

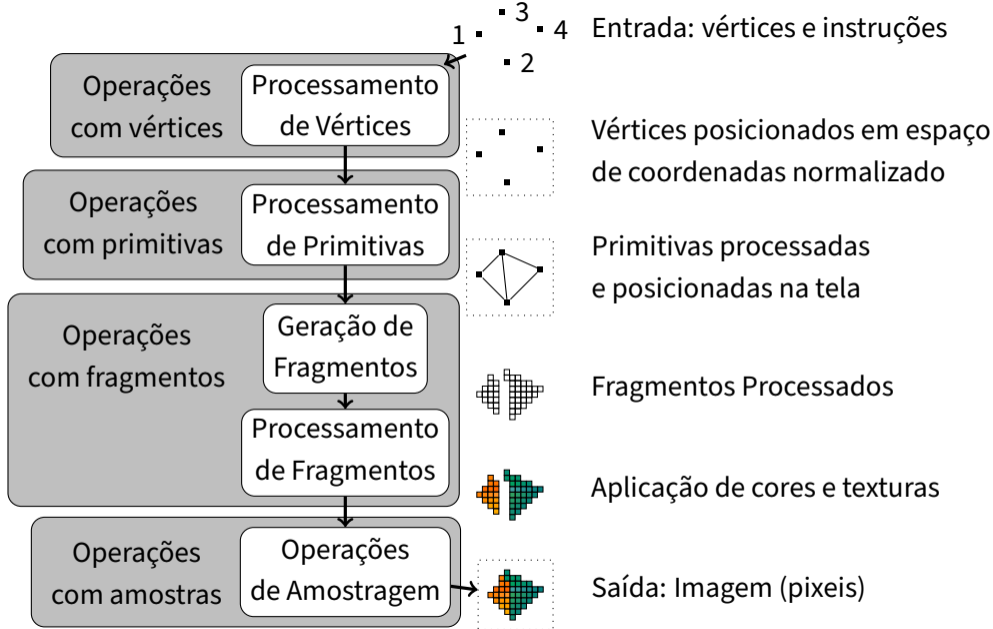
# Computação Gráfica

## Iluminação

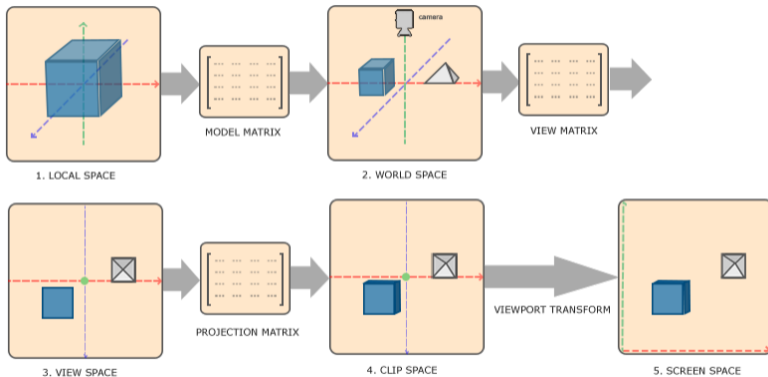
Prof. Alaor Cervati Neto



2023/1



# Pipeline de Visualização



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

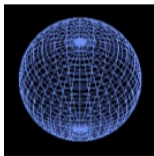
# Motivação

Imagens mais realistas:

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

# Motivação

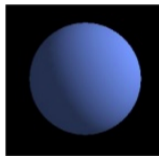
Modelos de iluminação:



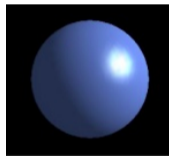
Apenas a malha  
(*Wireframe*)



Cor Uniforme



Luz Ambiente  
+Reflexão Difusa



Luz Ambiente  
+Reflexão Difusa  
+Reflexão Especular

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

Luz Ambiente

# Fontes de Luz

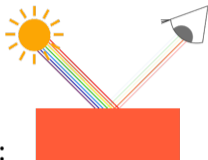
Qualquer objeto que emite energia brilhante é uma fonte de luz e contribui para os efeitos de luz dos outros objetos na cena. Características das fontes de luz:

- ▶ 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

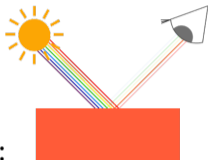


Exemplo do mundo real:

- ▶ 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

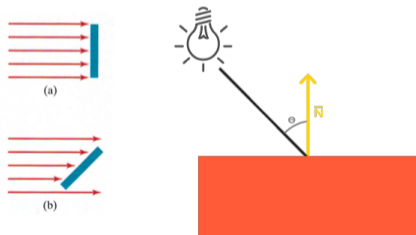
- ▶ Define um nível de brilho geral para a cena.
- ▶ Cada superfície (de algum objeto) irá refletir luz conforme suas propriedades.
- ▶ O nível de Luz Ambiente em uma cena é definido por um parâmetro de intensidade  $I_a$  (um valor escalar entre  $[0, 1]$ ).

# Reflexão Difusa

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

# Reflexão Difusa

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

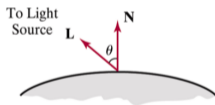


# Reflexão Difusa

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.



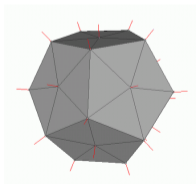
Uma superfície somente será iluminada quando  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ . Quando  $\cos \theta < 0$ , a luz estará atrás da superfície.

