



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Departamento de Computação



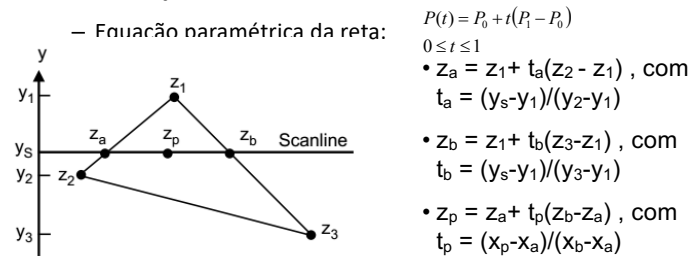
Iluminação e Sombreamento

Prof. Dr. Laurindo de Sousa Britto Neto

1

Tarefa da Aula Anterior

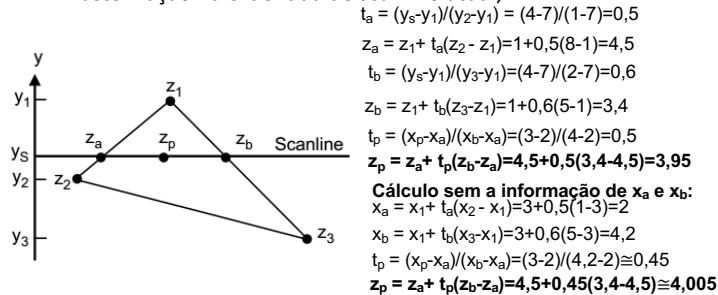
- Determine z_p sabendo que $P_1(3,7,1)$, $P_2(1,1,8)$, $P_3(5,2,5)$, $P_p(3,4,z_p)$, e o que os pixels de 2 a 4 foram selecionados para rasterização na ordenada do *scanline* atual;



2

Tarefa da Aula Anterior

- Determine z_p sabendo que $P_1(3,7,1)$, $P_2(1,1,8)$, $P_3(5,2,5)$, $P_p(3,4,z_p)$, e o que os pixels de 2 a 4 foram selecionados para rasterização na ordenada do *scanline* atual;



3

3

Iluminação Natural

- Ao nosso redor existem:
 - várias formas de energias físicas (radiações eletromagnéticas);
 - fenômeno ondulatório;
- A luz é uma forma de radiação eletromagnética;
- Uma radiação (onda) eletromagnética consiste em um campo elétrico e um campo magnético;
 - variáveis com o tempo e com a posição;
 - perpendiculares entre si e com a direção de propagação;
 - transportam energia (por meio de partículas de fótons);
- Velocidade(v) de propagação(vácuo) $c \approx 300.000\text{km/s}$

4

4

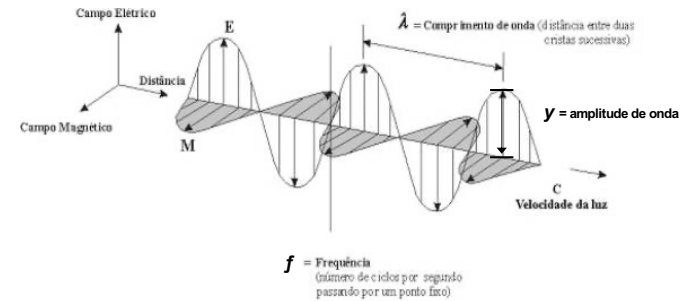
Grandezas Físicas

- As ondas eletromagnéticas são caracterizadas por diversas grandezas físicas:
 - Período (T)** é o intervalo de tempo necessário para que um movimento volte a se repetir;
 - Frequência ($f = 1/T$)** é o número de vibrações por unidade de tempo;
 - Comprimento de onda ($\lambda = v/f = vT$)** é a distância percorrida por uma onda no intervalo de um período;
 - Amplitude (y)** é a altura da onda, e se relaciona com sua intensidade;
 - Energia ($E = hf$ [Planck-Einstein])**: a magnitude da energia de uma partícula de fóton é proporcional à frequência.

