

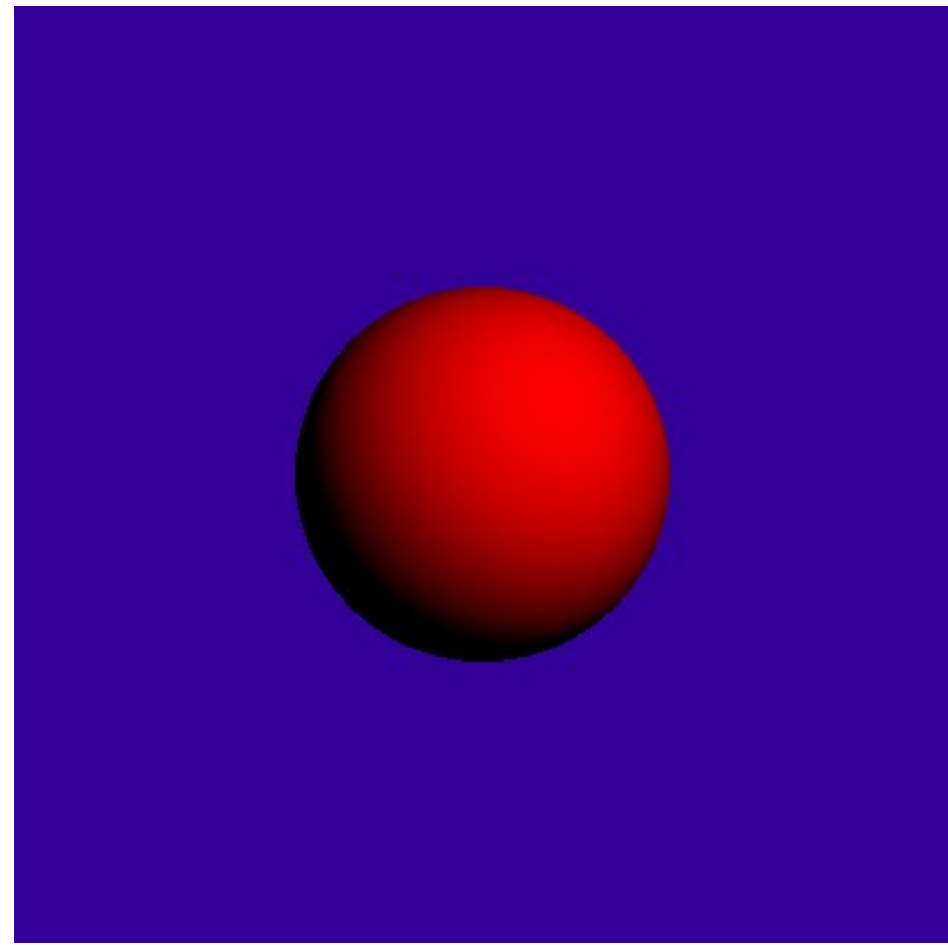
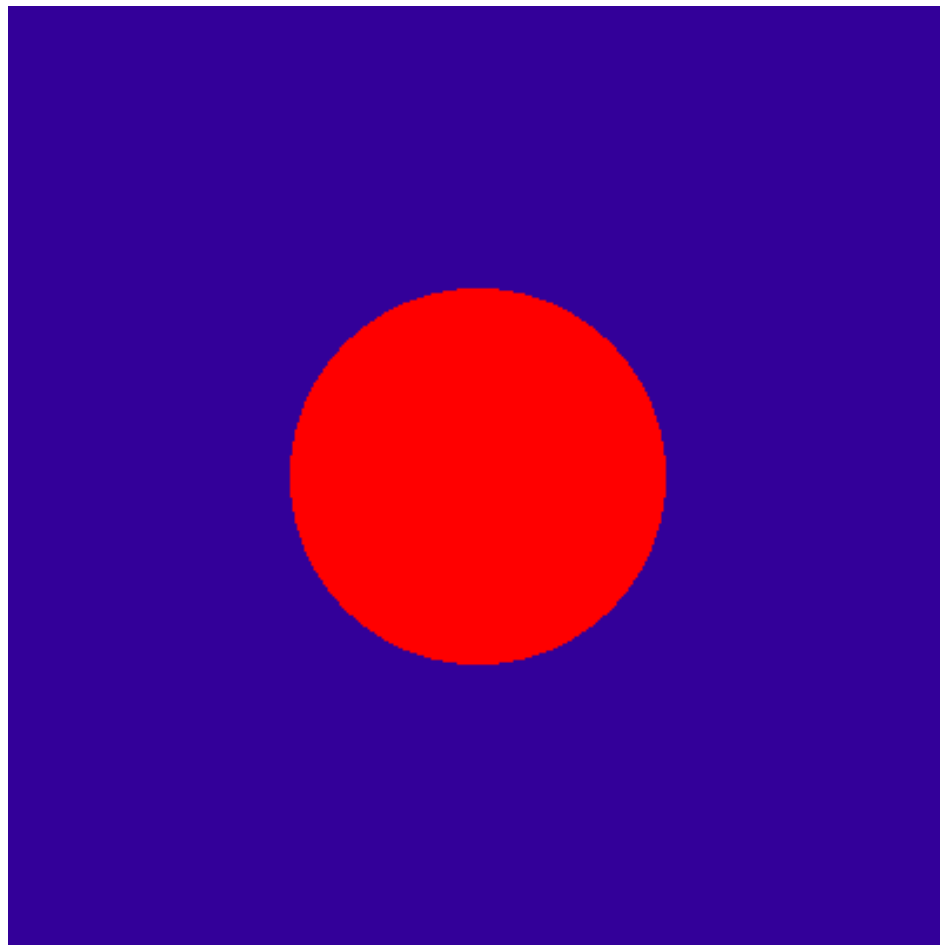
Computação Gráfica

Modelos de Iluminação

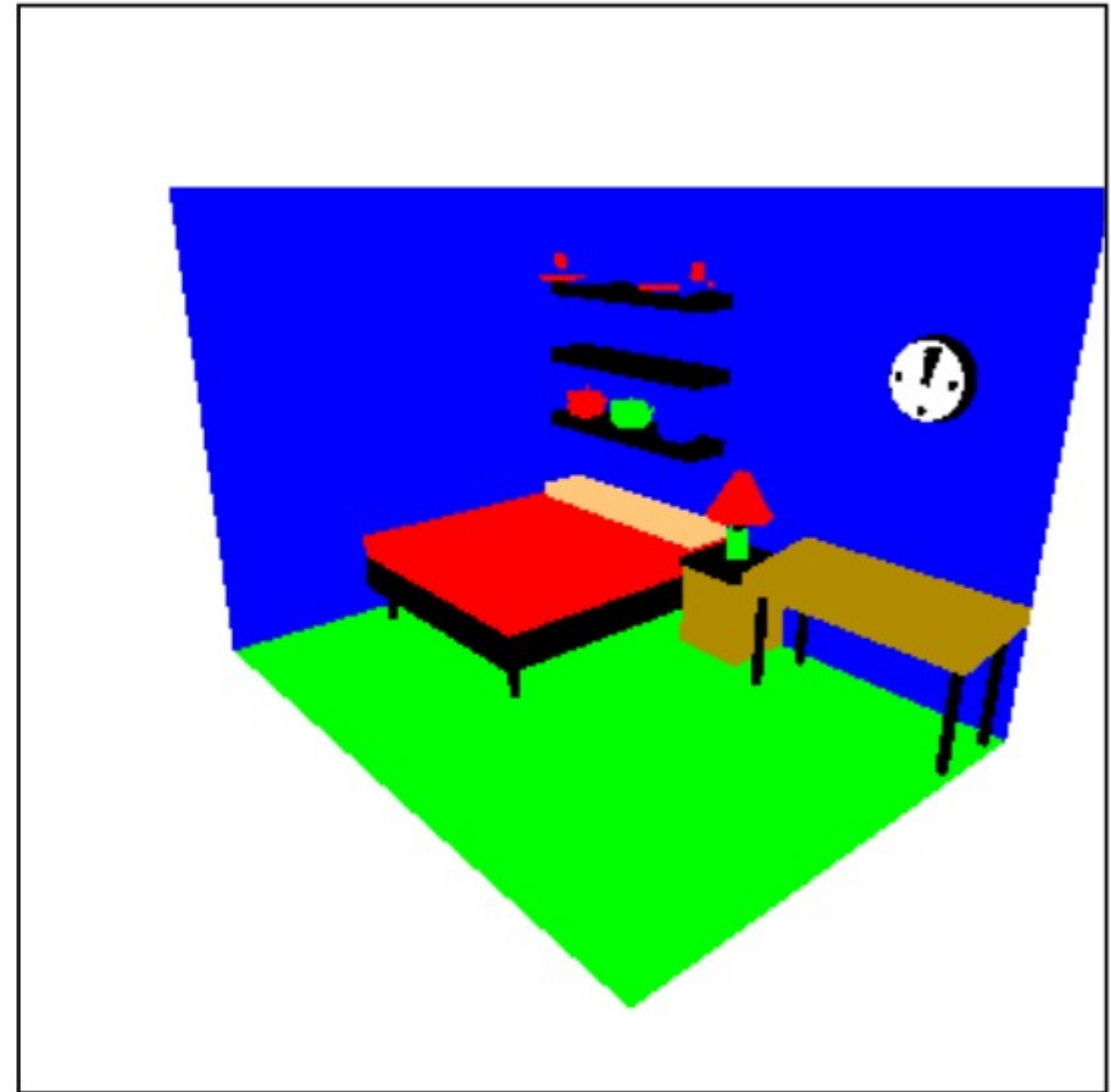
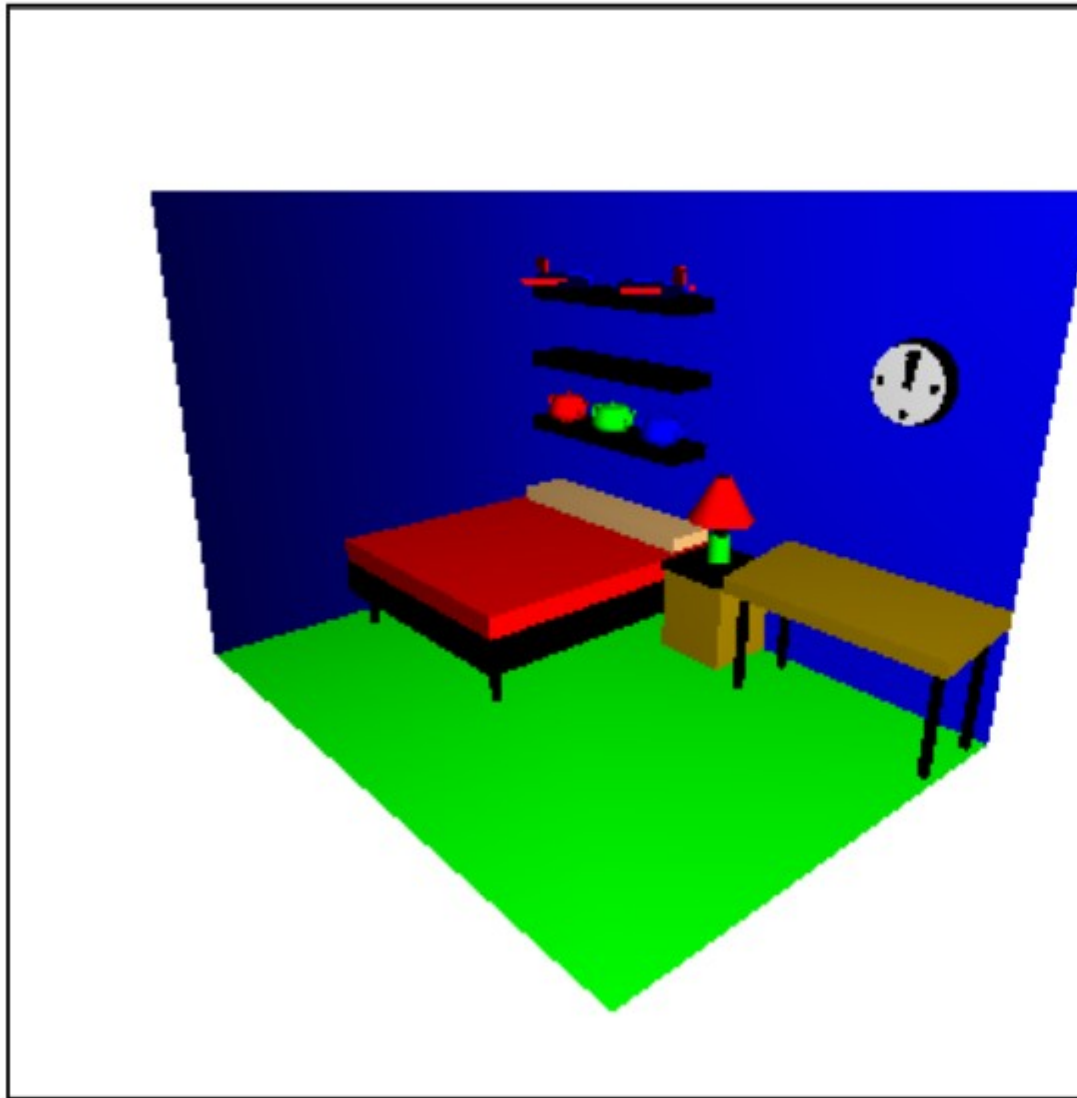
Moisés Henrique Ramos Pereira

Por que Iluminação?

- Sem efeitos de iluminação, nenhum objeto parece estar em 3D.

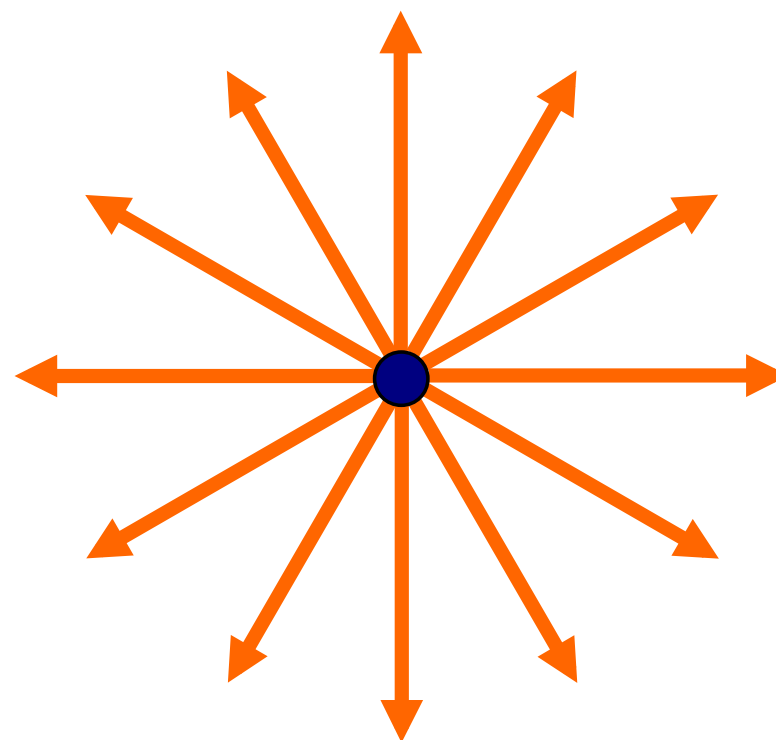


Por que Iluminação?



