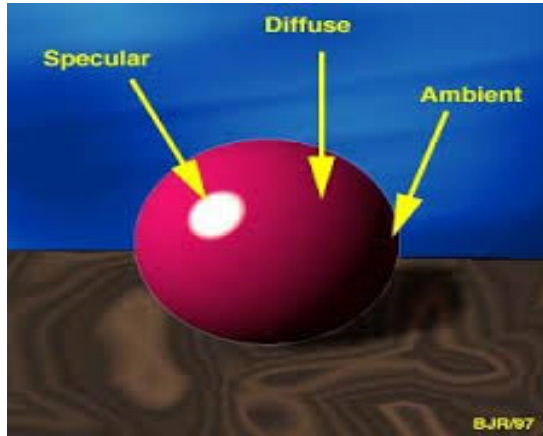
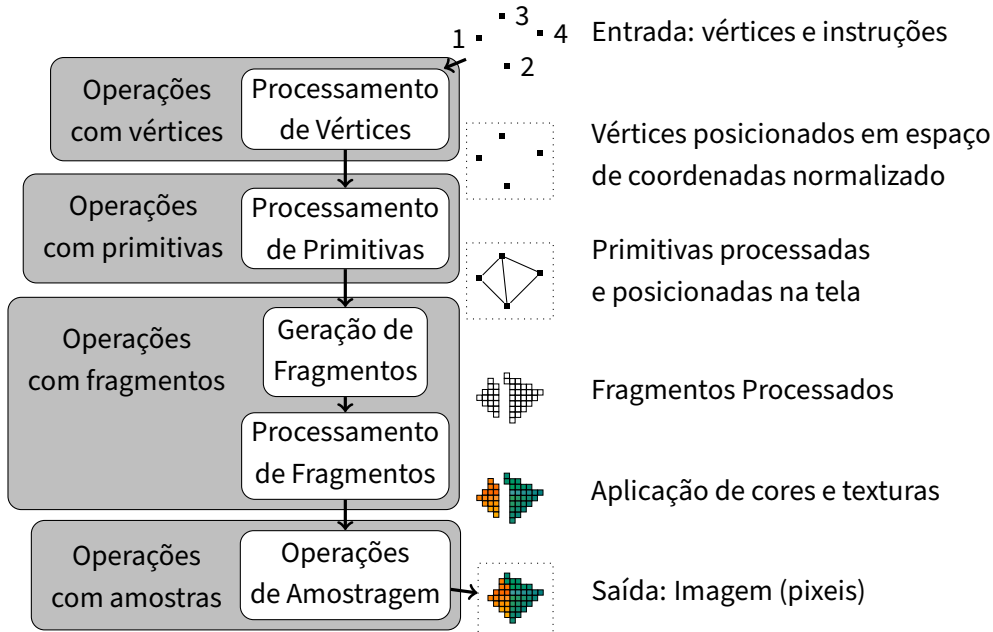


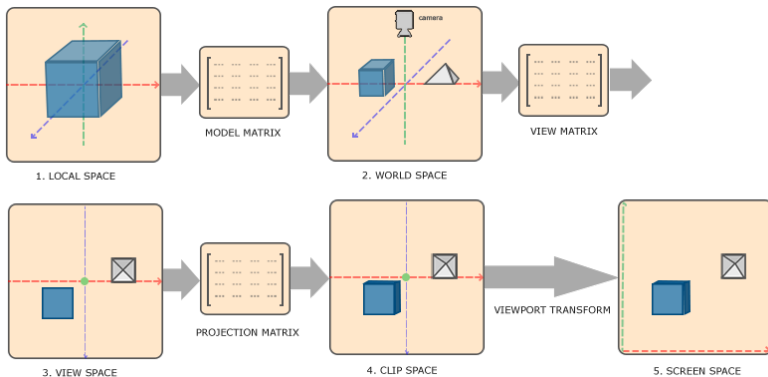
Computação Gráfica

Iluminação





Pipeline de Visualização



$$P' = \text{Projection} \times \text{View} \times \text{Model} \times P$$

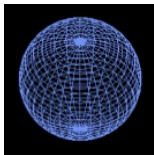
Motivação

Imagens mais realistas:

- ▶ Projeções perspectivas.
- ▶ Efeitos de iluminação natural às superfícies visíveis.