5

5

Grandezas Físicas

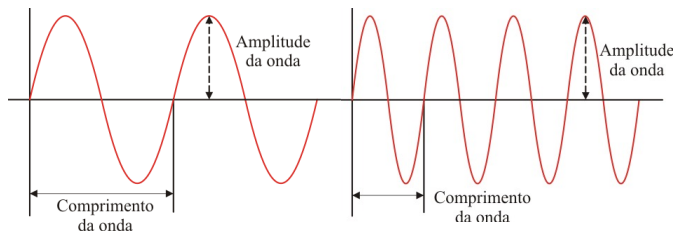


6

6

Amplitude

- Para a mesma amplitude:
 - Se a frequência for maior (menor comprimento de onda), a energia será maior;

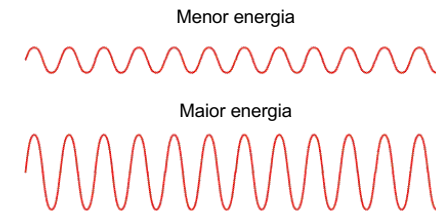


7

7

Frequência

- Para a mesma frequência (ou para o mesmo comprimento de onda):
 - Se a amplitude for maior, a energia será maior.

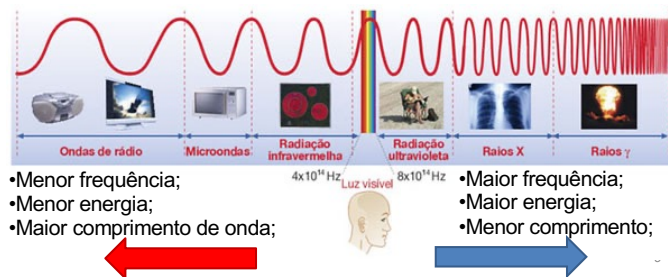


8

8

Espectro Eletromagnético

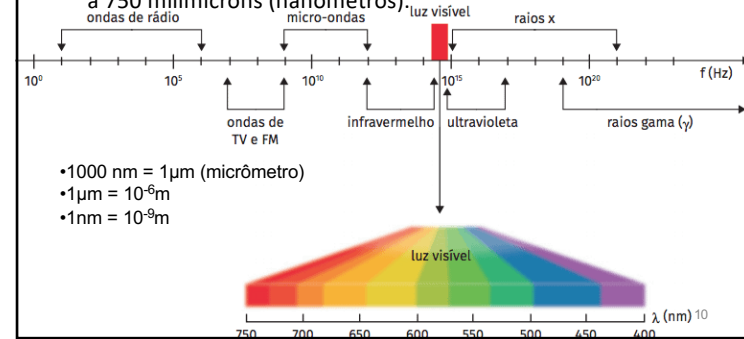
- O espectro eletromagnético é o conjunto de radiações eletromagnéticas conhecida;
- Atualmente, é possível medir radiações:
 - em uma faixa de frequências de 1 a 10^{24} Hz (Hertz);
 - em comprimentos de onda com intervalos de 10^{-16} a 10^{+16} metros.



9

Luz visível

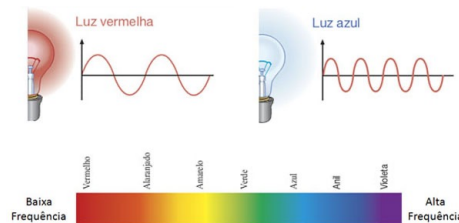
- A Luz visível é a radiação que pode ser percebida pelos nossos órgãos visuais (excita a visão humana);
- O espectro de luz visível é compreendido no intervalo de 380 a 750 milimicrons (nanômetros).



10

Cor da Luz

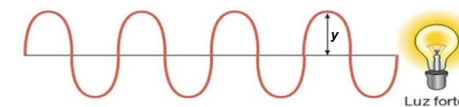
- A cor da luz está relacionada com a frequência de vibração da onda luminosa:
 - Menor frequência corresponde a cores próximas do vermelho;
 - Maior frequência corresponde a cores próximas do violeta.