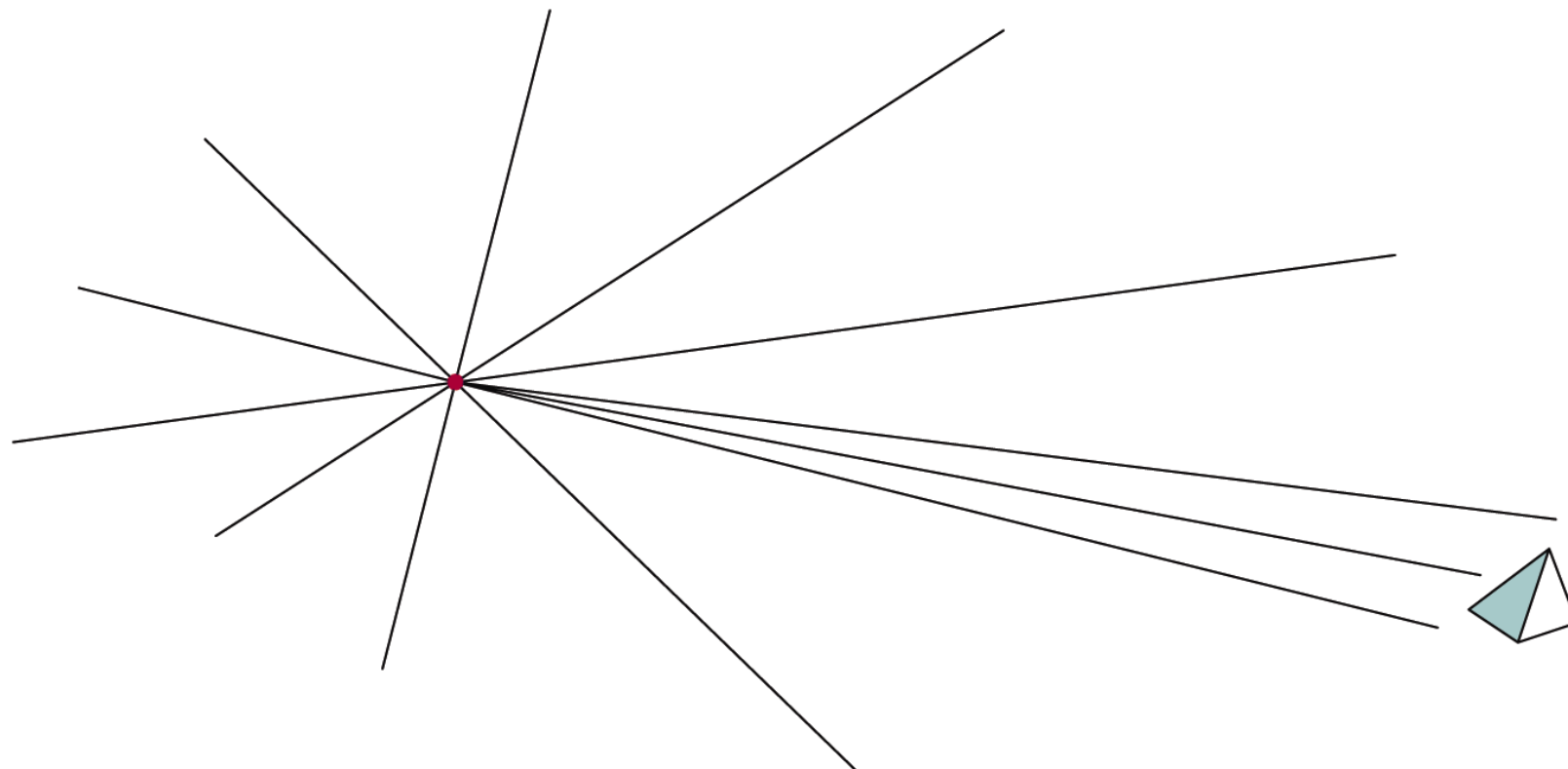
Fontes de Luz Pontuais

- Uma fonte de luz pontual é o modelo mais simples para fonte de luz.
- Basta definir:
 - a posição da fonte de luz
 - os valores RGB da cor da luz
- Luz é emitida em todas as direções.
- Muito utilizada quando a fonte de luz possui dimensões reduzidas quando comparadas aos objetos da cena.



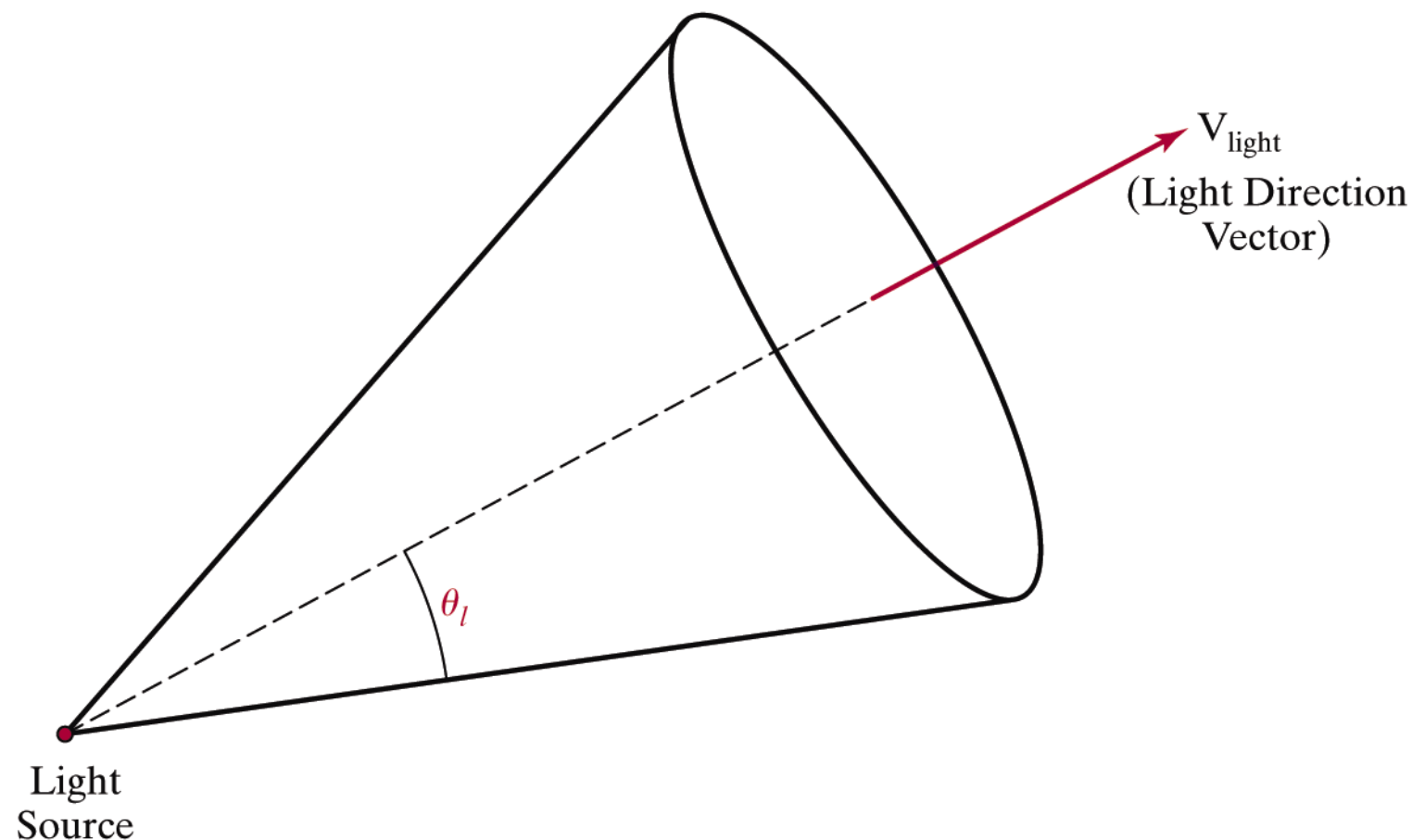
Fontes de Luz no Infinito

- Uma grande fonte de luz, como o Sol por exemplo, pode ser modelada como uma fonte de luz pontual.
- a fonte de luz no infinito ilumina a cena a partir de uma direção.
- o caminho entre a fonte emissora e qualquer ponto da cena é praticamente constante.



Fontes de Luz Direcionais (*Spotlights*)

- Uma fonte de luz local pode ser facilmente convertida em um raio de luz direcional ou um *spotlight*.
 - basta adicionar um vetor direção e um limite angular à fonte de luz.

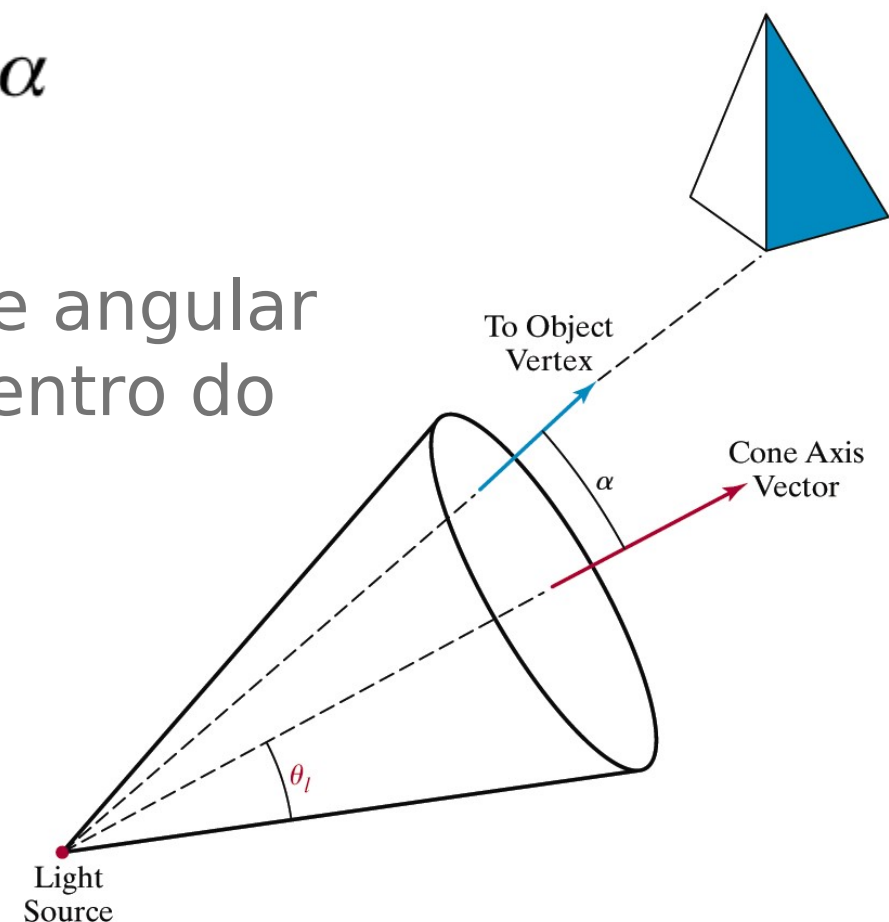


Fontes de Luz Direcionais (*Spotlights*)

- Podemos denotar \mathbf{V}_{light} como o vetor unitário na direção da fonte de luz e \mathbf{V}_{obj} como o vetor unitário da fonte de luz até o objeto:
- o produto interno ou escalar de ambos nos fornece o cosseno do ângulo entre os vetores:

$$\mathbf{V}_{obj} \cdot \mathbf{V}_{light} = \cos \alpha$$

- se este ângulo estiver dentro do limite angular da fonte de luz, então o objeto está dentro do *spotlight*.



Atenuação radial de intensidade

- À medida que a luz se afasta da fonte emissora, sua intensidade vai diminuindo.
- A qualquer distância d_1 da fonte emissora, a intensidade diminuir por um fator inversamente proporcional ao quadrado da mesma $= 1/d^2$.
 - resultados realistas devem considerar o fator de atenuação.
- O fator $1/d^2$ no entanto, nem sempre produz bons resultados: um outro fator é necessário.
 - o fator $1/d^2$ produz muita variação de intensidade quando objetos estão muito próximos à fonte emissora, e pouca variação quando a está longe da fonte emissora.

Atenuação radial de intensidade

- É utilizada então, uma função quadrática inversa com a seguinte forma:

$$f_{radatten}(d_l) = \frac{1}{a_0 + a_1 d_l + a_2 d_l^2}$$

- onde os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 podem ser ajustados de forma a criar resultados de atenuação ótimos.
- A atenuação radial não pode ser aplicada quando a fonte de luz se encontra no “infinito”, pois o fator torna-se indeterminado.
- neste caso o fator é ajustado para 1.0.

Atenuação Angular de Intensidade

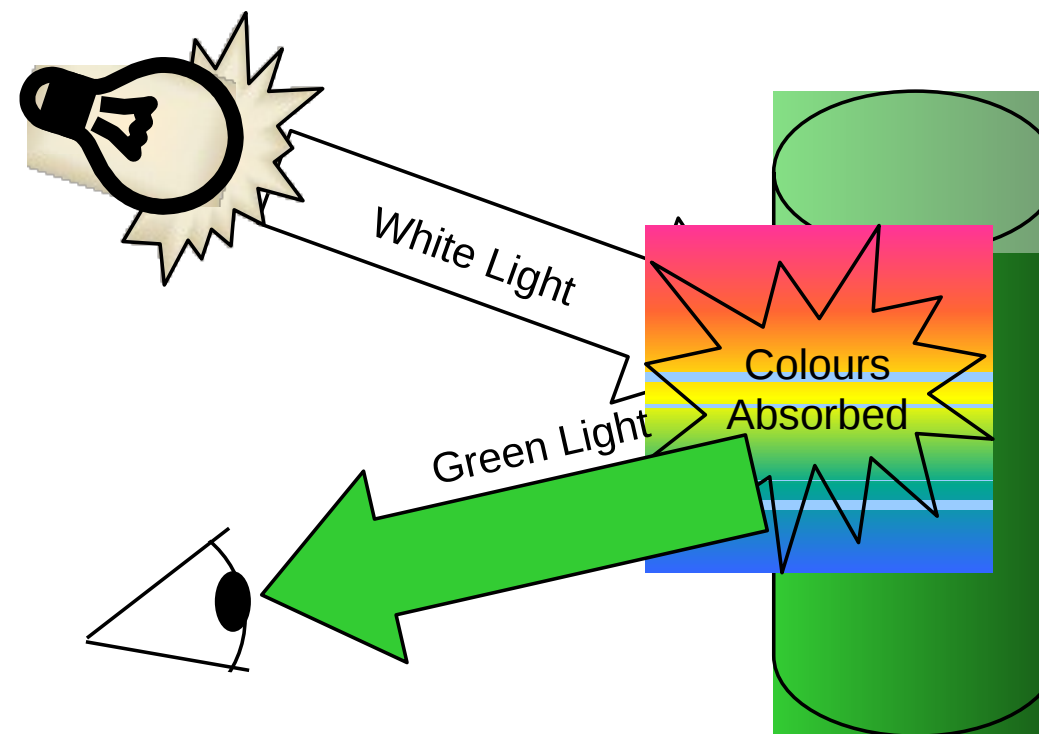
- Assim como a intensidade da luz diminui à medida que vamos nos afastando da fonte emissora, ela também diminui angularmente.
 - isto é, à medida que nos afastamos do eixo do cone do *spotlight*, a intensidade da luz diminui.
- Uma função comum no cálculo da atenuação angular de intensidade é dada por:

$$f_{angatten}(\phi) = \cos^{a_l} \phi \quad 0^\circ \leq \phi \leq \theta$$

- onde ao expoente de atenuação a_l é atribuído um valor positivo e o ângulo ϕ é medido a partir do eixo do cone.

Luz Refletida

- As cores que percebemos nos objetos são determinadas pela natureza da luz que é refletida pelos mesmos.
- Por exemplo, se uma luz branca é apontada a um objeto verde, a maioria das dos comprimentos de luz são absorvidos pelo objeto enquanto que o comprimento de onda verde é refletido.

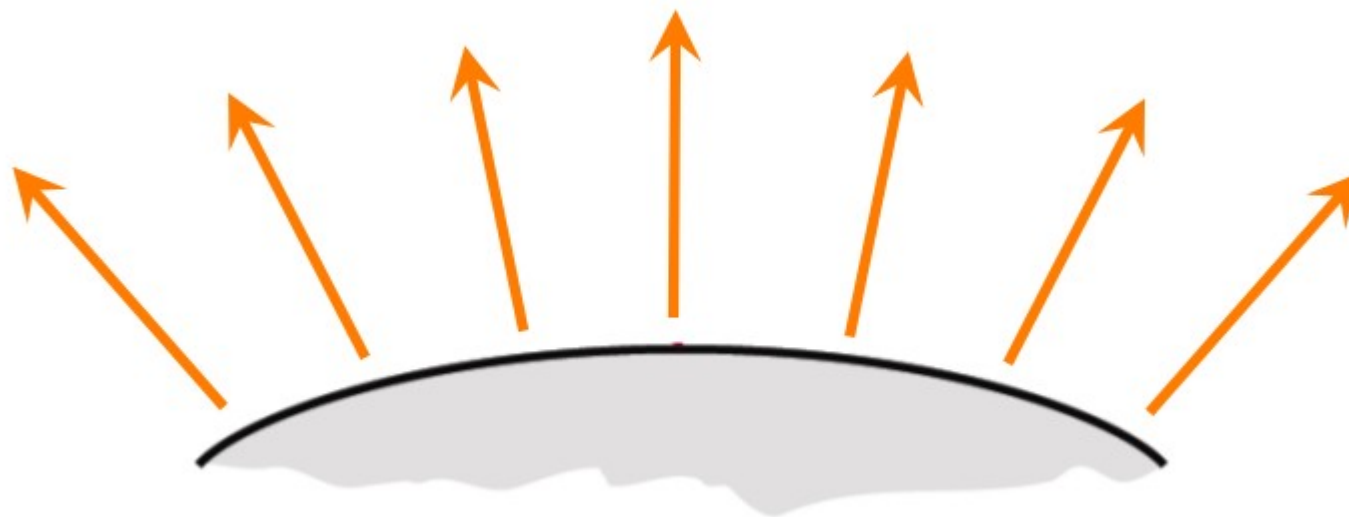


Efeitos de Iluminação de Superfície

- A quantidade de luz incidente que é refletida por uma superfície depende do material da mesma.
- Materiais brilhantes refletem maior quantidade de luz incidente. Já superfícies foscas absorvem maior quantidade de luz incidente.
- Já para superfícies transparentes, alguma quantidade de luz é também transmitida através do material.