# Reflexão Difusa

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

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

$N$  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*)

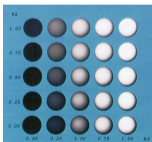
Luz Ambiente + Reflexão Difusa:

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

# 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  $[0, 1]$ .

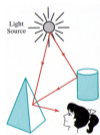


Luz ambiente representa uma fonte de luz distante e não é necessário especificar uma posição de sua fonte. Tentamos simular um efeito de iluminação produzido pela luz refletida de várias superfícies.

# 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 pontual, escalar entre  $[0, 1]$ .

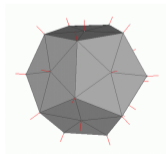


Uma fonte de luz pontual é onidirecional. Pode ser definida por meio de uma posição, da cor da luz, um vetor de direção, e um limite angular  $\cos \theta = N \cdot L$ .

# 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 pontual, 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:

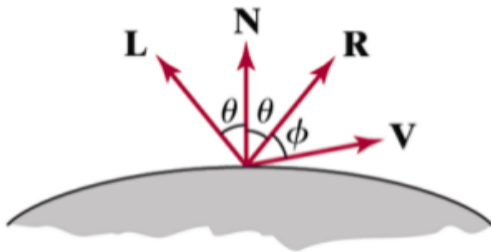
- ▶  $k_a$  e  $k_d$  são escalares  $[0, 1]$  que definem propriedades da superfície.
- ▶  $I_a$  determina a intensidade da luz ambiente, escalar entre  $[0, 1]$ .
- ▶  $I_l$  determina a intensidade da luz puntual, escalar entre  $[0, 1]$ .
- ▶  $N$  é a normal (vetor unitário perpendicular à superfície).
- ▶  $L$  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 white area is framed by teal-colored geometric shapes. On the left and right sides, there are two large teal triangles that point towards each other, meeting at a point at the bottom center. At the bottom center, there is a smaller, darker teal triangle pointing upwards, creating a central point where all three teal shapes meet.

# 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

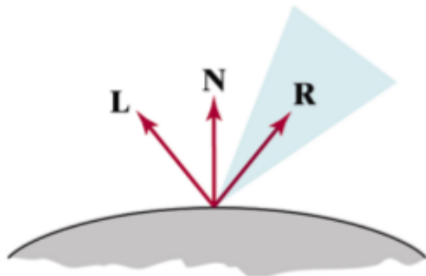
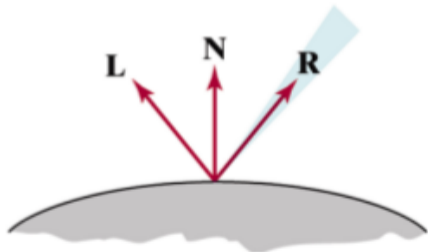
A Reflexão Especular em superfície brilhante representa a reflexão da luz incidente em uma área concentrada ao redor de um ângulo de Reflexão Especular:

- ▶ O ângulo de Reflexão Especular  $\theta$  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 text 'Modelo de Gouraud' centered. At the bottom, there are decorative teal-colored geometric shapes: two large triangles pointing upwards from the left and right edges, and a smaller, darker teal triangle pointing downwards from the bottom center, creating a V-shaped negative space.

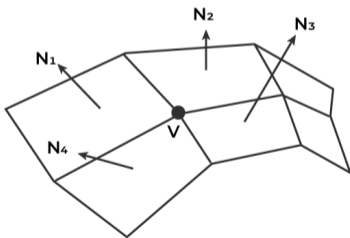
# Modelo de Gouraud

- ▶ 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:

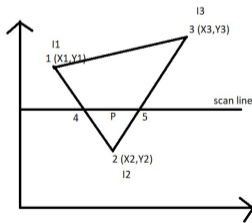
1. Determinar o normal  $N$  em cada vértice do polígono a partir da resultante entre os normais dos polígonos aos quais este vértice pertence.



# Modelo de Gouraud

Os passos para a aplicação do Modelo de Gouraud são:

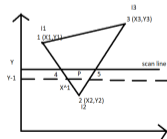
1. Determinar o normal  $N$  em cada vértice do polígono a partir da resultante entre os normais dos polígonos aos quais este vértice pertence.
2. Usar  $N$  e  $L$  para calcular a intensidade  $I$  em cada vértice do polígono.



# 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

# 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).

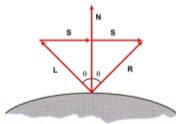
# Modelo de Phong

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:

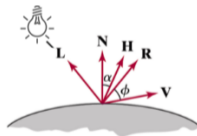
$$V = \frac{P_{\text{view}} - P_{\text{surf}}}{|P_{\text{view}} - P_{\text{surf}}|}$$



# 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  $\cos \alpha$ .

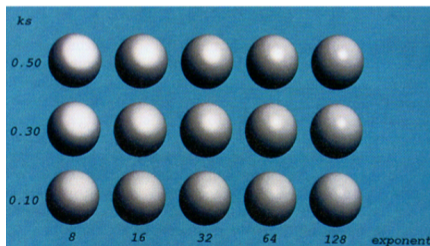
# Combinando Reflexão Especular e Difusa

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:

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

# Coefficientes 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:

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

# Coefficientes de Reflexão no RGB

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

$$k_a = (k_{aR}, k_{aG}, k_{aB})$$

$$k_d = (k_{dR}, k_{dG}, k_{dB})$$

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

- ▶ 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 features a white central area with teal-colored geometric shapes. Two large teal triangles point towards each other from the left and right sides, meeting at a point at the bottom. A smaller, darker teal triangle is positioned at the very bottom center, overlapping the bottom vertices of the two larger triangles.

# 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.