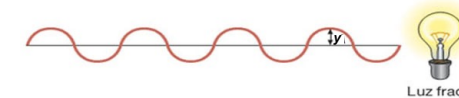
11

Intensidade da Luz

- A Intensidade de uma fonte luminosa está relacionada com a amplitude da onda luminosa da seguinte forma:
 - Quanto maior a Amplitude, maior é a Intensidade da luz.



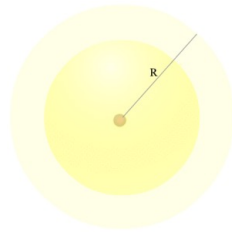
- Quanto menor a Amplitude, menor é a Intensidade da luz.



12

Intensidade da Radiação

- A intensidade de radiação (I) é a definição física do conceito intuitivo de *brilho* de um objeto luminoso;
 - O brilho varia de acordo com a distância da fonte luminosa;
 - Potência (P) determina a quantidade de energia emitida por segundo;
- $$I = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} = \frac{P}{\pi r^2}, \text{ em que } P = \frac{W}{t}$$
- W = trabalho realizado; t = tempo;
 - A intensidade diminui com o quadrado da distância até a fonte

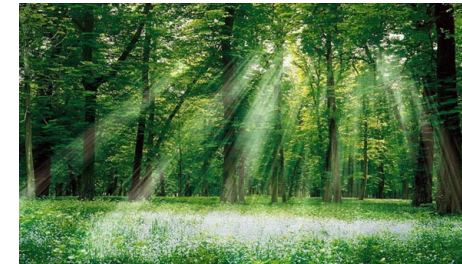


13

13

Propagação Retilínea da Luz

- A luz se desloca em linha reta em qualquer meio transparente e homogêneo.



14

14

Raios e Feixes de Luz

- Raio de luz é uma representação abstrata que representa a direção e o sentido da luz;
- Feixe de Luz é um conjunto de raios luminosos.



15

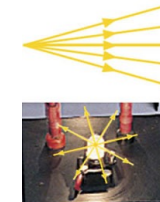
15

Feixes de Luz

Paralelos



Divergentes



Convergentes



16

16

Observações

- A computação gráfica se refere frequentemente às regras da ótica e à física das radiações para explicar a interação da luz nos objetos;
- No entanto, a inexistência de modelos completos e abrangentes levam os programadores a simplificações do processo computacional;
- Em consequência, muitos modelos de iluminação, atualmente em uso em computação gráfica, contêm simplificações sem nenhum fundamento teórico, mas que alcançam um bom resultado prático.

17

17

Modelos de Iluminação

- Objetivo: Realismo Visual
- Todo objeto em cena é potencialmente uma fonte de luz
- A Luz é emitida ou refletida de objetos:
 - Emissores:
 - Fontes de luz (lâmpadas, velas, fogo, sol, estrelas etc.);
 - Caracterizam-se por suas intensidades e frequências (ou comprimento de onda) ;
 - Refletores:
 - Objetos na cena que refletem a luz (renderizados);
 - Caracterizam-se pela propriedade de suas superfícies (cor, material e polimento).

18

18

Tipo de Emissores

- Natural:
 - simulam a luz do sol (ou da lua)
 - ambiente (luz da atmosfera, nuvens etc.)
 - quando não tem uma direção identificável
 - simula a iluminação geral vinda da reflexão da luz em muitas superfícies difusas
- Artificiais:
 - Luzes Fotométricas: direcionadas a um ponto
 - Pontual (uma única lâmpada)
 - Linear (fluorescente)
 - Áreas iluminadas (painéis luminosos)
 - Luz Omni (pontual – todas as direções)
 - Luz Direcional (simula a luz solar)
 - Luz Refletores (Spot Light)



19

19

Exemplo de Luz Fotométrica



20

20

Modelo de Iluminação de Phong

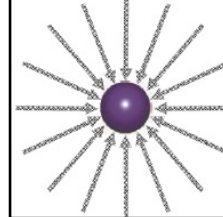
- Permite calcular o valor da intensidade de um raio refletido por uma superfície em função:
 - da orientação da superfície,
 - da posição da câmera,
 - da posição da fonte de luz;
 - das propriedades da superfície.
- Considera a reflexão da energia luminosa como a combinação linear de três componentes:
 - Reflexão ambiente (Luz ambiente – Iluminação Global);
 - Reflexão difusa (Lambertiana);
 - Reflexão especular.