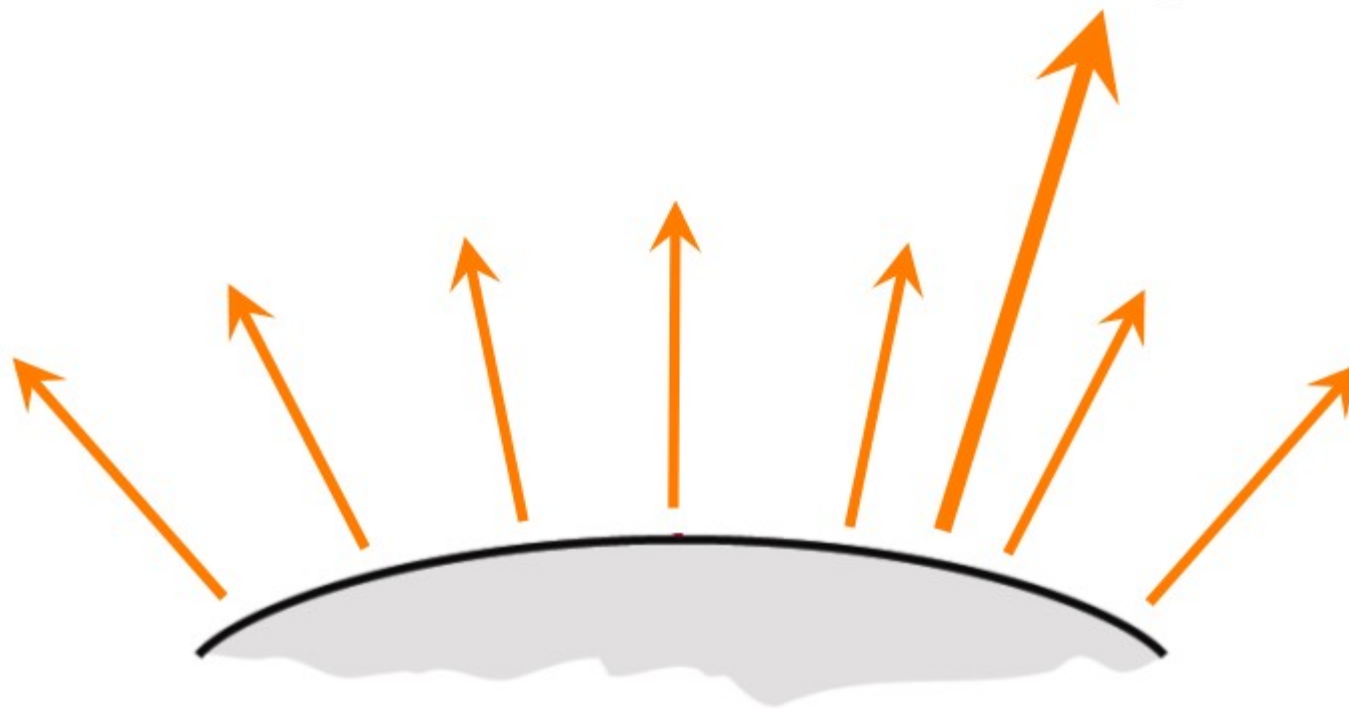
Reflexão Difusa

- Superfícies ásperas ou granuladas possuem tendência em refletir a luz para todas as direções.
- a esta luz espalhada é dado o nome de reflexão **difusa**.



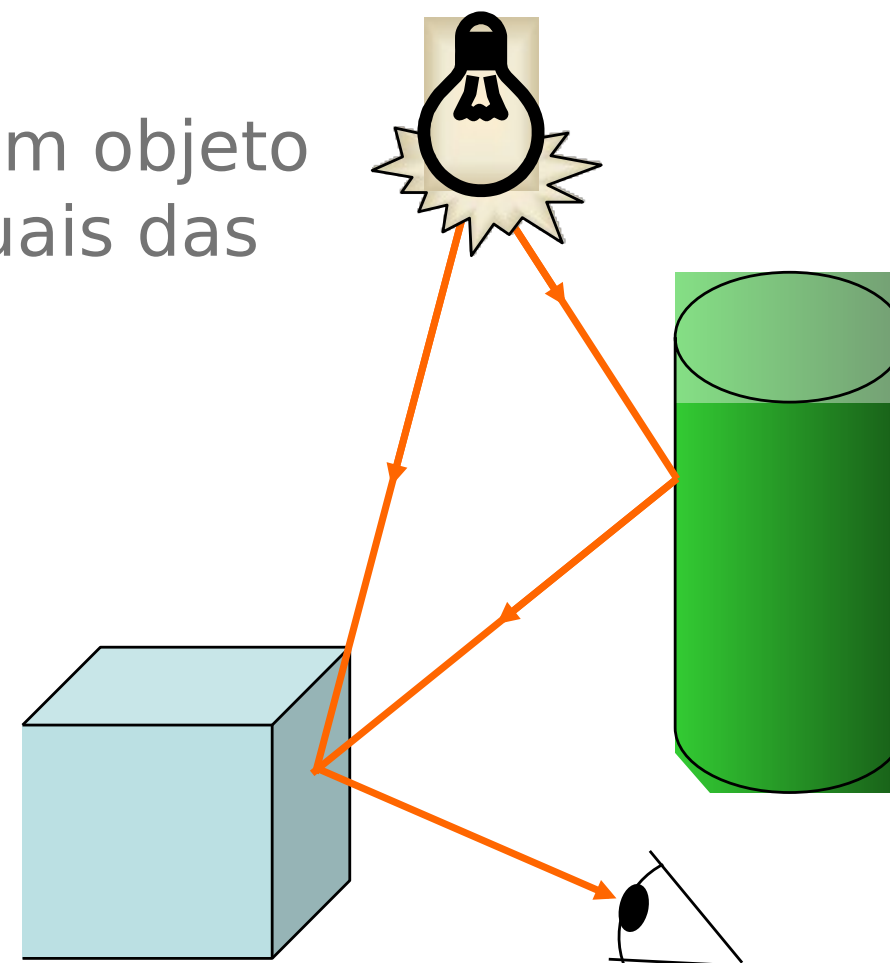
Reflexão Especular

- Além da reflexão difusa, uma quantidade de luz refletida pode se concentrar em um ponto ou região brilhante.
- a esta característica é dado o nome de reflexão especular.

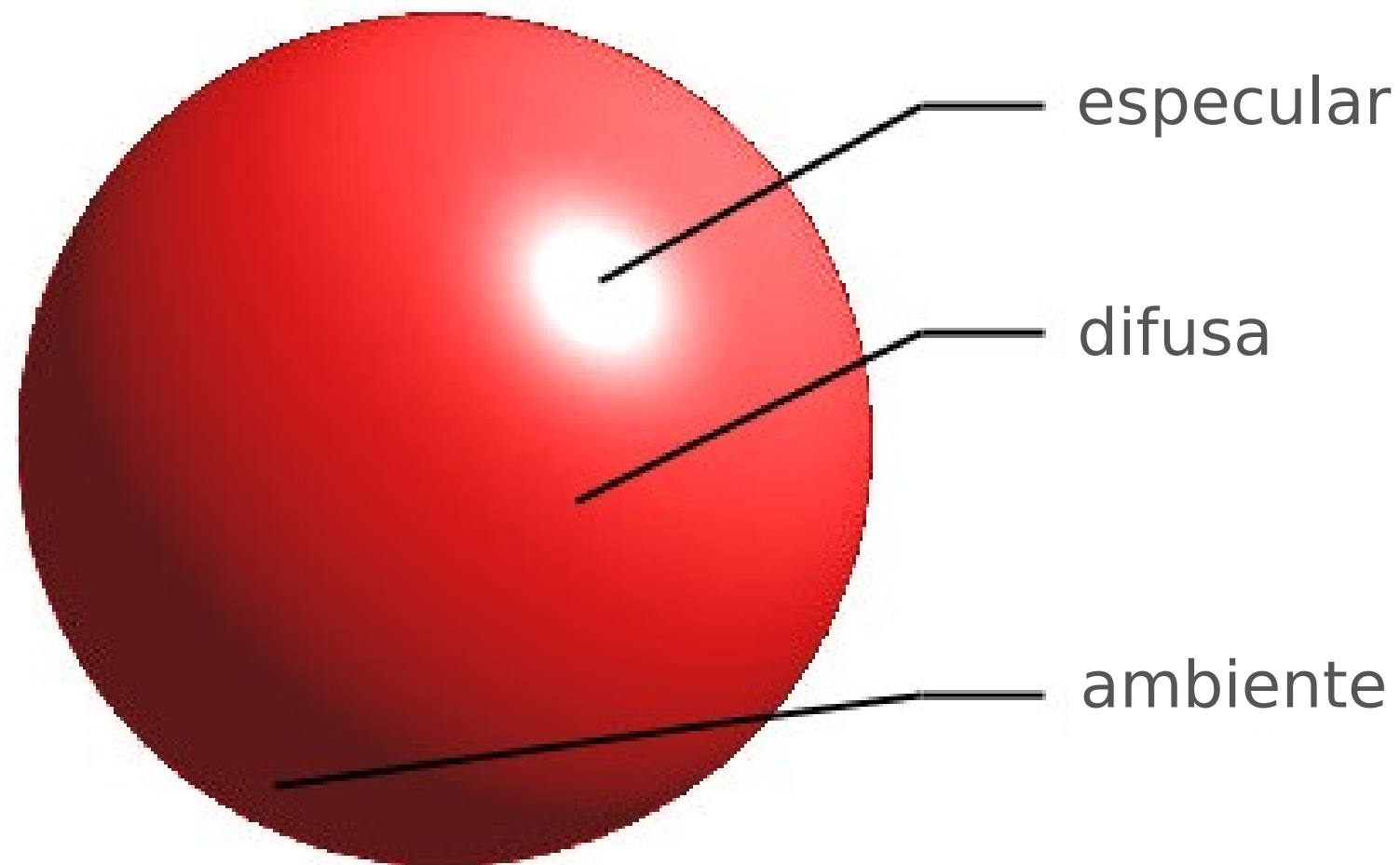


Luz Ambiente

- Uma superfície que não esteja diretamente exposta a uma fonte de luz, ainda assim pode ser iluminada por reflexões originadas de superfícies próximas que são iluminadas.
- caracterizando o que é conhecido como **luz ambiente** ou **luz de fundo**.
- a quantidade total de luz refletida por um objeto é o somatório das contribuições individuais das fontes de luz e da luz ambiente.



Reflexão Difusa / Especular e Luz Ambiente

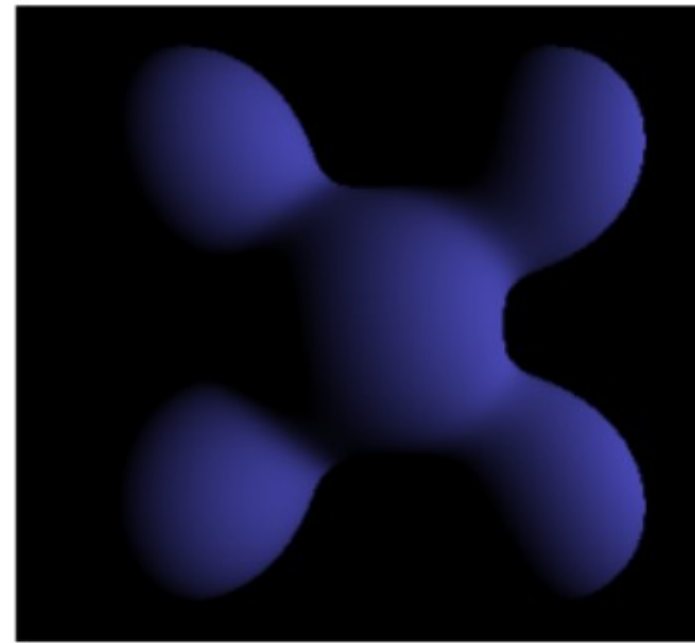


Reflexão Difusa / Especular e Luz Ambiente

ambiente



difusa



especular

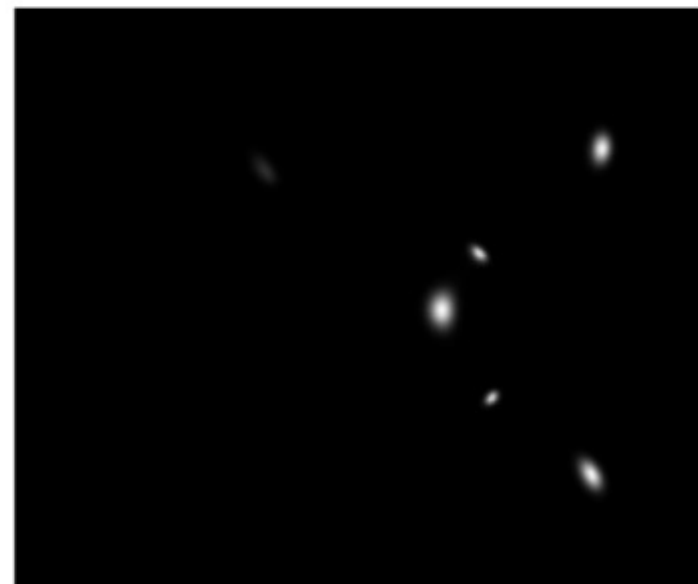
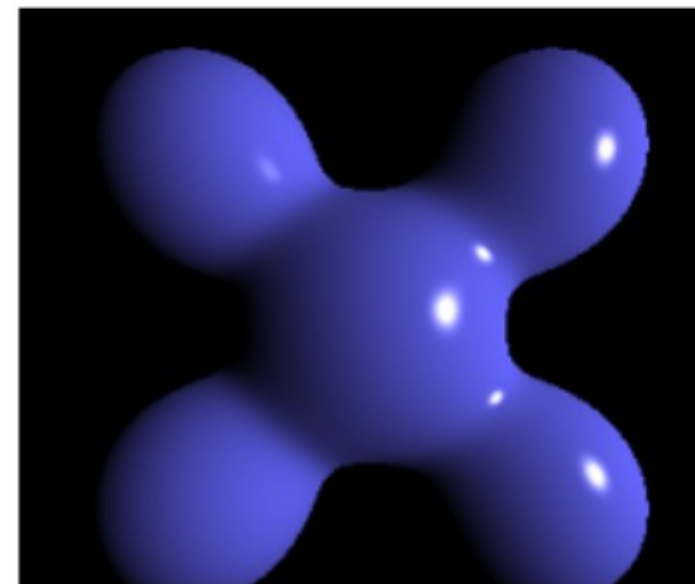


imagem
final



Modelo de Iluminação Básico

- Vamos considerar um **modelo de iluminação básico** que produz resultados razoáveis e é utilizado na maioria das bibliotecas gráficas.
- Os componentes importantes do modelo são:
 - luz ambiente
 - reflexão difusa
 - reflexão especular
- Na maioria das vezes será considerado apenas luz monocromática.

Luz Ambiente

- Para incorporar luz ambiente ao modelo simplificado, é definido um **nível geral de brilho** para a cena:
 - este nível aproxima o valor da reflexão difusa global das várias superfícies que compõem a cena.
 - e é denotado por I_a .
- Cada superfície da cena é iluminada com esta luz de fundo.
- As reflexões devido à luz ambiente são do tipo difusa e são independentes da direção de visualização e da orientação da superfície.

Reflexão Difusa

- Inicialmente é assumido que todas superfícies refletem a luz incidente com igual intensidade em todas as direções.
 - isto é, considerados as superfícies como **refletores ideais**, também chamados de **refletores Lambertianos**.
- Um parâmetro k_d é atribuído a cada superfície da cena de tal forma que ele determina a fração de luz incidente que será espalhada como reflexão difusa da superfície.

Reflexão Difusa

- O parâmetro k_d é conhecido como **coeficiente de reflexão difusa** ou **reflexividade difusa**.
- Ao coeficiente de reflexão difusa são atribuídos valores reais dentro do intervalo $[0.0, 1.0]$, em que
 - 0.0 = superfícies opacas que absorvem toda a luz incidente.
 - 1.0 = superfícies brilhantes que refletem toda a luz incidente.

