constante em todas as direções em todos os pontos.

Na figura 112 podemos observar essa mesma função vista em sua forma tridimensional.

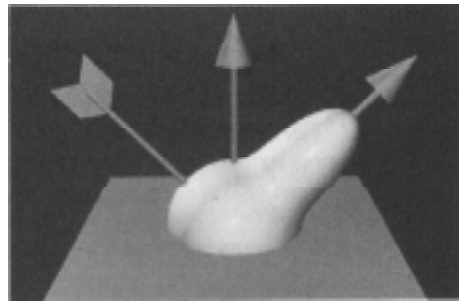


Figura 112 – Visualização da função de distribuição luminosa em 3D.