Motivação

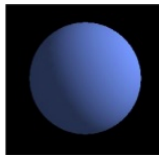
Modelos de iluminação:



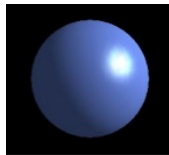
Apenas a malha
(*Wireframe*)



Cor Uniforme



Luz Ambiente
+Reflexão Difusa



Luz Ambiente
+Reflexão Difusa
+Reflexão Especular

Luz Ambiente

The background of the slide features a minimalist design with teal-colored geometric shapes. Two large teal triangles point upwards from the bottom corners, meeting at a central point. Below this meeting point, a smaller, darker teal triangle points downwards. The remaining space is white, creating a clean, modern aesthetic.

Fontes de Luz

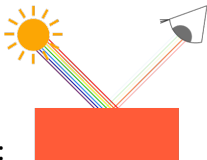
Qualquer objeto que emite energia brilhante é uma fonte de luz e contribui para os efeitos de luz dos outros objetos na cena. Características das fontes de luz:

- ▶ Posição.
- ▶ Cor.
- ▶ Direção

Modelos de Iluminação:

- ▶ Aproximações (muito simplificadas) das leis físicas sobre efeito de luz em objetos.
- ▶ Modelo→Simplificação da Realidade (custo computacional).

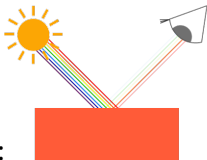
Fontes de Luz



Exemplo do mundo real:

- ▶ Sol (luz branca: combinação de muitas cores) ilumina uma superfície.
- ▶ A superfície absorve algumas cores e reflete outras.
- ▶ Para nós, a cor da superfície é a cor refletida e visível aos nossos olhos.

Fontes de Luz



Exemplo do mundo real:

- ▶ Sol (luz branca: combinação de muitas cores) ilumina uma superfície.
- ▶ A superfície absorve algumas cores e reflete outras.
- ▶ Para nós, a cor da superfície é a cor refletida e visível aos nossos olhos.

Em um simples modelo de iluminação:

Luz (branca) RGB (1.0,1.0,1.0) .

Objeto RGB (1.0,0.5,0.31) .

Objeto×Luz RGB (1.0,0.5,0.31) .

Luz Ambiente

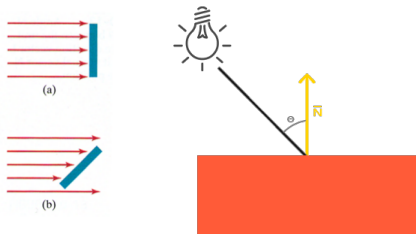
- ▶ Define um nível de brilho geral para a cena.
- ▶ Cada superfície (de algum objeto) irá refletir luz conforme suas propriedades.
- ▶ O nível de Luz Ambiente em uma cena é definido por um parâmetro de intensidade I_a (um valor escalar entre $[0, 1]$).

Reflexão Difusa

The background of the slide features a minimalist design with teal-colored geometric shapes. Two large triangles point towards each other from the bottom corners, meeting at a central point. A smaller, darker teal triangle is positioned at the bottom center, partially overlapping the base of the other two.

Reflexão Difusa

- ▶ A quantidade de luz incidente depende da orientação da superfície relativa à direção da luz.
- ▶ É necessário considerar o ângulo de incidência θ entre a direção da luz incidente e a normal da superfície.

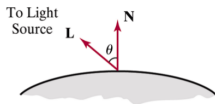


Reflexão Difusa

Conforme o ângulo de incidência aumenta, a iluminação a partir da fonte de luz diminui.

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

L é o vetor unitário que representa a direção da luz e N o vetor normal (dos vértices) da superfície.



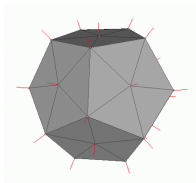
Uma superfície somente será iluminada quando $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Quando $\cos \theta < 0$, a luz estará atrás da superfície.