Reflexão Difusa - Luz Ambiente

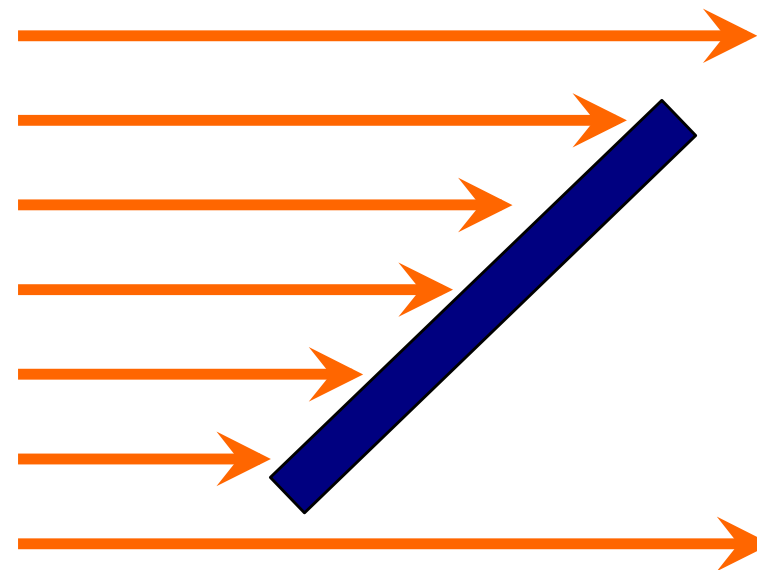
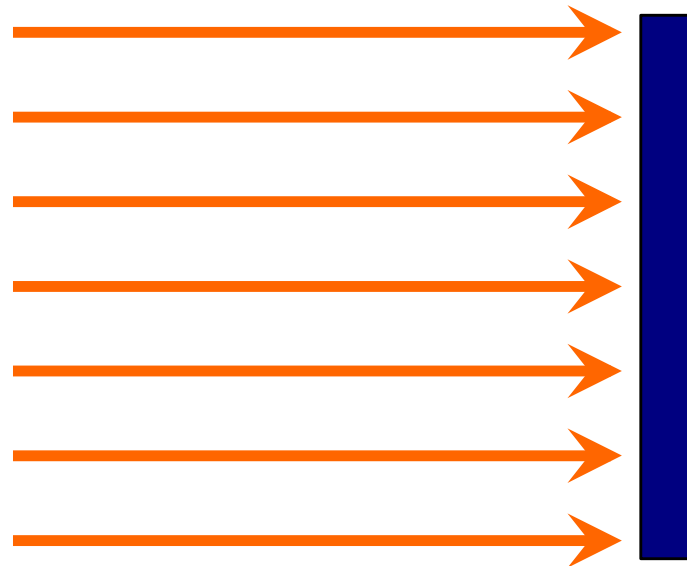
- Para efeitos de iluminação ambiente pode ser assumido que cada superfície é completamente iluminada pela luz ambiente I_a .
- Assim, a contribuição do ambiente para a reflexão difusa é dada por:

$$I_{ambdif} = k_d I_a$$

A iluminação ambiente por si só não é interessante, sendo necessário, portanto, outras fontes de luz na cena.

Reflexão Difusa - Incidente

- Quando uma superfície é iluminada por uma fonte de luz, a quantidade de luz incidente depende da orientação da superfície com relação à direção da fonte de luz.



Reflexão Difusa - Incidente

- O ângulo formado entre a direção da luz incidente (L) e a normal da Superfície (N) é referenciado como o **ângulo de incidência** θ entre L e N

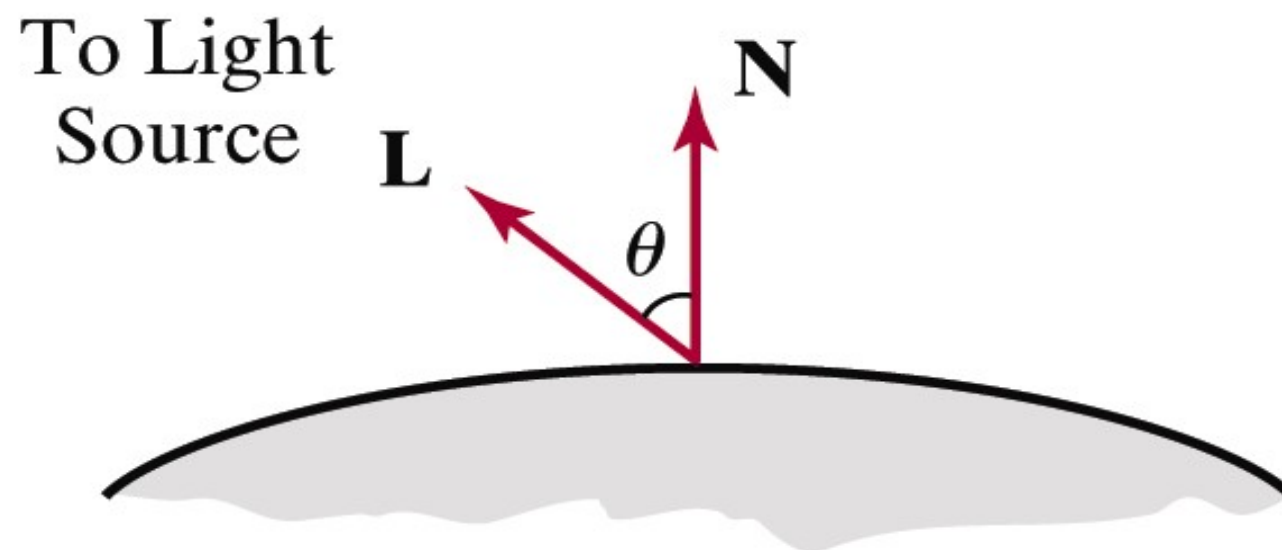


Figure 10-13

Angle of incidence θ between the unit light-source direction vector **L** and the unit normal vector **N** at a surface position.

Reflexão Difusa - Incidente

- Assim, a quantidade de luz incidente em uma superfície é dada por

$$I_{l,incidente} = I_l \cos \Theta$$

- e a reflexão difusa, com relação à luz incidente, pode ser modelada da seguinte forma:

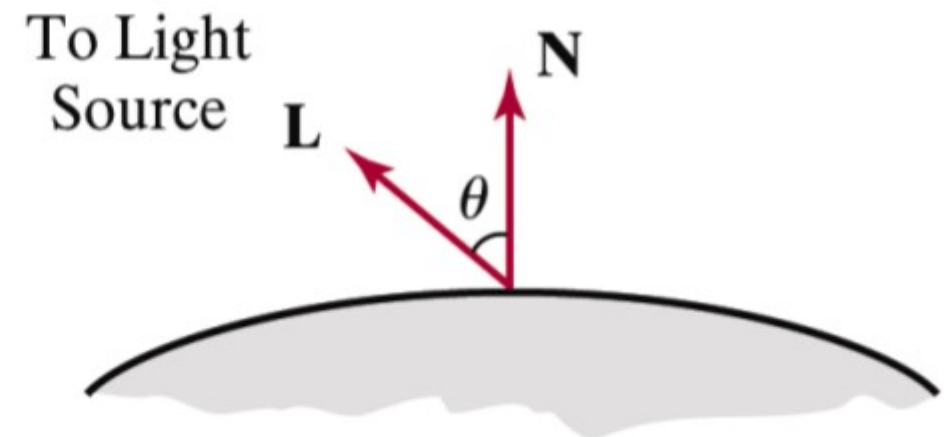
$$\begin{aligned} I_{l,dif} &= k_d I_{l,incidente} \\ &= k_d I_l \cos \Theta \end{aligned}$$

Reflexão Difusa - Incidente

- Denotando a normal da superfície por **N** e o vetor direcional unitário que aponta para a fonte de luz por **L**, temos:

$$N \cdot L = \cos \theta$$

- e assim:



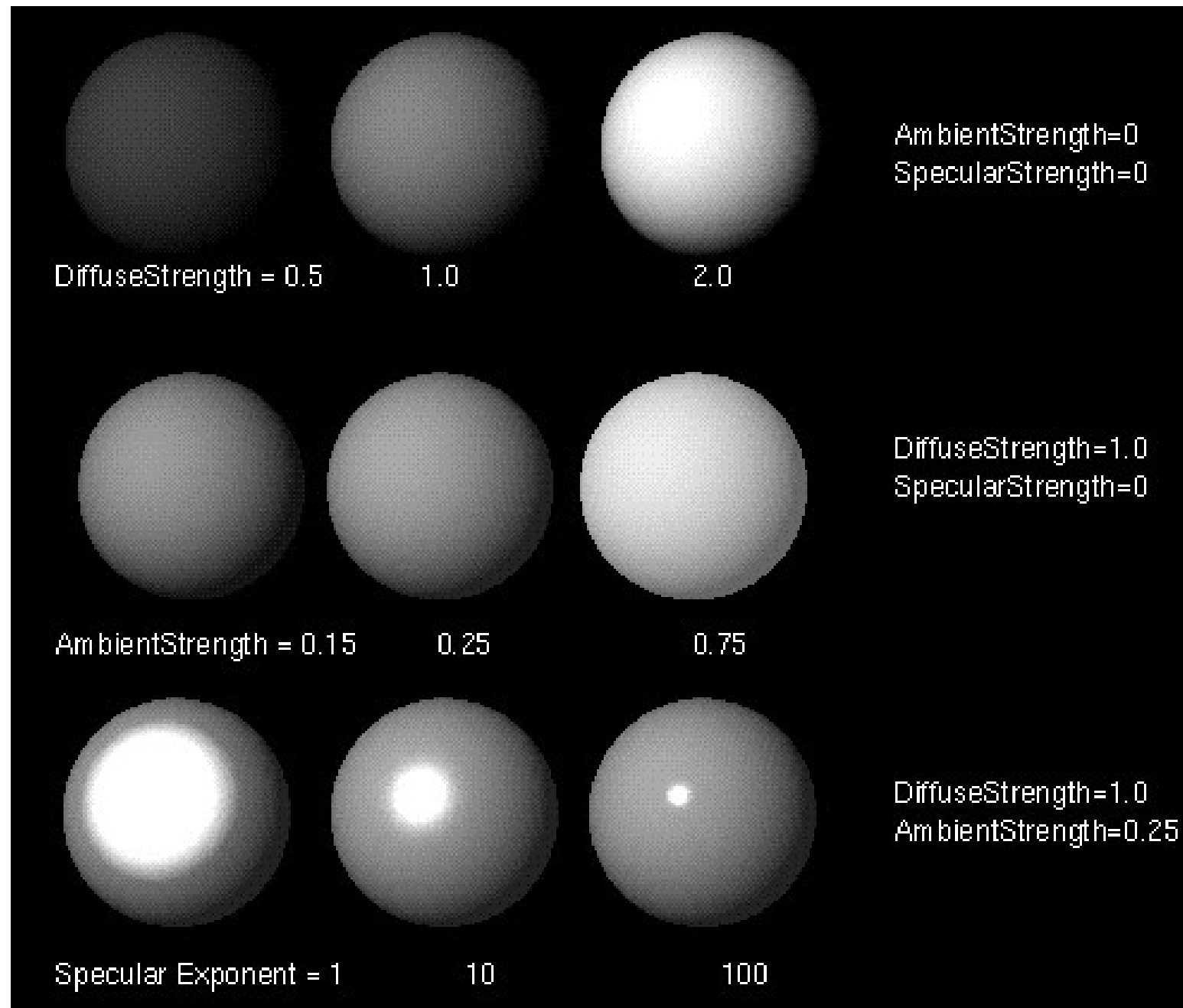
$$I_{l,dif} = \begin{cases} k_d I_l (N \cdot L) & \text{if } N \cdot L > 0 \\ 0 & \text{if } N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

Combinando Reflexão Difusa Incidente e Ambiente

- Para combinar as reflexões difusas provenientes da luz ambiente e da luz incidente, a maioria dos pacotes e bibliotecas gráficos utilizam dois coeficientes de reflexão difusa:
 - k_a para luz ambiente
 - k_b para luz incidente
- A equação da reflexão difusa total de uma única fonte de luz pontual pode, então, ser escrita como:

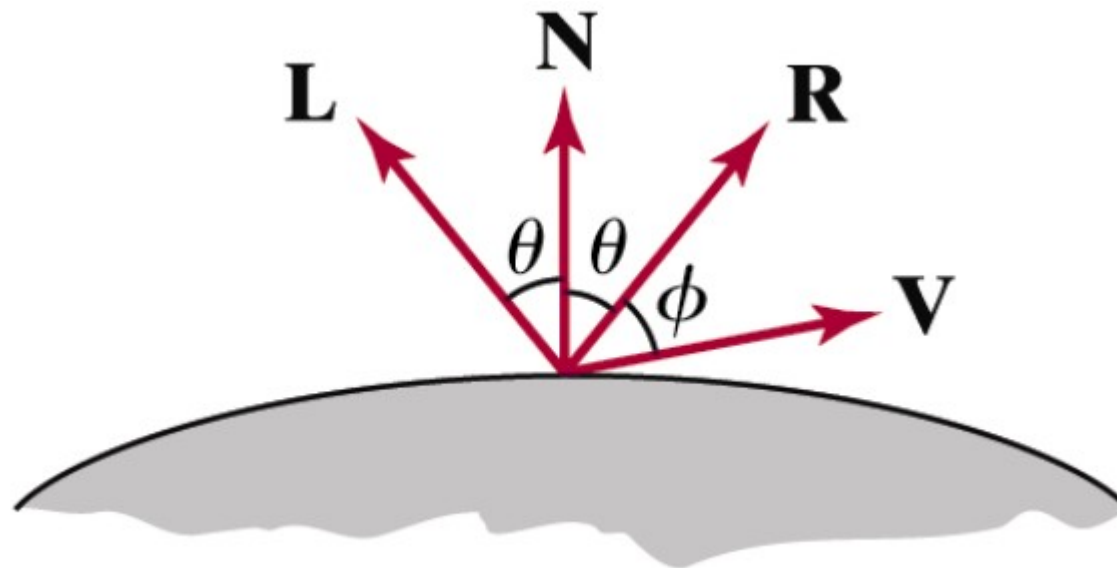
$$I_{dif} = \begin{cases} k_a I_a + k_d I_l (N \cdot L) & \text{if } N \cdot L > 0 \\ k_a I_a & \text{if } N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

Exemplo



Reflexão Especular

- O ponto brilhante que é observado quando uma superfície é observada é o resultado da reflexão quase total da luz incidente concentrada em torno do **ângulo de reflexão especular**.
- O ângulo de reflexão especular é igual ao ângulo de incidência de luz.



Reflexão Especular

- Um espelho perfeito reflete a luz incidente apenas na direção do vetor unitário de reflexão especular \mathbf{R} .
- Outros objetos possuem reflexão especular ao longo de um intervalo de posições de visualização na vizinhança de \mathbf{R} .

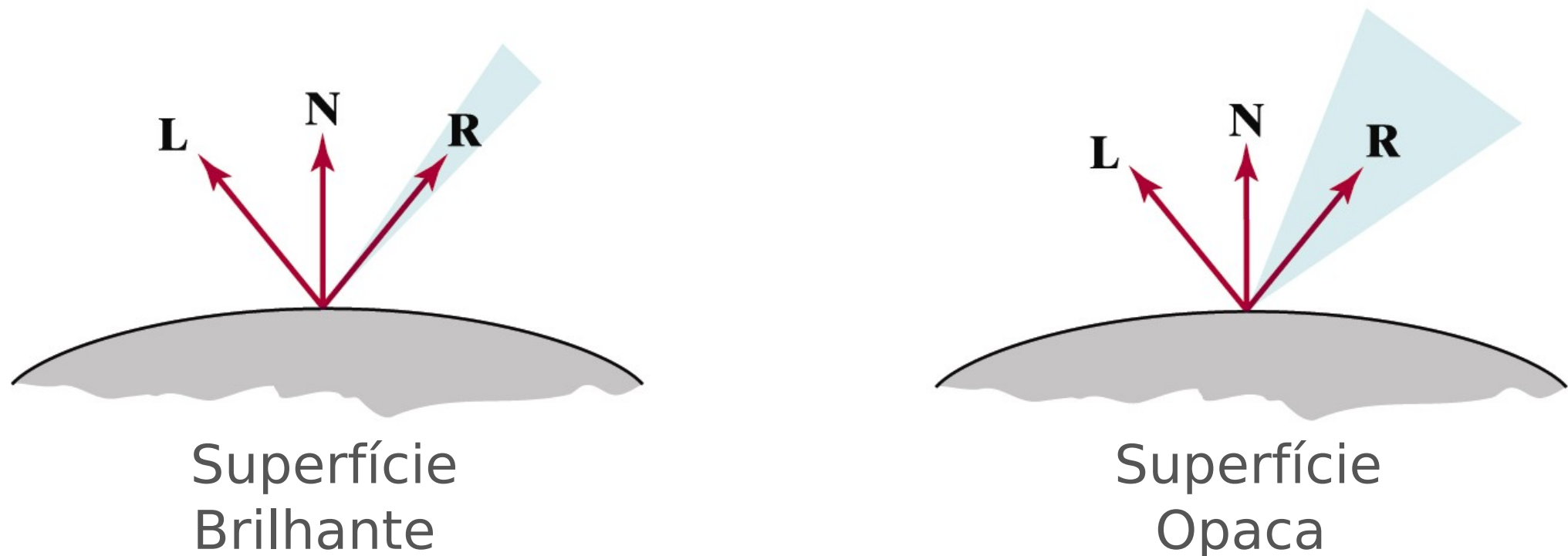
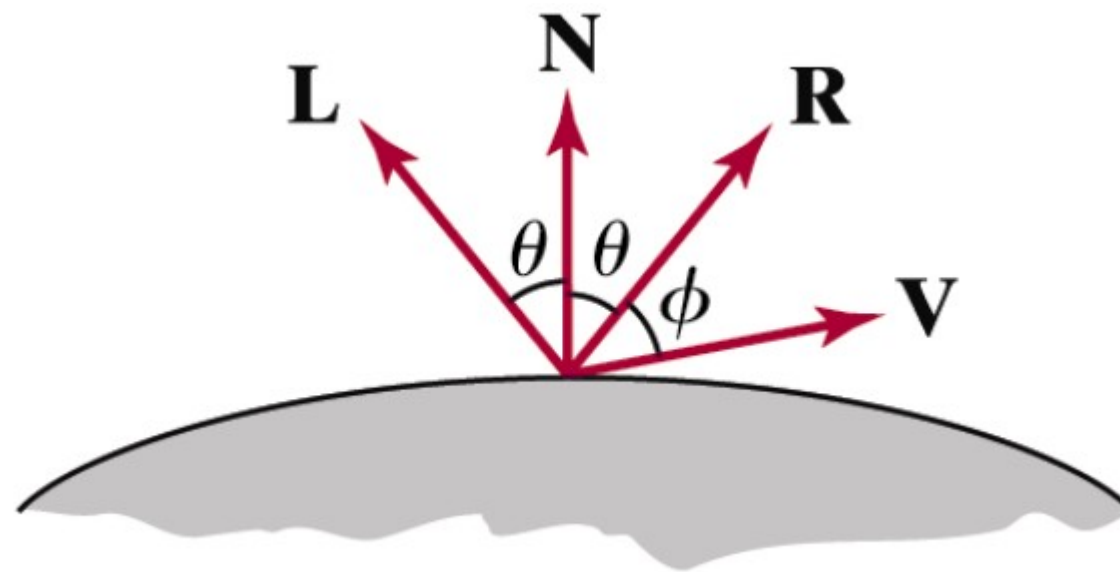