21

21

Reflexão Ambiente

- Modelo mais simples:
 - A reflexão ambiente atinge as superfícies igualmente em todas as direções, a partir de uma luz difusa não-direcional
 - usa a própria cor do objeto atenuada por um fator de iluminação ambiental;
 - Reflete a mesma quantidade de luz em todas as direções.



$$I = I_a k_a$$



22

22

Entendendo a Fórmula da Reflexão Ambiente

$$I = I_a k_a$$

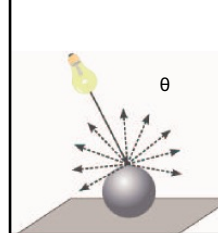
- I = intensidade da componente de reflexão ambiente da superfície em estudo (cor ambiente refletida da superfície);
- I_a = intensidade da luz ambiente;
- k_a = reflexividade da luz ambiente pelo material que compõe a superfície.

23

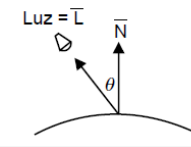
23

Reflexão Difusa (Lambertiana)

- Superfícies foscas, conhecidas como Lambertianas;
- Luz direcional;
- Reflete em todas as direções, mas a quantidade de luz varia de acordo com o ângulo formado com a normal do objeto.



$$I = I_d k_d \cos \theta$$



24

24

Reflexão Ambiente e Difusa

- Modelo de Lambert
- Considerando a iluminação ambiente e difusa:

$$I = I_a k_a + I_d k_d \cos \theta$$

- Problema: não considera a distância do observador (d):

$$I = I_a k_a + I_d k_d \cos \theta / (d + K)$$

$$I = I_a k_a + I_d k_d \cos \theta / (d + K)^2$$

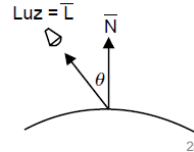
$$I = I_a k_a + f_{at} I_d k_d \cos \theta$$

- Simplificando os cálculos

$$N \cdot L = \|N\| \|L\| \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = \frac{N \cdot L}{\|N\| \|L\|}$$

$$N \cdot L = N_x L_x + N_y L_y + N_z L_z$$

$$I = I_a k_a + I_d k_d (N \cdot L) \quad \text{com } \|N\| = \|L\| = 1$$



25

Reflexão Especular

- Superfícies brilhantes, polidas ou lustras;
- Responsável pelo brilho da luz no objeto;
- o fóton não interage com os pigmentos da superfície deixando a cor da luz refletida igual à cor original da luz incidente

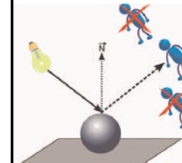
- Calculando a contribuição da luz especular:

$$I = I_a k_a + I_d k_d \cos \theta + I_s k_s \cos^n \phi$$

- Simplificando os cálculos:

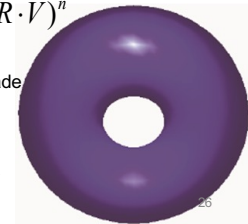
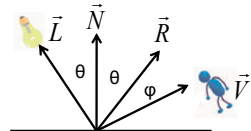
$$I = I_a k_a + I_d k_d (N \cdot L) + I_s k_s (R \cdot V)^n$$

Reflexão Perfeita:



Reflexão Imperfeita:

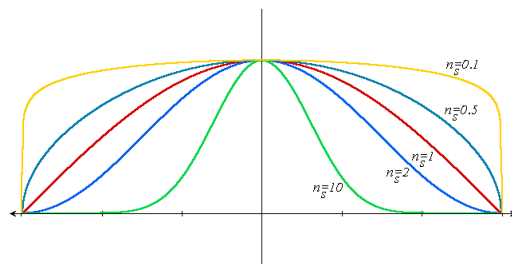
aproximação mais próxima da realidade



26

Coeficiente de Especularidade

- Indica o quão uma superfície é polida;
 - Espelhos ideais têm especularidade infinita ($n \rightarrow \infty$)
 - Em OpenGL, varia de 0 a 128



27

Modelo de Cor

- Considerando um modelo de cor como o RGB, a intensidade seria decomposta nos três canais:

$$I_R = I_{aR} k_{aR} + I_{dR} k_{dR} (N \cdot L) + I_{dR} k_{sR} (R \cdot V)^n$$

$$I_G = I_{aG} k_{aG} + I_{dG} k_{dG} (N \cdot L) + I_{dG} k_{sG} (R \cdot V)^n$$

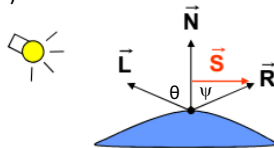
$$I_B = I_{aB} k_{aB} + I_{dB} k_{dB} (N \cdot L) + I_{dB} k_{sB} (R \cdot V)^n$$

28

28

Como Calcular o vetor R?

- Pela lei de Snell: $\theta = \psi$;
 - Ângulo de incidência é sempre igual ao ângulo de reflexão;
- $$R = (N \cdot L)N + S \quad (1)$$
- $$S = (N \cdot L)N - L \quad (2)$$
- $$R = (N \cdot L)N + (N \cdot L)N - L \text{ (substituindo S na Equação 1)}$$
- $$R = 2N(N \cdot L) - L$$

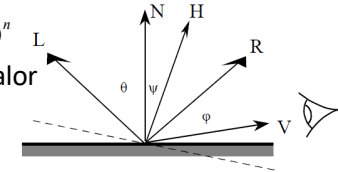


29

29

Aproximação de Blinn

- Quando se calcula a reflexão especular é necessário calcular o vetor R, para todos os pontos de uma superfície;
- Para evitar esses cálculos, efetua-se a aproximação de Blinn: $H = \frac{L+V}{\|L+V\|}$ ou $H = \frac{L+V}{2}$ se $\|L\| = \|H\| = 1$
- Podemos substituir $(R \cdot V)^n$ por $(N \cdot H)^n$ usando um valor de n tal que os resultados sejam aproximados.

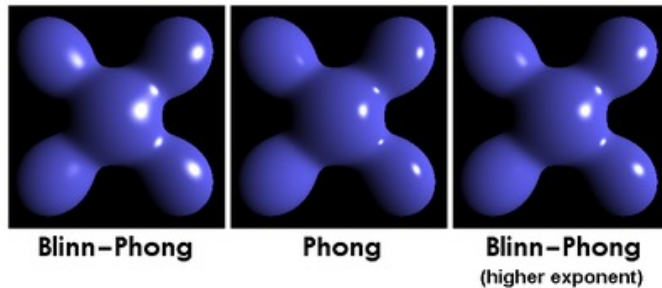


30

30

Exemplo Aproximação de Blinn

- $n' = 4n$

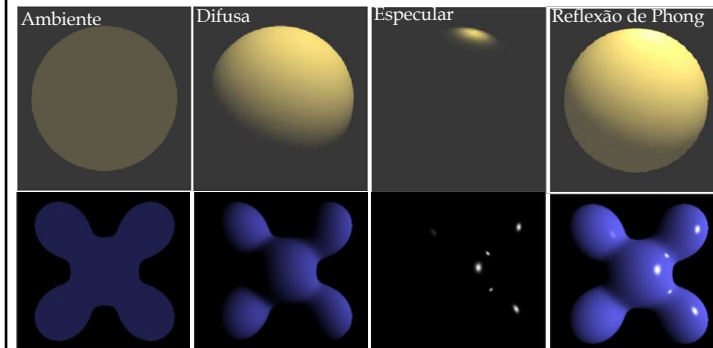


32

32

Exemplos do Modelo de Phong

$$I = I_a k_a + I_d k_d (N \cdot L) + I_s k_s (N \cdot H)^n$$



33

33

Tipos de Modelos de Iluminação

- Diretos (Local)
 - Interação simples entre luz e objetos;
 - Consideram somente fontes de luzes diretas;
 - Controlam o efeito de luz para poucos pixels da imagem e aplicam interpoladores para o cálculo dos demais;
 - Processo em tempo-real suportado pelo OpenGL
 - Ex: modelo de iluminação de Phong