Reflexão Difusa

O vetor unitário L é calculado usando as posições da superfície P_{surf} e da fonte de luz P_{source} :

$$L = \frac{P_{\text{source}} - P_{\text{surf}}}{|P_{\text{source}} - P_{\text{surf}}|}$$

N é um vetor perpendicular à superfície. Um vértice só não forma superfície, portanto N pode ser calculado considerando a superfície local formada por vértices vizinhos.



Modelo de Iluminação (*Flat*)

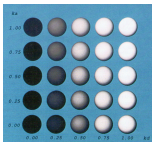
Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

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

Modelo de Iluminação (*Flat*)

Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

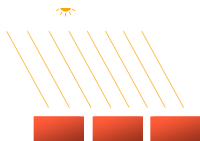
- ▶ k_a e k_d são escalares $[0, 1]$ que definem propriedades da superfície.
 - ▶ k_a é o coeficiente de reflexão ambiente (quanto maior k_a , mais reflexão).
 - ▶ k_d é o coeficiente de Reflexão Difusa (fração da luz incidente a ser refletida/espalhada na superfície).
 - ▶ Assume que toda a superfície é um refletor difuso ideal (*Lambertiano*), ou seja, uniforme em todas as direções, ou perfeitamente difusa.



Modelo de Iluminação (*Flat*)

Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

- ▶ k_a e k_d são escalares $[0, 1]$ que definem propriedades da superfície.
- ▶ I_a determina a intensidade da luz ambiente, escalar entre $[0, 1]$.

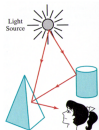


Luz ambiente representa uma fonte de luz distante e não é necessário especificar uma posição de sua fonte. Tentamos simular um efeito de iluminação produzido pela luz refletida de várias superfícies.

Modelo de Iluminação (*Flat*)

Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

- ▶ k_a e k_d são escalares $[0, 1]$ que definem propriedades da superfície.
- ▶ I_a determina a intensidade da luz ambiente, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ I_l determina a intensidade da luz puntual, escalar entre $[0, 1]$.

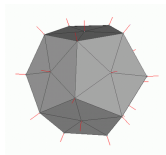


Uma fonte de luz puntual é onidirecional. Pode ser definida por meio de uma posição, da cor da luz, um vetor de direção, e um limite angular $\cos \theta = N \cdot L$.

Modelo de Iluminação (*Flat*)

Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

- ▶ k_a e k_d são escalares $[0, 1]$ que definem propriedades da superfície.
- ▶ I_a determina a intensidade da luz ambiente, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ I_l determina a intensidade da luz puntual, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ N é a normal (vetor unitário perpendicular à superfície).



Modelo de Iluminação (*Flat*)

Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

- ▶ k_a e k_d são escalares $[0, 1]$ que definem propriedades da superfície.
- ▶ I_a determina a intensidade da luz ambiente, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ I_l determina a intensidade da luz puntual, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ N é a normal (vetor unitário perpendicular à superfície).
- ▶ L é a direção da luz puntual (vetor unitário com a direção).

$$L = \frac{P_{\text{source}} - P_{\text{surf}}}{|P_{\text{source}} - P_{\text{surf}}|}$$

Modelo de Iluminação (*Flat*)

Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

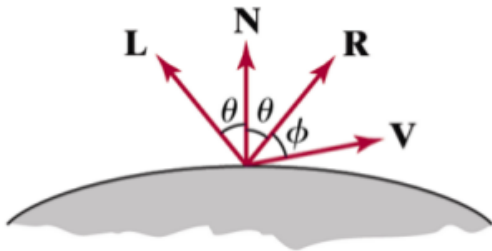
- ▶ k_a e k_d são escalares $[0, 1]$ que definem propriedades da superfície.
- ▶ I_a determina a intensidade da luz ambiente, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ I_l determina a intensidade da luz puntual, escalar entre $[0, 1]$.
- ▶ N é a normal (vetor unitário perpendicular à superfície).
- ▶ L é a direção da luz puntual (vetor unitário com a direção).
- ▶ $N \cdot L$ retorna o cosseno do ângulo entre vetores N e L , $\cos \theta = N \cdot L$.
- ▶ Se $N \cdot L \leq 0$, então a superfície não é atingida pela luz puntual, somente pela luz ambiente (significa que está fora do limite angular).