Figure 10-17

O Modelo de Reflexão Especular de *Phong*

- O **modelo de reflexão especular de *Phong*** ou simplesmente **modelo de *Phong*** é um modelo empírico para o cálculo da reflexão especular desenvolvido em 1973 por Phong Bui Thuong.
- O modelo de *Phong* ajusta a intensidade da reflexão de forma ao ângulo entre o vetor de visualização (\mathbf{V}) e o vetor de reflexão especular (\mathbf{R}).



O Modelo de Reflexão Especular de *Phong*

- Assim, a intensidade da reflexão especular é proporcional ao $\cos^{n_s} \phi$
- O ângulo ϕ pode variar entre 0° e 90° de tal forma que o $\cos \phi$ varie entre 0.0 e 1.0.
- O expoente de reflexão especular (n_s) é determinado pelo tipo de superfície que deseja-se renderizar.
 - superfícies brilhantes apresentam um valor alto para n_s (> 100).
 - superfícies opacas possuem valores baixos, em geral, próximos a 1.

O Modelo de Reflexão Especular de *Phong*

- A intensidade da reflexão especular depende das propriedades materiais da superfície e do ângulo de incidência da fonte de luz.
 - outros fatores também podem influenciar como a polarização e a cor da fonte de luz.
- A variação da intensidade especular com relação ao ângulo de incidência é tratada pelas Leis da Reflexão de *Fresnel*.
- Entretanto, no modelo simplificado, não precisamos nos preocupar com isto e, ao invés de usar as leis de *Fresnel*, pode-se aproximar os efeitos da reflexão por meio do coeficiente de reflexão especular.

O Modelo de Reflexão Especular de *Phong*

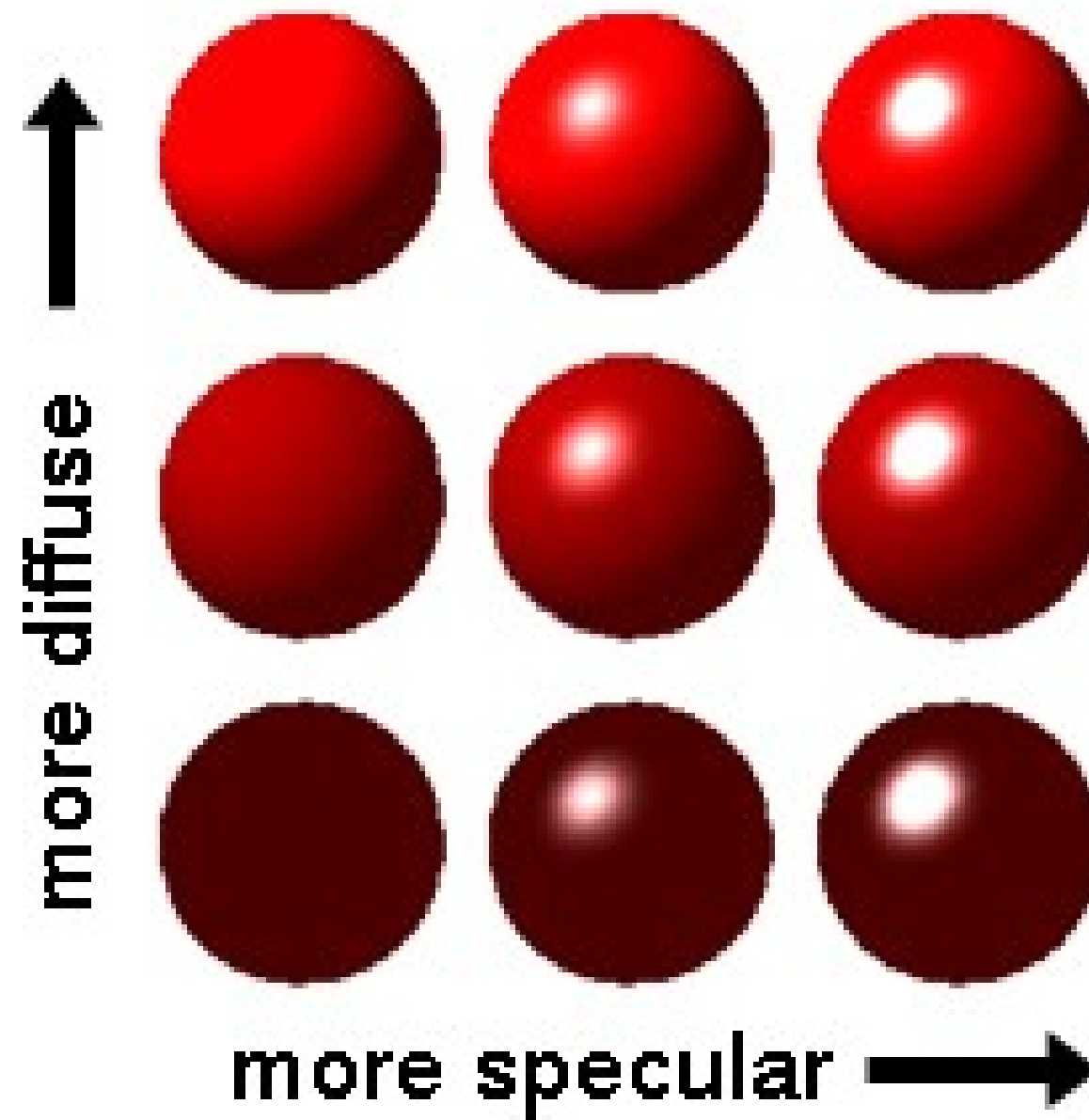
- Assim, a intensidade da reflexão especular é dada por:

$$I_{l,spec} = k_s I_l \cos^{n_s} \phi$$

- lembrando que $V \cdot R = \cos \phi$, podemos escrever:

$$I_{l,spec} = \begin{cases} k_s I_l (V \cdot R)^{n_s} & \text{if } V \cdot R > 0 \text{ and } N \cdot L > 0 \\ 0.0 & \text{if } V \cdot R < 0 \text{ or } N \cdot L \leq 0 \end{cases}$$

Exemplo



Combinado Reflexão Difusa e Especular

- Para uma única fonte de luz pontual é possível combinar os efeitos da reflexão difusa e da reflexão especular de forma simples como a seguir:

$$\begin{aligned} I &= I_{dif} + I_{espec} \\ &= k_a I_a + k_d I_l (N \cdot L) + k_s I_l (V \cdot R)^{n_s} \end{aligned}$$

Reflexão Difusa e Especular - Múltiplas Fontes

- Uma dada cena tridimensional pode conter quantas fontes de luz que desejarmos:
- as reflexões difusa e especular são calculadas como a soma das contribuições das várias fontes:

$$\begin{aligned} I &= I_{ambdif} + \sum_{l=1}^n [I_{l,dif} + I_{l,espec}] \\ &= k_a I_a + \sum_{l=1}^n I_l \left[k_d (N \cdot L) + k_s (V \cdot R)^{n_s} \right] \end{aligned}$$

Adicionando Atenuação de Intensidade

- Para incorporar atenuações radial e angular ao modelo basta ajustar a equação para levar estas atenuações em consideração.
- Assim, a intensidade de luz é dada por

$$I = I_{ambdif} + \sum_{l=1}^n \left[f_{l,radatten} f_{l,angatten} (I_{l,dif} + I_{l,espec}) \right]$$

- onde $f_{l,radatten}$ e $f_{l,angatten}$ foram definidos anteriormente.

Considerações para cores RGB

- Para descrever a intensidade de uma cor RGB específica, é necessário um vetor de três elementos (um para cada componente).
- Assim, para cada fonte de luz:

$$I_l = (I_{lR}, I_{lG}, I_{lB})$$

- De forma análoga, todos os coeficientes são dados em forma vetorial:

$$k_a = (k_{aR}, k_{aG}, k_{aB}) \quad k_d = (k_{dR}, k_{dG}, k_{dB})$$

$$k_s = (k_{sR}, k_{sG}, k_{sB})$$

Considerações para cores RGB

- Finalmente, cada componente da cor da superfície é então calculado por meio de uma equação.
- Por exemplo, a reflexão difusa é dada por:

$$I_{lR,dif} = k_{dR} I_{lR} (N \cdot L)$$

$$I_{lG,dif} = k_{dG} I_{lG} (N \cdot L)$$

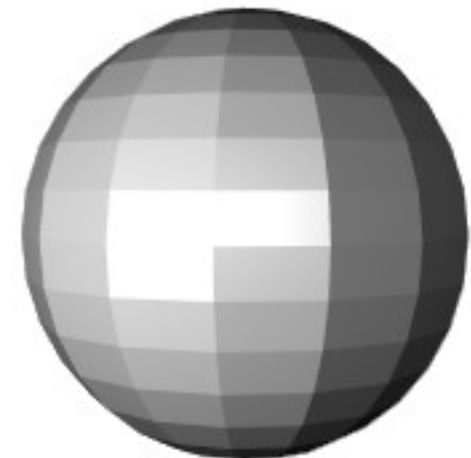
$$I_{lB,dif} = k_{dB} I_{lB} (N \cdot L)$$

Renderização de Polígonos

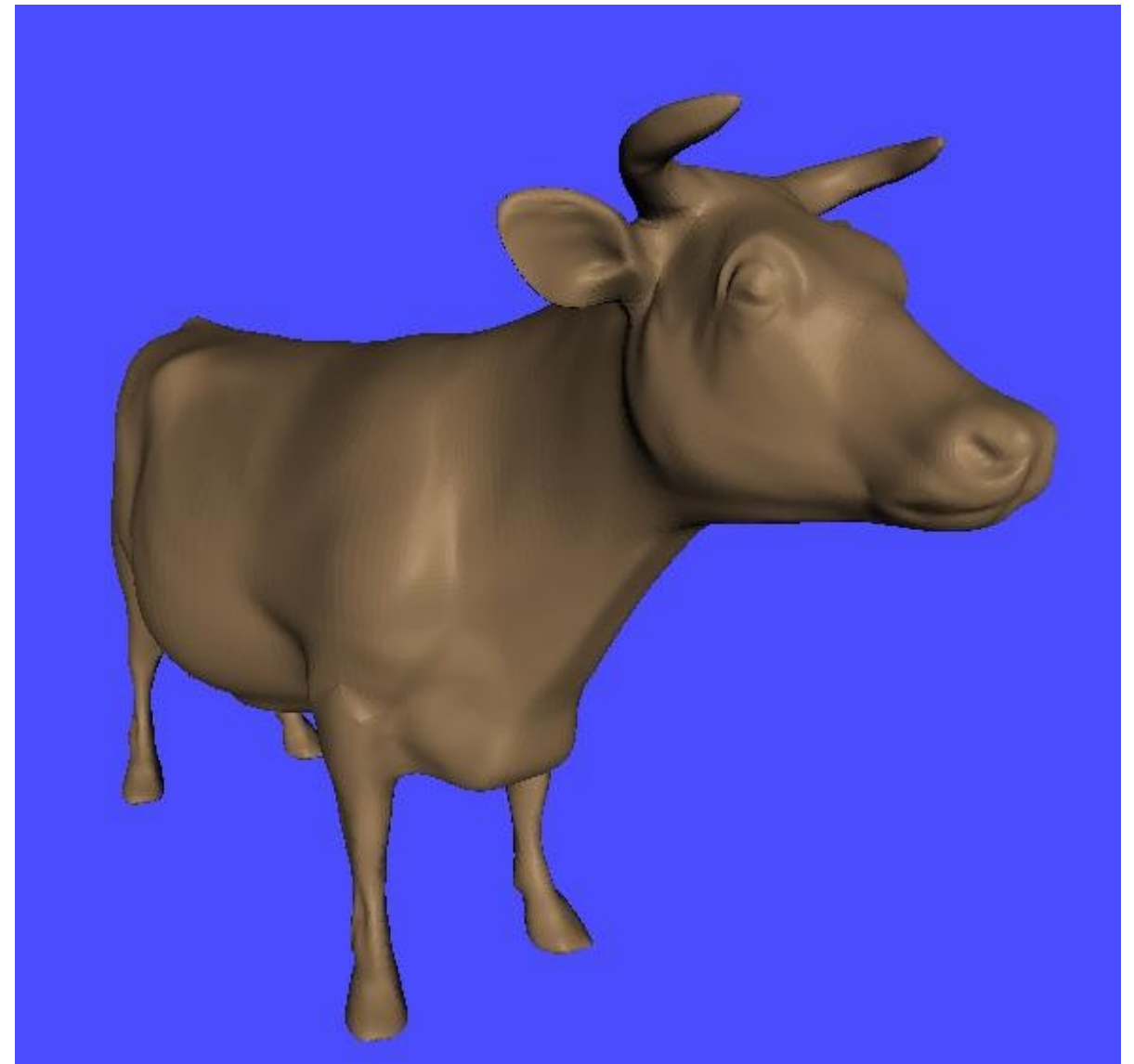
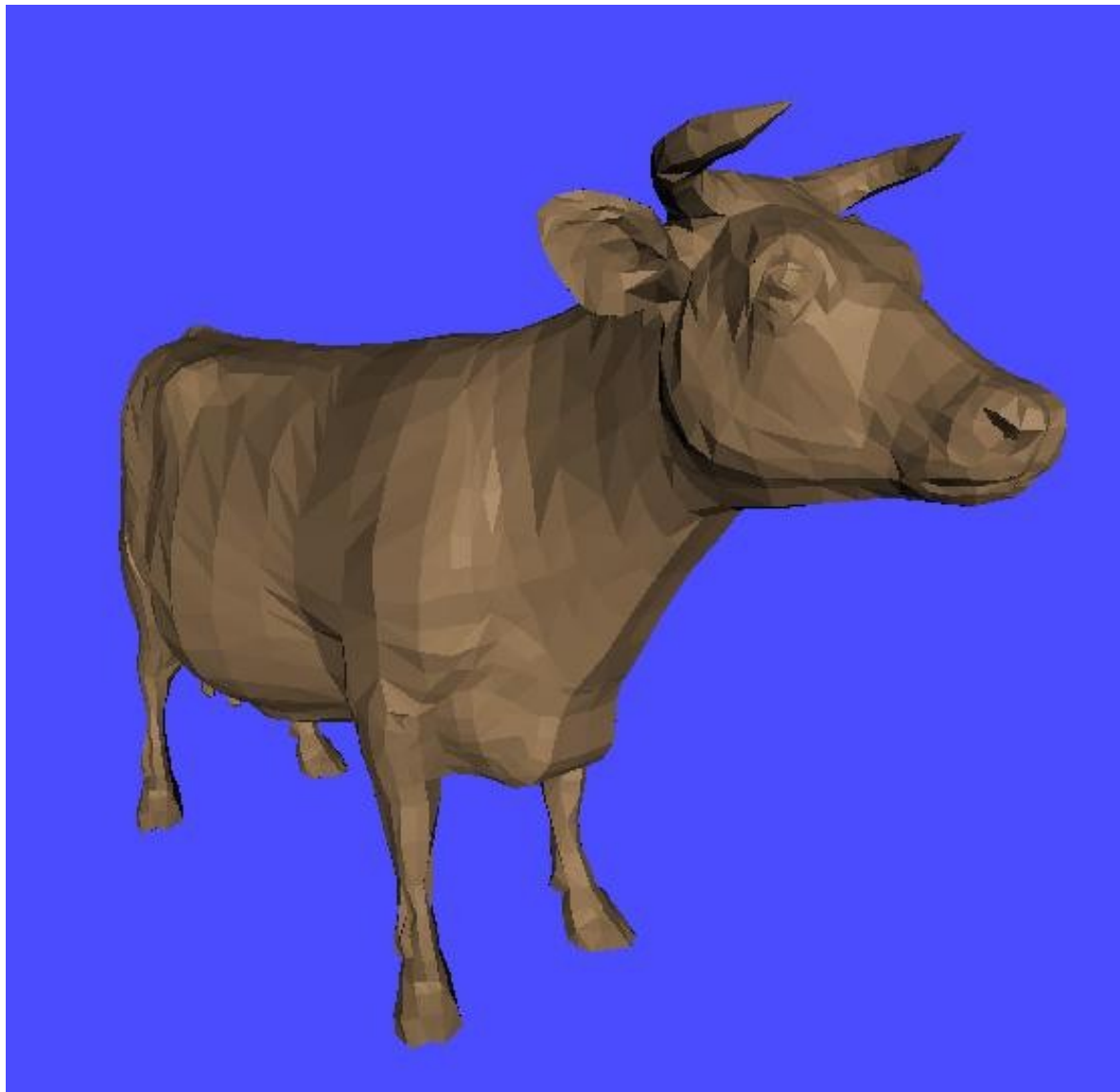
- Cálculos de intensidade a partir de um modelo de iluminação podem ser aplicados na renderização de superfícies de várias maneiras:
 - podemos utilizar o modelo para calcular a intensidade em cada *pixel* projetado.
 - podemos utilizar o modelo, calcular a intensidade em alguns pontos e então aproximar os demais pontos.