$$I = I_a k_a + I_d k_d (N \cdot L) + I_s k_s (N \cdot H)^n$$

34

34

Exemplo



35

35

Tipos de Modelos de Iluminação

- Indiretos (Iluminação Global)
 - Interação múltipla entre luz e objetos:
 - Sombra;
 - Refração;
 - Reflexões Inter-objetos;
 - Considera fontes de luz diretas e indiretas;
 - Controlam o efeito de luz para cada pixel na imagem;
 - Programação em GPU (tempo real);
 - Ex: Ray tracing e Radiosidade.

36

36

Exemplos de Ray tracing



37

37

Ray tracing em Tempo Real

- Design Garage Ray Trace Demo -



38

38

Exemplo de Radiosidade



39

39

Sombreamento (*Shading*)

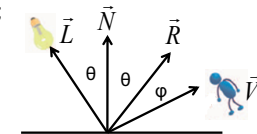
- **Definição:**
 - processo de se aplicar um modelo de iluminação para vários pontos de uma superfície
- **Objetivo:**
 - calcular a cor de cada ponto das superfícies visíveis
- **Algoritmo:**
 - calcular a normal em cada ponto e aplicar um modelo de iluminação
- **Métodos mais utilizados:**
 - Sombreamento Constante (*Flat Shading*)
 - Sombreamento Interpolado (*Smooth Shading*)
 - Algoritmo de Gouraud
 - Algoritmo de Phong

40

40

Modelo de Sombreamento Constante

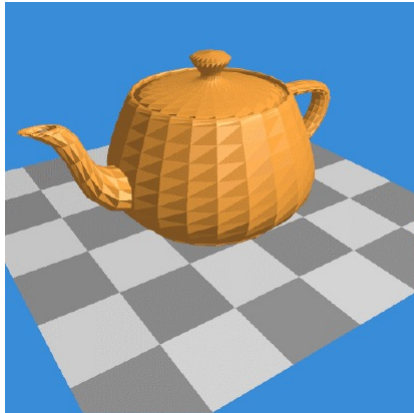
- *Flat, faceted* ou *constant shading*
- Cor calculada em apenas um ponto do polígono e replicada nos pontos restantes
- **Condições:**
 - Fonte de luz no infinito, de modo que $\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}$ é constante em qualquer ponto do polígono;
 - Observador no infinito, de modo que $\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}$ é constante em qualquer ponto do polígono;
 - As superfícies são faces planas e não uma aproximação curva



41

41

Exemplo de *Flat Shading*



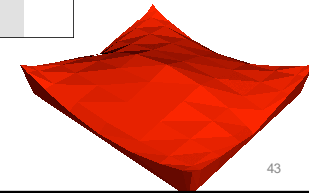
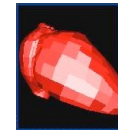
42

Modelo de Sombreamento Constante

• Problemas

- Descontinuidades nas fronteiras dos polígonos
- Descontinuidade da intensidade da luz
- Efeito *mach banding*:

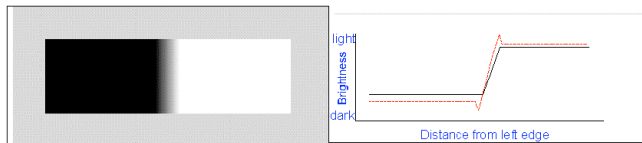
- descreve como a mente humana aumenta o contraste subconscientemente entre duas superfícies com luminâncias diferentes.