Reflexão Especular

The background of the slide features a white central area where the text is located. This central area is framed by two large teal-colored triangles that point towards each other from the left and right sides, meeting at a point at the bottom center. The overall effect is a stylized, modern geometric design.

Reflexão Especular

A Reflexão Especular em superfície brilhante representa a reflexão da luz incidente em uma área concentrada ao redor de um ângulo de Reflexão Especular:



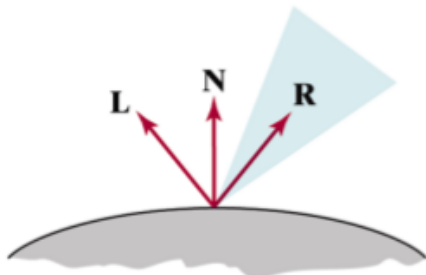
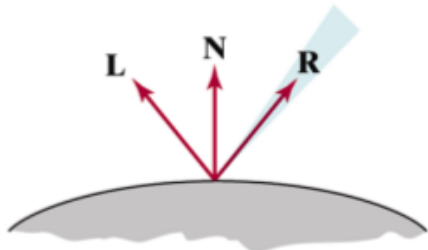
Reflexão Especular

A Reflexão Especular em superfície brilhante representa a reflexão da luz incidente em uma área concentrada ao redor de um ângulo de Reflexão Especular:

- ▶ O ângulo de Reflexão Especular θ é igual ao ângulo de incidência da luz, oposto à normal da superfície N .
- ▶ O vetor unitário R representa a direção da Reflexão Especular.
- ▶ O vetor unitário L aponta na direção da fonte de luz puntual.
- ▶ O vetor unitário V aponta na direção do "visualizador".

Campo de Reflexão Especular

- ▶ Superfícies brilhantes tem um campo menor de Reflexão Especular.
- ▶ Superfícies foscas tem um campo maior de Reflexão Especular.



Modelo de Gouraud

The slide features a white background with the title 'Modelo de Gouraud' centered in a black, sans-serif font. At the bottom, there are decorative teal-colored geometric shapes: two large triangles pointing upwards towards the center, and a smaller, darker teal triangle pointing downwards from the bottom center, creating a central triangular void.

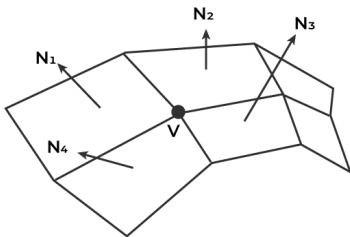
Modelo de Gouraud

- ▶ O Modelo de Gouraud interpola as cores nos vértices de cada face para obter a resultante para aquela face.
- ▶ Suaviza as transições entre as faces, melhorando a aparência do objeto.
- ▶ Como apenas considera as cores nos vértices que definem cada polígono, tem um custo computacional baixo, sendo o principal método utilizado para iluminação complexa durante muito tempo.
- ▶ Entretanto, suaviza algumas faces que deveriam ser mantidas, e não capta as variações da reflexão especular sobre a superfície, pois é calculado usando somente os vértices.

Modelo de Gouraud

Os passos para a aplicação do Modelo de Gouraud são:

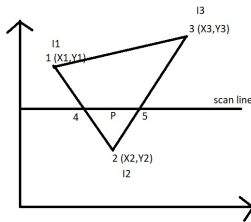
1. Determinar o normal N em cada vértice do polígono a partir da resultante entre os normais dos polígonos aos quais este vértice pertence.



Modelo de Gouraud

Os passos para a aplicação do Modelo de Gouraud são:

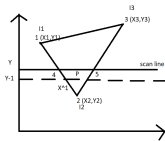
1. Determinar o normal N em cada vértice do polígono a partir da resultante entre os normais dos polígonos aos quais este vértice pertence.
2. Usar N e L para calcular a intensidade I em cada vértice do polígono.



Modelo de Gouraud

Os passos para a aplicação do Modelo de Gouraud são:

1. Determinar o normal N em cada vértice do polígono a partir da resultante entre os normais dos polígonos aos quais este vértice pertence.
2. Usar N e L para calcular a intensidade I em cada vértice do polígono.
3. Usar interpolação bilinear para calcular a intensidade I em cada pixel no qual o polígono visível é projetado.