Sombreamento Plano ou Constante (*Flat*)

- O sombreamento plano é o método de renderização de superfície poligonal mais simples.
 - a mesma cor é atribuída a todas posições projetadas da superfícies.
- Neste método de renderização, o modelo de iluminação é utilizado para determinar a intensidade dos três componentes RGB em uma única posição da superfície (vértices, centroide).
- É um método extremamente rápido, mas seus resultados não são muito reais.



Superando as Limitação do *Flat*



- Basta acionar muitos polígonos, mas isto torna o método lento.

Sombreamento de Gouraud

- O método de sombreamento de Gouraud foi desenvolvido nos anos 70 por Henri Gouraud.
- o método é conhecido também como **renderização de superfícies por interpolação de intensidade**.
- valores de intensidade são calculados para cada vértice e então tais valores são interpolados ao longo da superfície.



Plano



Gouraud

Sombreamento de Gouraud

- Para renderizar um polígono, o método de Gouraud:
 1. determina a vetor unitário normal médio de cada vértice do polígono.
 2. aplica o modelo de iluminação a cada vértice do polígono de forma a obter a intensidade de luz naquela posição.
 3. interpola linearmente a intensidade dos vértices ao longo da área projetada do polígono.

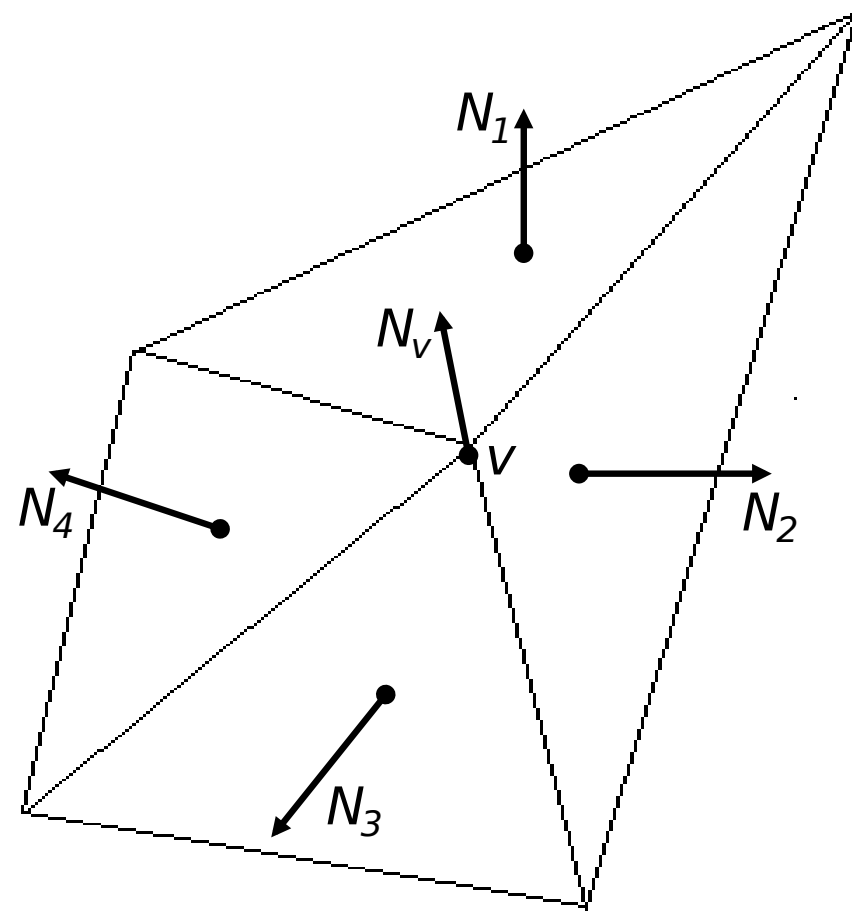
Sombreamento Gouraud

- O vetor unitário normal médio em \mathbf{v} é dado por (ver figura):

$$N_v = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}{|N_1 + N_2 + N_3 + N_4|}$$

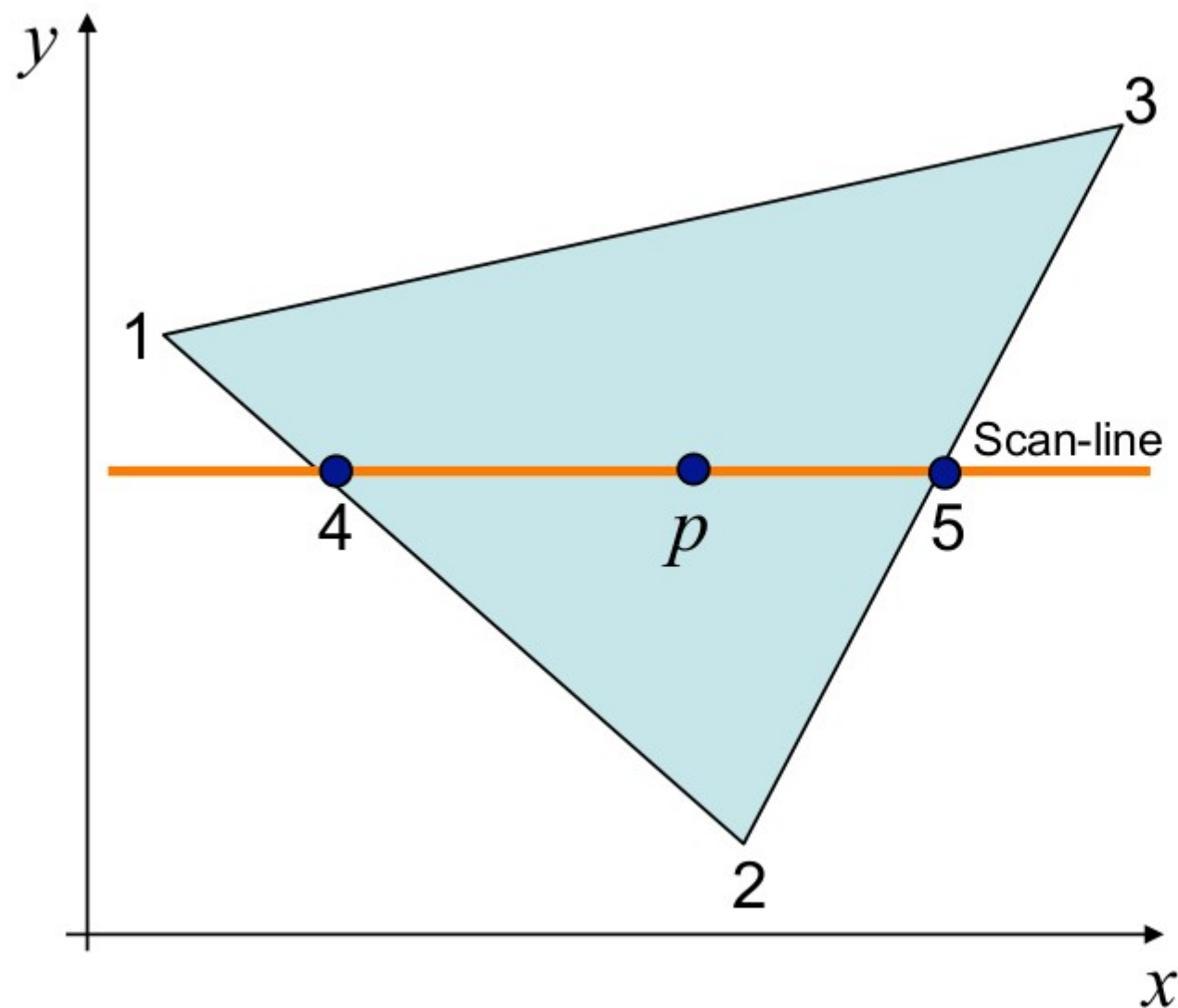
- ou de forma mais geral:

$$N_v = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\left| \sum_{i=1}^n N_i \right|}$$



Sombreamento de Gouraud

- Os demais valores de iluminação são então interpolados ao longo de cada *scan-line*.