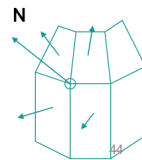
43

Modelo de Sombreamento Gouraud

- Melhora os problemas encontrados no sombreamento constante, mas ainda apresenta o efeito *mach banding* de forma menos perceptível, pela descontinuidade da luz;



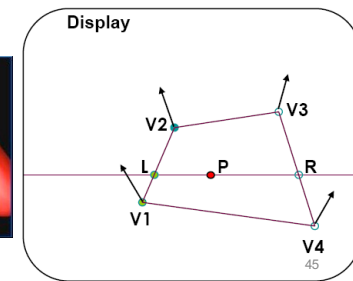
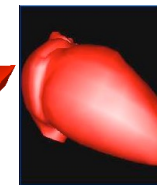
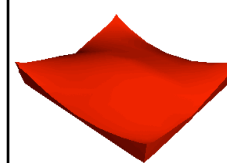
- Calcula as normais dos vértices;
- Calcula a cor para cada vértice, interpolando-as linearmente para o cálculo da cor em outros pontos do polígono.



44

Modelo de Sombreamento Gouraud

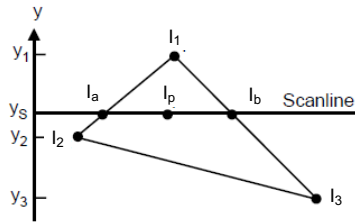
- Cor do ponto L é obtida pela interpolação da cor em V2 e V1
- R = interpolação de cor de V4 e V3
- P = interpolação de cor de L e R



45

Modelo de Sombreamento Gouraud

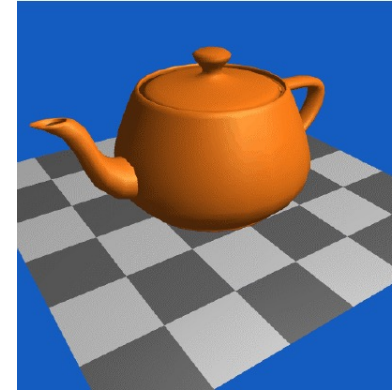
- $I_a = I_1 + t_a(I_2 - I_1)$, em que $t_a = (y_s - y_1)/(y_2 - y_1)$
- $I_b = I_1 + t_b(I_3 - I_1)$, em que $t_b = (y_s - y_1)/(y_3 - y_1)$
- $I_p = I_a + t_p(I_b - I_a)$, em que $t_p = (x_p - x_a)/(x_b - x_a)$



46

46

Exemplo *Gouraud Shading*

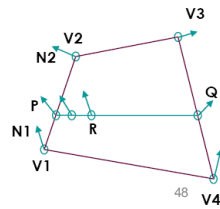


47

47

Modelo de Sombreamento Phong

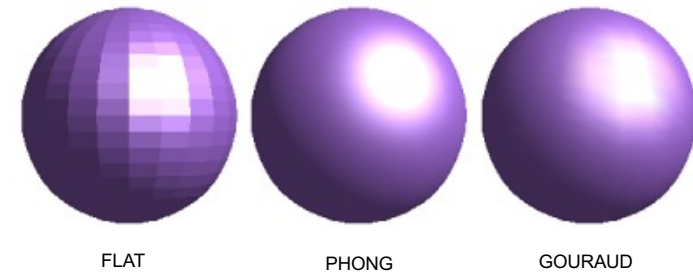
- Sombreamento de Phong \neq Iluminação de Phong
 - Iluminação de Phong: calcula a iluminação num ponto da superfície de um objeto.
 - Sombreamento de Phong: calcula a interpolação linear das normais dos vértices em qualquer ponto da face
- Efetua a interpolação das normais em vez da cor
- Para cada normal calculamos a cor por meio do modelo de iluminação
- Normal do ponto P é obtida pela interpolação da normal em V2 e V1
- Q = interpolação da normal de V4 e V3
- R = interpolação da normal de P e Q