Modelo de Gouraud

Os passos para a aplicação do Modelo de Gouraud são:

1. Determinar o normal N em cada vértice do polígono a partir da resultante entre os normais dos polígonos aos quais este vértice pertence.
2. Usar N e L para calcular a intensidade I em cada vértice do polígono.
3. Usar interpolação bilinear para calcular a intensidade I em cada pixel no qual o polígono visível é projetado.
4. Desenhar o pixel de acordo com a cor determinada.

Modelo de Gouraud

- ▶ Aplica os efeitos da reflexão difusa e especular sobre o objeto sem cálculos complexos.
- ▶ Implementado no *shader* de vértices, tem uma execução muito eficiente.
- ▶ Por depender apenas das cores nos vértices para calcular os pixels de cada fragmento, dá uma aparência mais uniforme às superfícies.
- ▶ Conforme o poder de processamento gráfico foi aumentando, foi sendo substituído por modelos que atuam no *shader* de fragmentos.

Modelo de Blinn-Phong

The slide features a white background with the title 'Modelo de Blinn-Phong' centered in a black, sans-serif font. At the bottom, there are two large, teal-colored geometric shapes that meet at a point in the center, forming a V-shape. These shapes are composed of several triangles, with the central meeting point creating a darker teal triangular area.

Modelo de Phong

- ▶ O Modelo de Phong define a intensidade da reflexão especular proporcional a $\cos^{n_s} \phi$, com $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.
- ▶ O expoente de reflexão especular n_s é determinado pelo tipo de superfície:
 - ▶ Superfícies brilhantes apresentam valores altos de n_s (100 ou mais).
 - ▶ Para refletores perfeitos, $n_s \rightarrow \infty$.
- ▶ Em um refletor ideal (espelho perfeito), a luz incidente é refletida somente na direção de reflexão especular, e será visível somente quando V e R coincidirem ($\phi = 0^\circ$).

Modelo de Phong

$$I_{l,\text{spec}} = \begin{cases} k_s I_l (V \cdot R)^{n_s}, & \text{se } V \cdot R > 0 \\ 0, & \text{se } V \cdot R \leq 0 \end{cases}$$

- ▶ k_s é o coeficiente de reflexão especular.
- ▶ n_s é o expoente de reflexão especular.
- ▶ $\cos \phi = V \cdot R$ (V e R são vetores unitários).

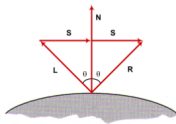
Modelo de Phong

De forma que o vetor de reflexão especular é obtido fazendo (Lei de Snell):

$$R = N \cos \theta + N \cos \theta - L = 2N \cos \theta - L = N(2N \cdot L) - L$$

O vetor V é calculado usando a posição da superfície e a posição de visão (câmera) da mesma forma como o vetor L foi obtido:

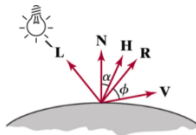
$$V = \frac{P_{\text{view}} - P_{\text{surf}}}{|P_{\text{view}} - P_{\text{surf}}|}$$



Modelo de Blinn-Phong

- Uma simplificação do modelo de Phong é obtida usando o vetor intermediário H entre L e V :

$$H = \frac{L + V}{|L + V|}$$



Modelo de Blinn-Phong

- ▶ Para superfícies não planares, $N \cdot H$ requer menos cálculos do que $V \cdot R$ porque o cálculo do vetor R em cada ponto da superfície envolve o vetor N .
- ▶ Se a posição de visão e a fonte de luz forem distantes da superfície, V e L são constantes, então H é constante para todos os pontos da superfície.
- ▶ H é a direção da superfície que produzirá a reflexão especular máxima na direção de visão.
- ▶ Se $N \cdot H$ for usado no lugar de $V \cdot R$, troca-se o cálculo de $\cos \phi$ pelo de $\cos \alpha$.