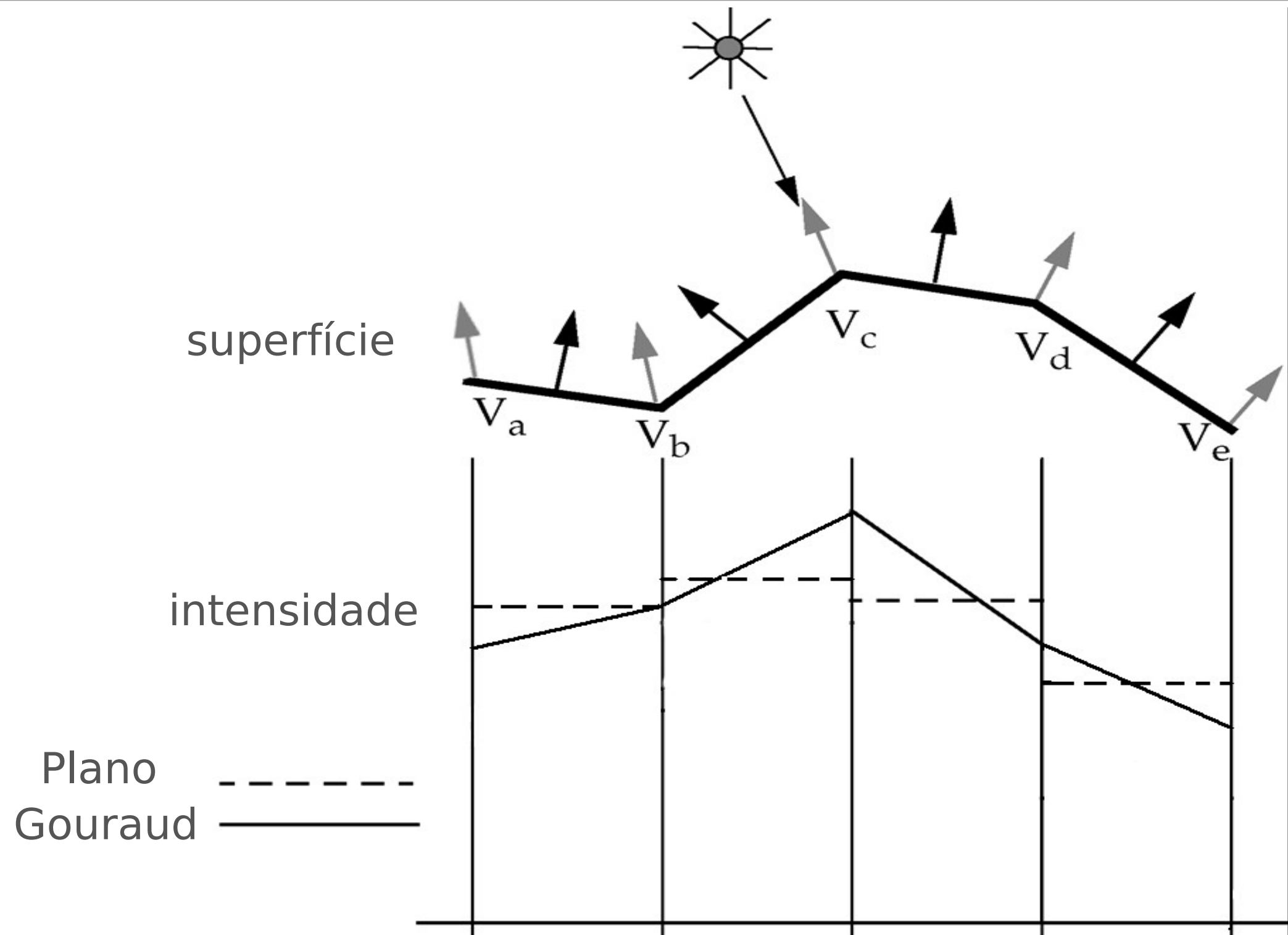


$$I_4 = \frac{y_4 - y_2}{y_1 - y_2} I_1 + \frac{y_1 - y_4}{y_1 - y_2} I_2$$

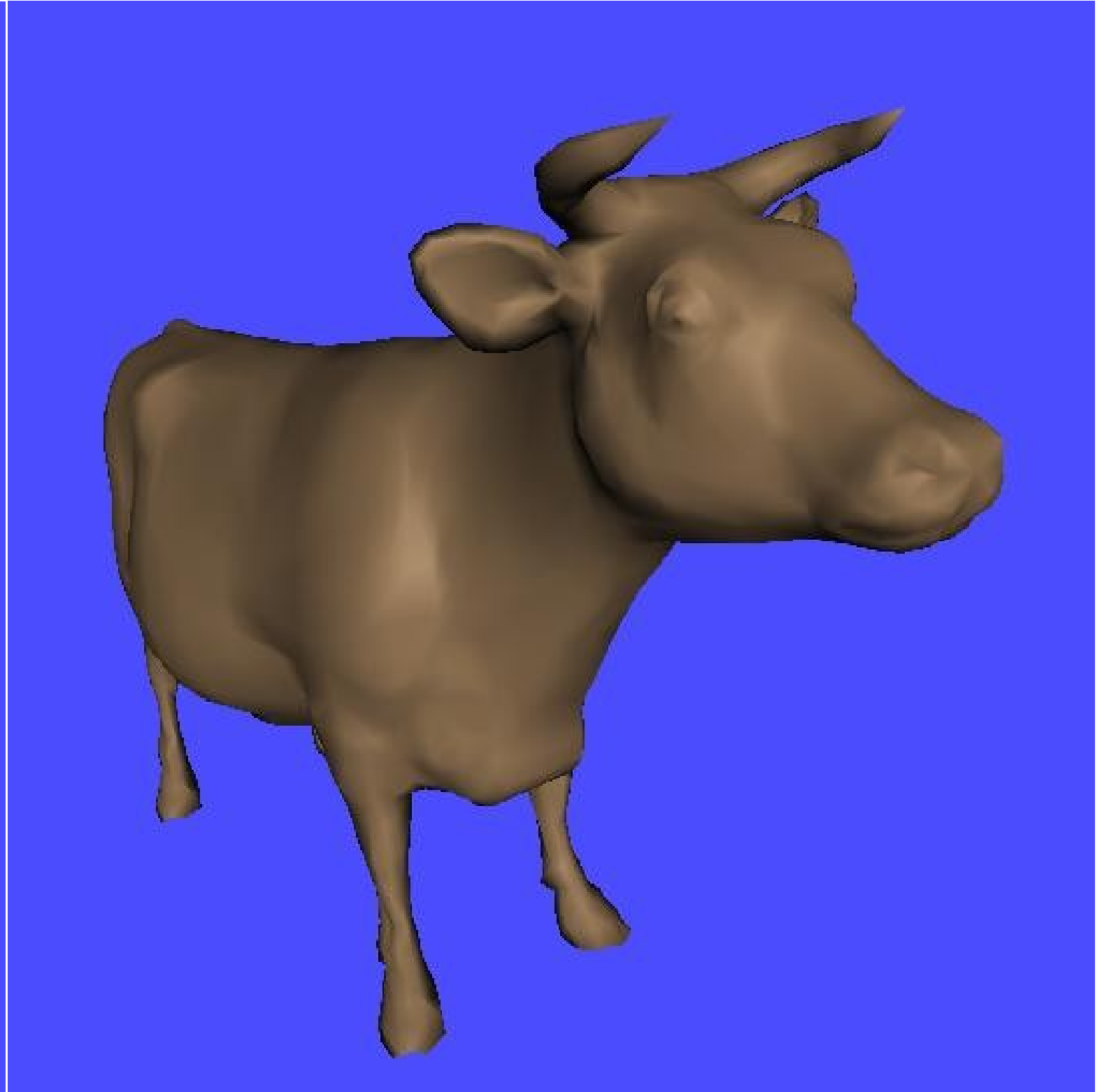
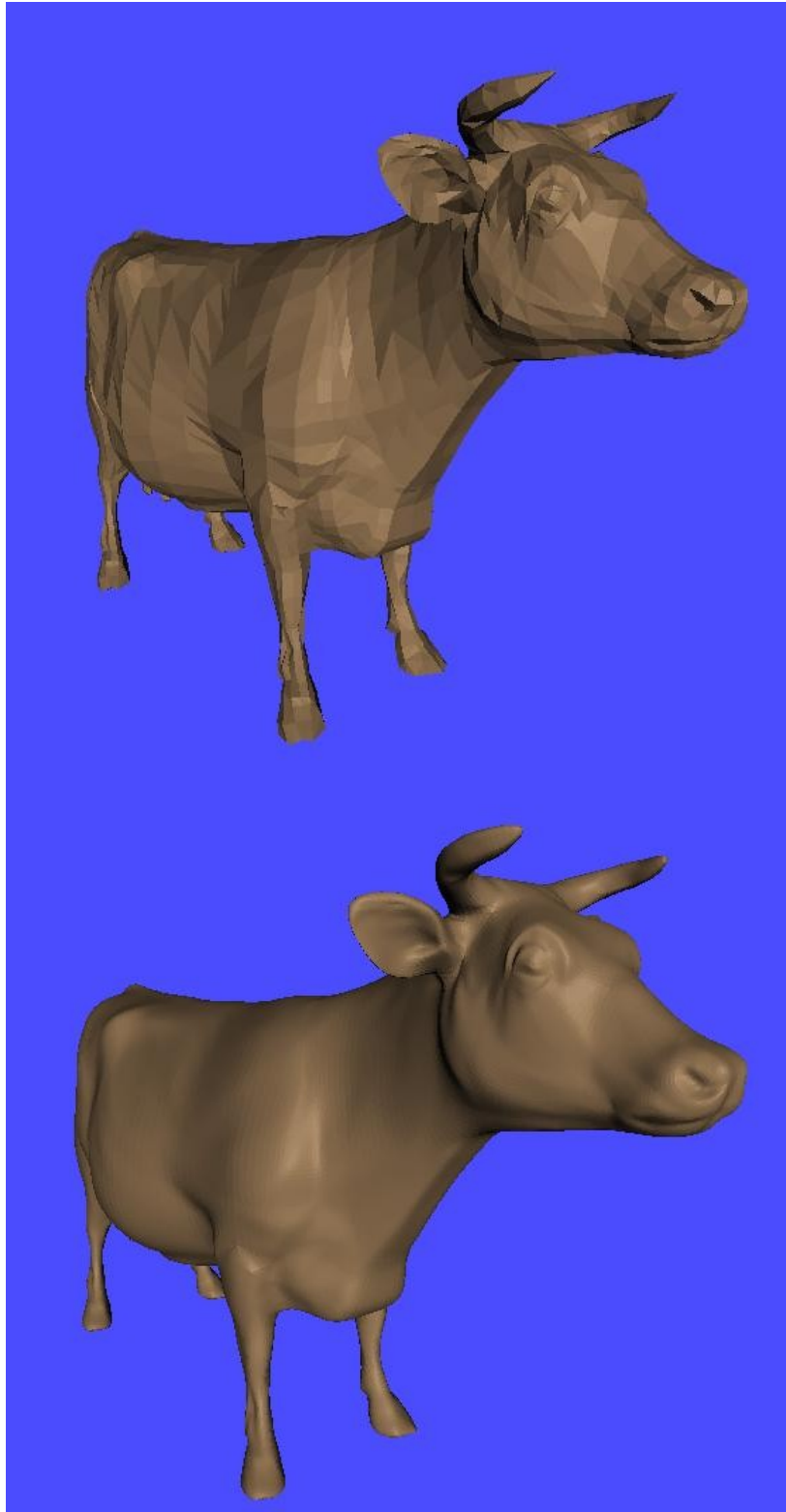
$$I_5 = \frac{y_5 - y_2}{y_3 - y_2} I_3 + \frac{y_3 - y_5}{y_3 - y_2} I_2$$

$$I_p = \frac{x_5 - x_p}{x_5 - x_4} I_4 + \frac{x_p - x_4}{x_5 - x_4} I_5$$

Vantagens do Método de Gouraud



Exemplo

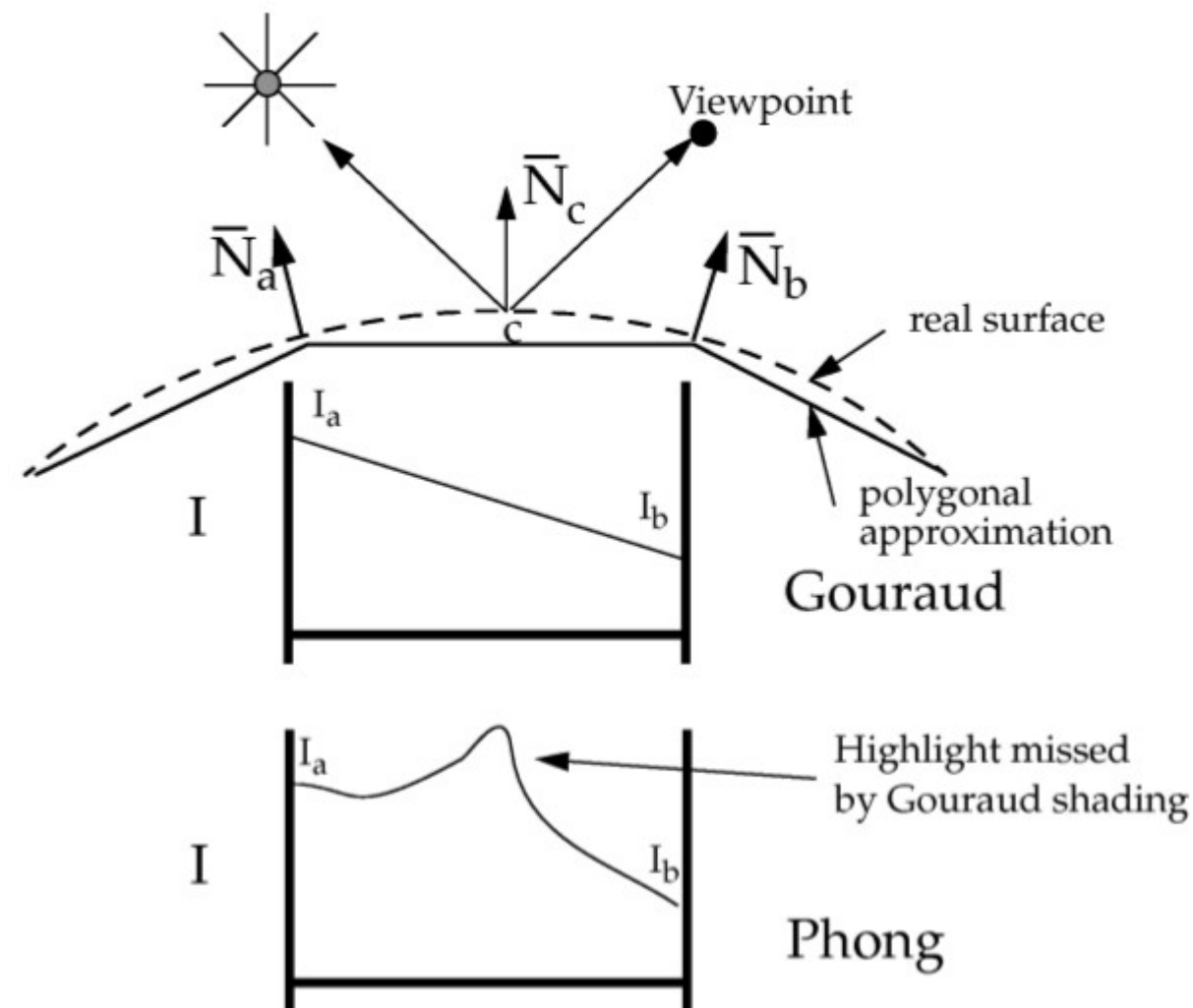


Implementação do Sombreamento Gouraud

- O método de sombreamento de Gouraud pode ser implementado de uma maneira razoavelmente eficiente empregando uma abordagem iterativa:
 - tipicamente, o método de Gouraud é implementado como parte de alguma técnica de detecção de superfícies escondidas.

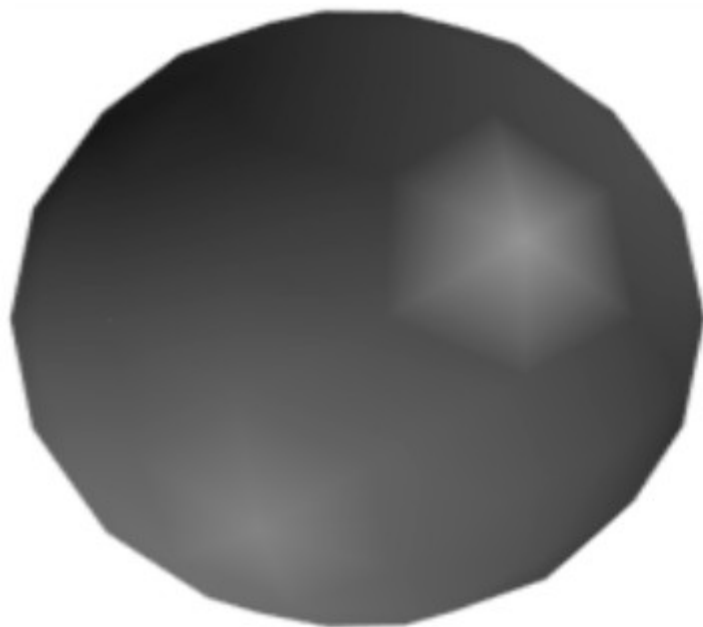
Limitações do Sombreamento de Gouraud

- O método de Gouraud possui uma tendência a perder alguns efeitos.
- em particular, o modelo é problemático com relação a reflexões especulares.

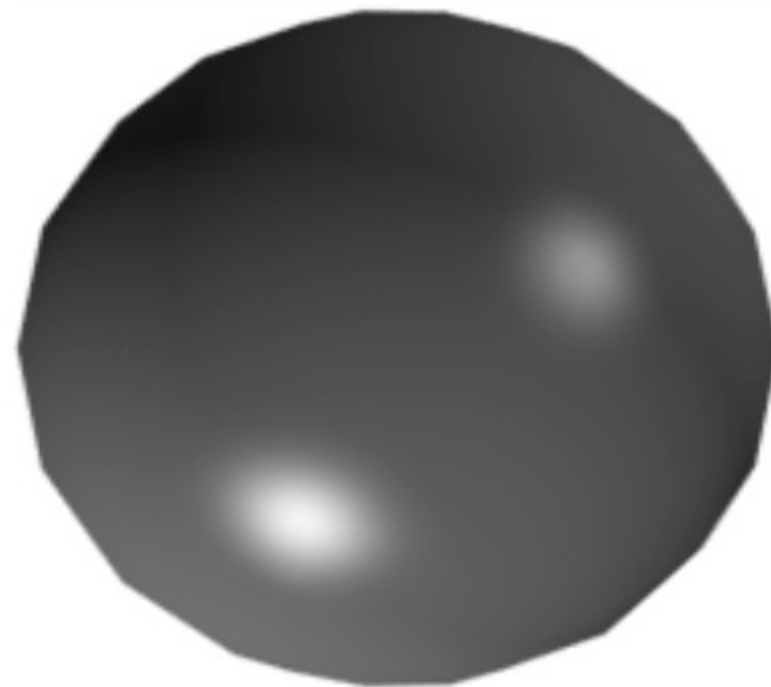


Limitações do Sombreamento de Gouraud

- Além disso, o sombreamento de Gouraud pode introduzir:
 - reflexão especular com formas anômalas.
 - ou ainda causar, em decorrência da interpolação, listras de intensidade brilhantes ou escuras chamadas **Mach Bands**.



Formas Anômalas



Mach Band

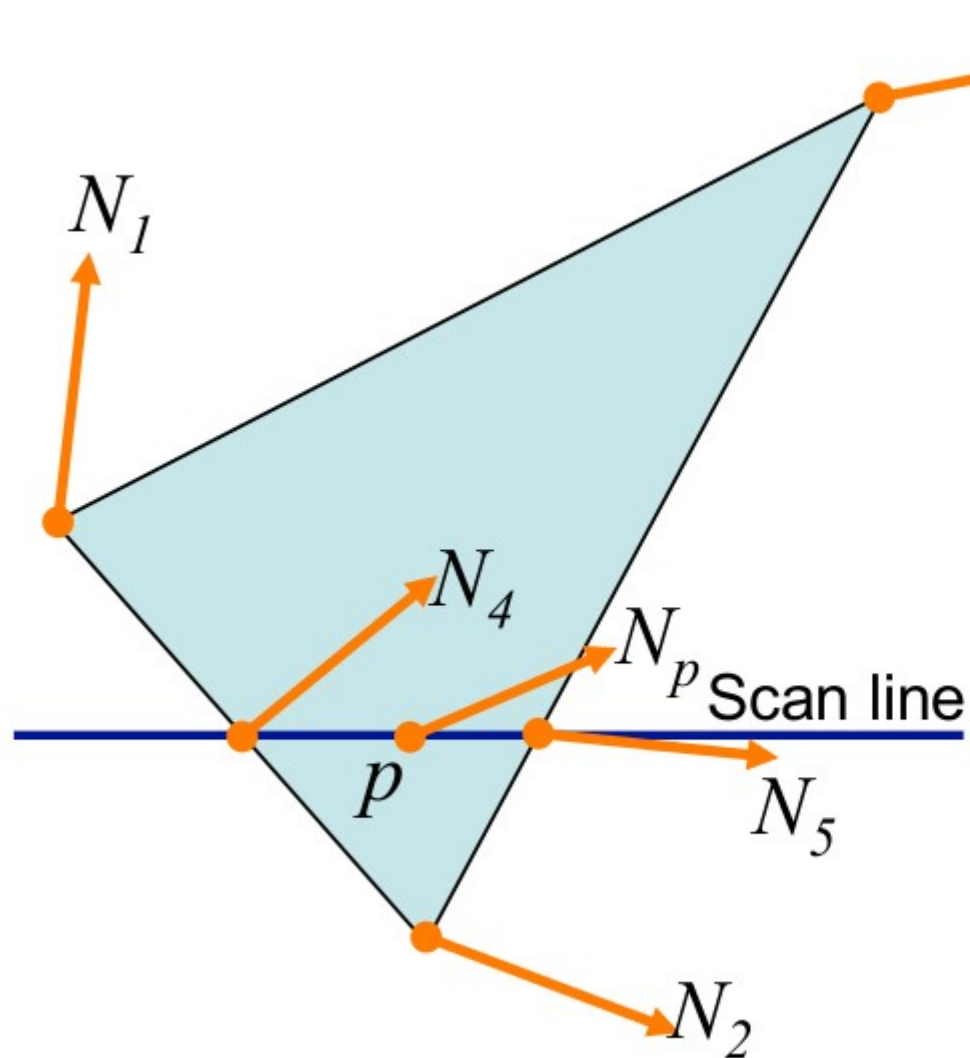
Sombreamento de Phong

- Este modelo de renderização de polígonos, baseado em uma interpolação mais exata, foi desenvolvido por Phong Bui Tuong.
 - o método de sombreamento de Phong é também conhecido como **renderização de superfícies por interpolação do vetor normal**.
- De forma simples, o método interpola vetores normais ao invés de interpolar valores de intensidade como feito no método de Gouraud.

Sombreamento de Phong

- Para renderizar um polígono, o método de Phong:
 1. determina a vetor unitário normal médio de cada vértice do polígono;
 2. interpola, linearmente, as normais dos vértices sobre a área projetada do polígono;
 3. aplica o modelo de iluminação em posições das *scan-lines* para obter a intensidade dos *pixels* utilizando os vetores normais interpolados.