48

48

Flat x Phong x Gouraud



FLAT

PHONG

GOURAUD

49

49

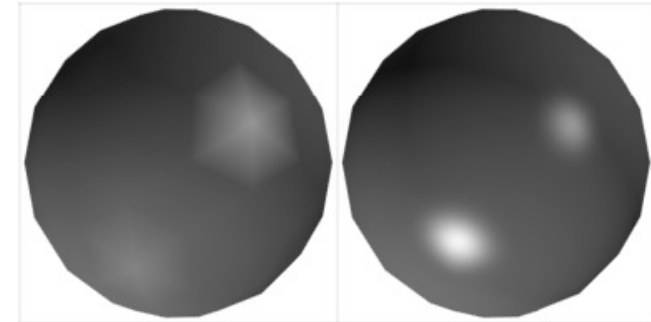
Limitações das Aproximações Interpoladas

1. Silhuetas poligonais continuam presentes
2. Interpolação dependente da orientação dos polígonos
3. Problemas nos vértices compartilhados
4. Falso sombreado constante em faces adjacentes

50

50

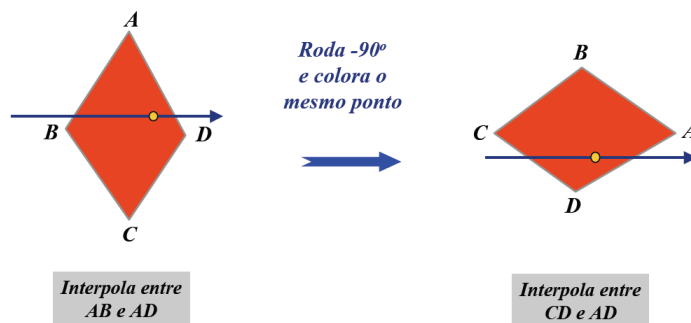
1. Silhuetas poligonais continuam presentes



51

51

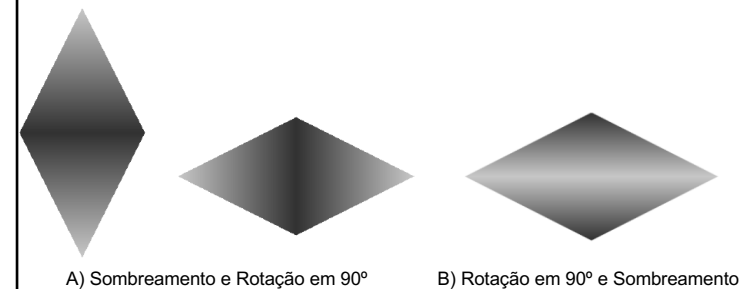
2. Interpolação dependente da orientação dos polígonos



52

52

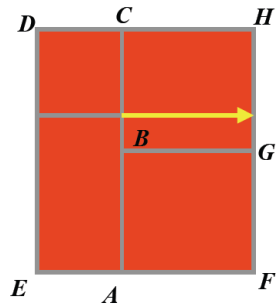
2. Interpolação dependente da orientação dos polígonos



53

53

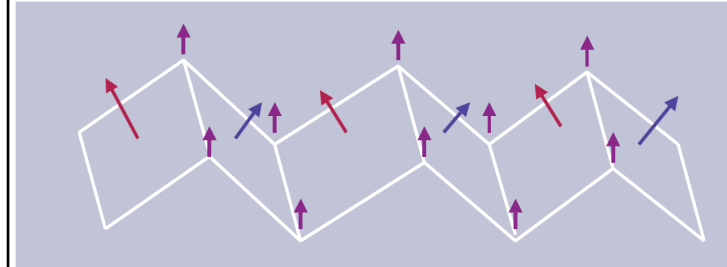
3. Problemas nos vértices compartilhados



54

54

4. Falso sombreamento constante em faces adjacentes



55

55

Tarefa

1. Quais os tipos de reflexões consideradas no modelo de iluminação de Phong? Descreva-as resumidamente com suas palavras.
2. Quais as formas de sombreamento (*shading*) mais utilizadas? Descreva-as resumidamente com suas palavras.
3. Quais as limitações das aproximações interpoladas? Descreva-as resumidamente com suas palavras.

56

56