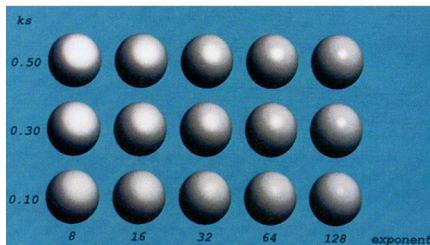
Combinando Reflexão Especular e Difusa

Para uma única fonte de luz puntual, podemos modelar a combinação das reflexões difusa e especular como:

$$I = I_{\text{diff}} + I_{\text{spec}} = (k_a I_a + k_d I_l (N \cdot L)) + k_s I_l (N \cdot H)^{n_s}$$

Combinando Reflexão Especular e Difusa

- ▶ Quando $N \cdot L \leq 0$, o objeto será iluminado apenas pela luz ambiente.
- ▶ Quando $N \cdot H \leq 0$, não existirá reflexão especular.



Múltiplas Fontes de Luz

É possível usar a quantidade de fontes de luz que se desejar, bastando somar as contribuições de reflexão difusa e especular de cada fonte:

$$I = I_{\text{amb}} + \sum_{l=1}^n [I_{l,\text{diff}} + I_{l,\text{spec}}] = k_a I_a + \sum_{l=1}^n I_l [k_d (N \cdot L) + k_s (N \cdot H)^{n_s}]$$

Coeficientes de Reflexão no RGB

- ▶ No modelo de Phong, os coeficientes são constantes.
- ▶ Para cores RGB, as intensidades são modeladas com vetores de 3 elementos que designam os componentes vermelho, verde, e azul:

$$I_l = (I_{l_R}, I_{l_G}, I_{l_B})$$

Coeficientes de Reflexão no RGB

- ▶ Similarmente, os coeficientes de reflexão são também especificados para as 3 componentes de cor:

$$k_a = (k_{a_R}, k_{a_G}, k_{a_B})$$

$$k_d = (k_{d_R}, k_{d_G}, k_{d_B})$$

$$k_s = (k_{s_R}, k_{s_G}, k_{s_B})$$

- ▶ Coeficiente por componente facilita a modelagem do material da superfície (mais realismo).

Material de base para a aula I

- ▶ Hughes, J. F., Van Dam, A., Foley, J. D., McGuire, M., Feiner, S. K., & Sklar, D. F. (2014). Computer graphics: principles and practice. Terceira Edição. Pearson Education.
- ▶ LearnOpenGL. Basic Lighting.
<https://learnopengl.com/Lighting/Basic-Lighting>. Acesso em Abril/2020.
- ▶ Computação Gráfica: Aula 10. Slides de Ricardo M. Marcacini. Disciplina SCC0250/0650, ICMC/USP, 2021.
- ▶ Computação Gráfica: *Rendering*. Slides de Rosane Minghim. Disciplina SCC0250/0650, ICMC/USP, 2018.

Material de base para a aula II

- ▶ Imagens do Modelo de Gouraud:

<https://www.geeksforgeeks.org/gouraud-shading-in-computer-graphics/>.
Acesso em Maio/2023.

- ▶ Colaboração do monitor Matheus da Silva Araújo (Discord: MatheusAraujo#6468).

Exercícios

The background of the slide features a minimalist design with teal-colored geometric shapes. Two large triangles, one on the left and one on the right, point towards the center. These triangles overlap at the bottom, where they form a darker teal triangular shape. The top half of the slide is a plain white background.

Exercícios I

Para a resolução dos exercícios, use o dia de seu nascimento como D e o mês como M .

1. Considere um objeto Lambertiniano com coeficiente de reflexão ambiente $k_a = \frac{D}{40}$ e uma intensidade de luz ambiente $I_a = 0.8$. Calcule a intensidade da luz ambiente refletida pelo objeto.
2. Complemente o modelo de iluminação do exercício anterior utilizando o coeficiente de reflexão difusa $k_d = \frac{M}{15}$, a intensidade da luz puntual $I_l = 0.75$, e um ângulo $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ a seu critério. Determine a intensidade da luz ambiente somada à reflexão difusa.

Exercícios II

3. Adeque o exercício anterior ao modelo de Blinn-Phong tomando o coeficiente de reflexão especular $k_s = \frac{M}{D+20}$, o expoente de reflexão especular $n_s = M \cdot D$, e um ângulo $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ à vontade. Obtenha o valor da intensidade total entre iluminação ambiente, reflexão difusa, e reflexão especular.