Sombreamento de Phong



$$N_4 = \frac{y_4 - y_2}{y_1 - y_2} N_1 + \frac{y_1 - y_4}{y_1 - y_2} N_2$$

$$N_5 = \frac{y_5 - y_2}{y_3 - y_2} N_3 + \frac{y_3 - y_5}{y_3 - y_2} N_2$$

$$N_p = \frac{y_p - y_5}{y_4 - y_5} N_4 + \frac{y_4 - y_p}{y_4 - y_5} N_5$$

Implementação do Sombreamento de Phong

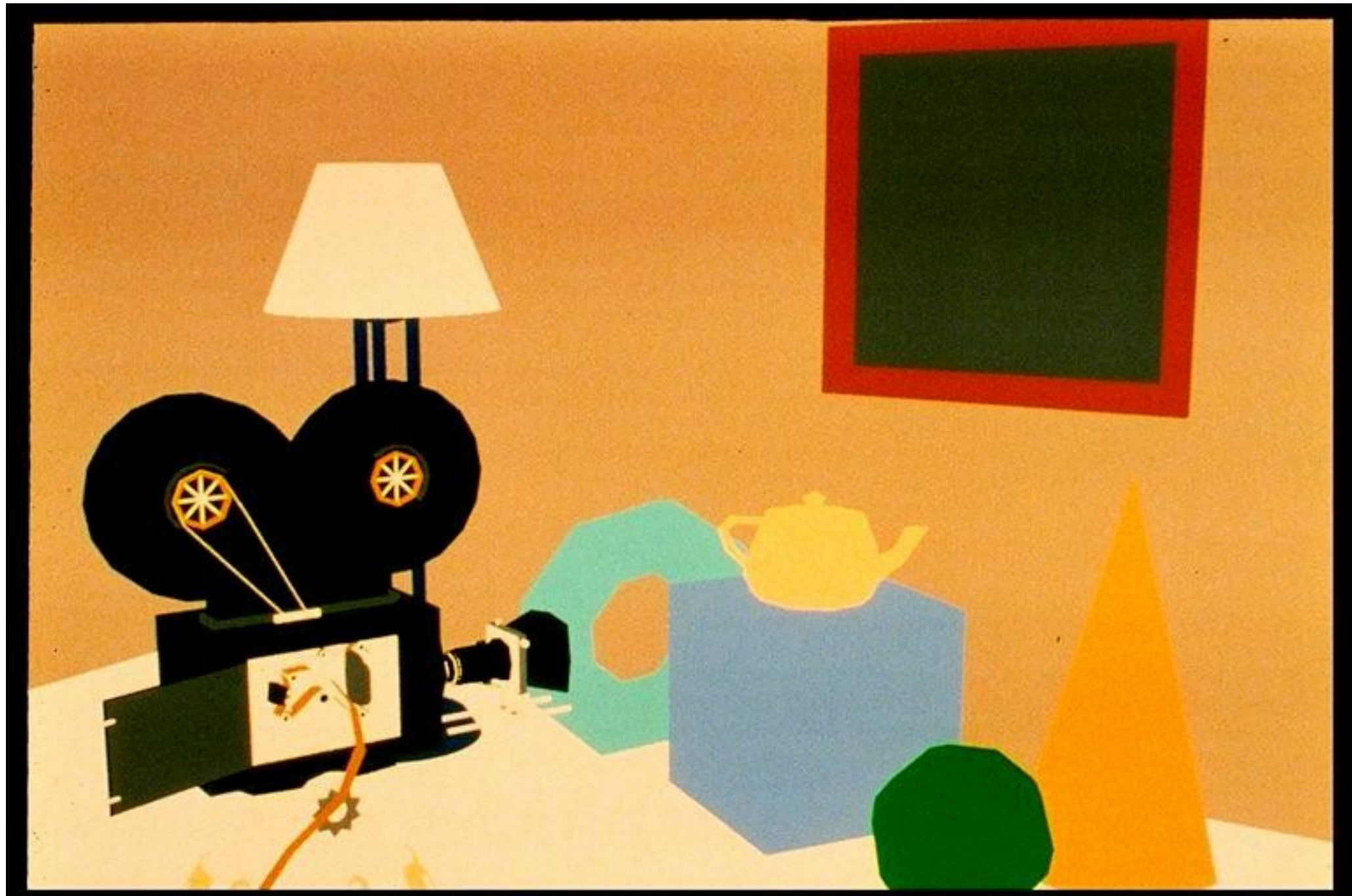
- O método de Phong é muito mais lento que o método de Gouraud, uma vez que o modelo de iluminação deve ser reavaliado diversas vezes.
- existe, no entanto, versões rápidas do método de Phong baseadas em abordagens iterativas.
- assim, como o método de Gouraud, tipicamente, o método de Phong é implementado como parte de alguma técnica de detecção de superfícies escondidas.

Exemplo



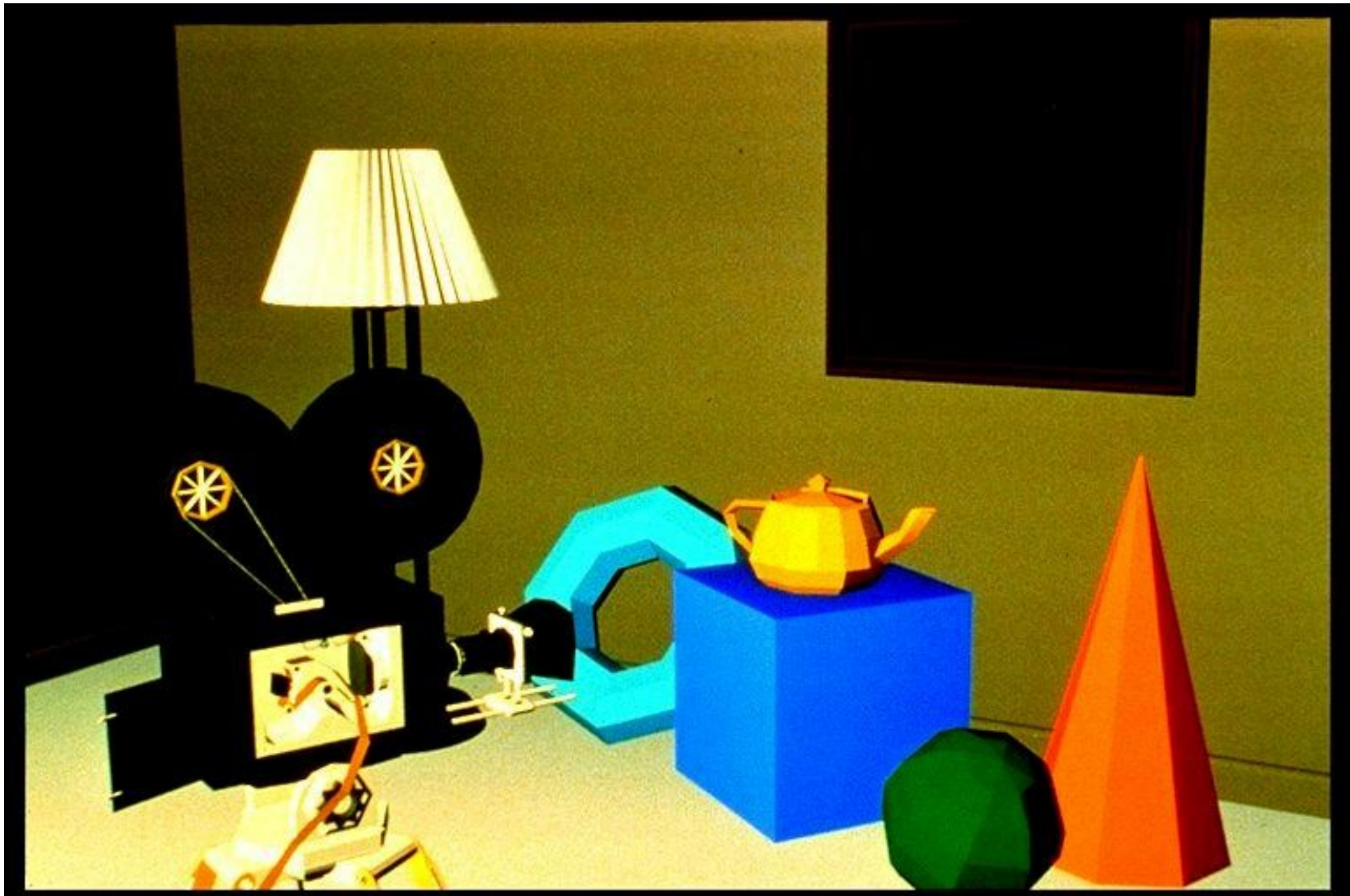
Comparação entre Métodos

- Sem sombreamento



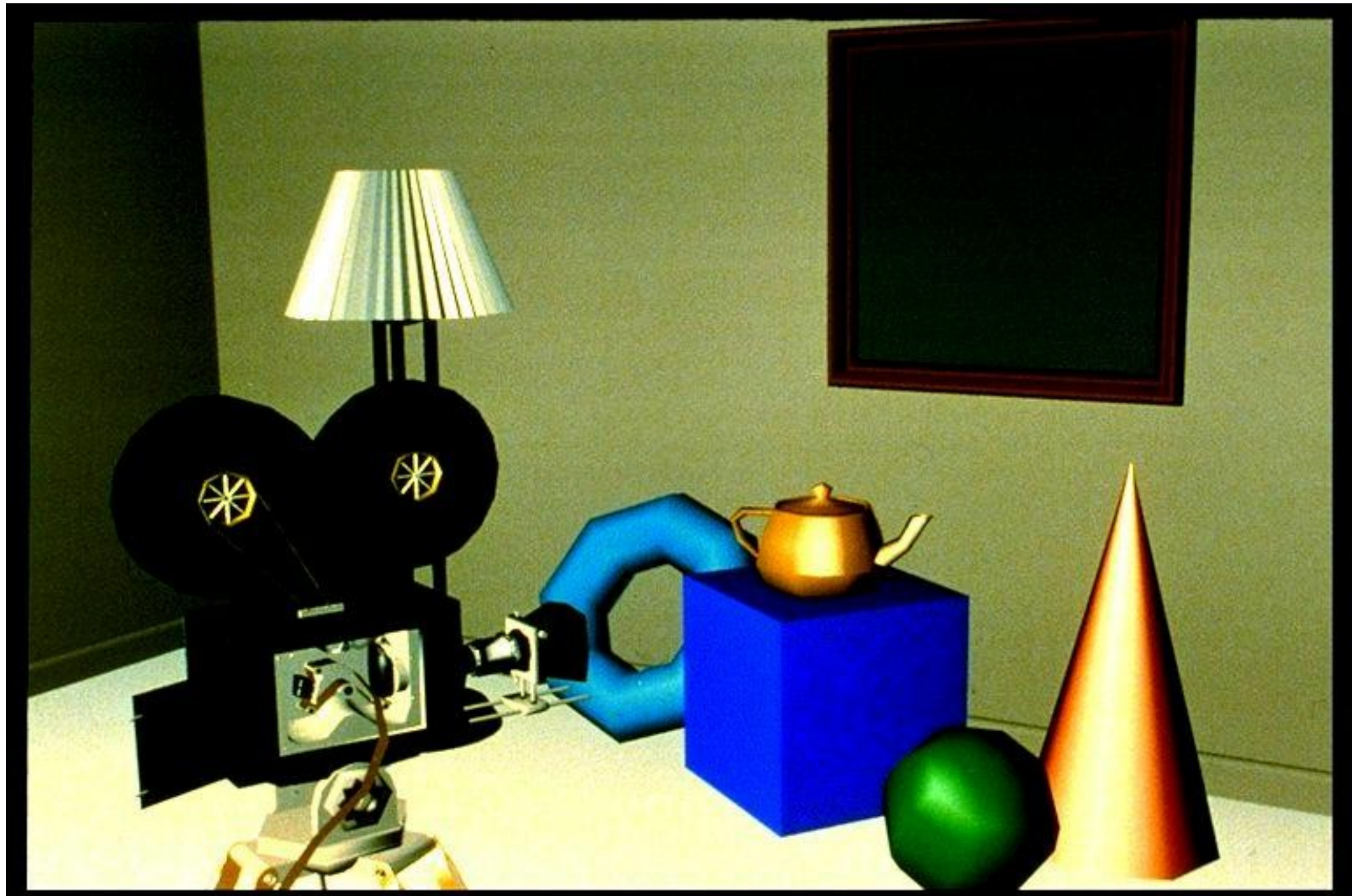
Comparação entre Métodos

- Sombreamento plano



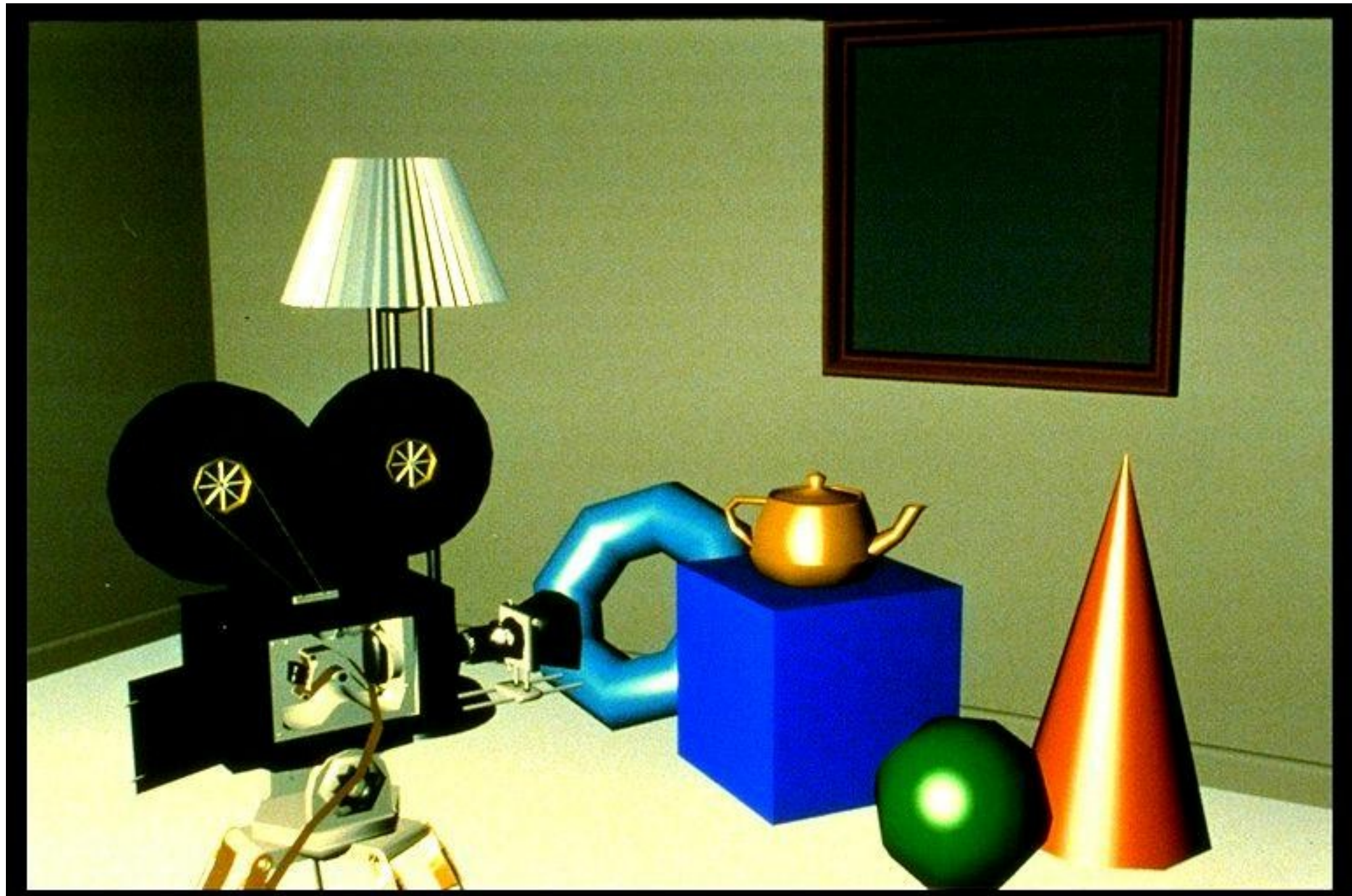
Comparação entre Métodos

- Sombreamento de Gouraud



Comparação entre Métodos

- Sombreamento de Phong



Sumário

- Para resultados realistas para a renderização de polígonos, é preciso utilizar métodos de interpolação com o objetivo de determinar posições de iluminação.
- O método *Flat* é rápido, mas não apresenta resultados reais.
- O método de Gouraud é melhor, mas não apresenta suporte adequado para reflexões especulares.
- O método de Phong é ainda melhor, mas pode ser lento.