

# Iluminação e Sombreamento

# Modelos de iluminação

- Um **modelo de iluminação** é um método que nos permite avaliar a intensidade ou a cor da luz que se observa num determinado ponto na superfície dum objeto.
- Uma **técnica de sombreamento** é um processo que usa o resultado da aplicação dum modelo de iluminação a um conjunto de pontos numa superfície para determinar a intensidade/cor da luz observada em todos os pixels na imagem que correspondem à superfície do objeto.
- As técnicas de sombreamento podem aplicar o modelo de iluminação a todos os pontos visíveis da superfície ou usar valores obtidos por interpolação dos produzidos para um subconjunto daqueles:
  - Rasterizers (WebGL) usam normalmente interpolação na iluminação
  - Os algoritmos de *ray tracing* avaliam o modelo de iluminação para cada pixel da imagem e em muitos outros pontos (em cada interseção raio-objeto)

# Modelos de iluminação

- Os requisitos do foto-realismo incluem:
  - Uma representação fidedigna da geometria dos objetos
  - Uma descrição apropriada dos efeitos produzidos pela luz
- Os efeitos produzidos pela luz são descritos por modelos que tratam da interação da luz com a superfície dos objetos
- Os modelos baseados em física tomam em consideração vários fatores: tipo de material da superfície; posição relativa das fontes de luz e dos demais objetos; condições de iluminação da cena. Exemplos:
  - Materiais: opacos vs. transparentes? Superfície baça ou brilhante? Superfície textura ou lisa?
  - Fontes de luz: forma? Cor? Posição?
- Quando a luz entra nos nossos olhos, os processos ligados à percepção assumem o controlo do que vemos.

# Modelos de iluminação

Dadas:

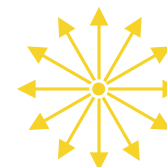
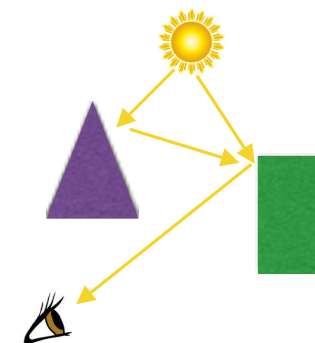
- Propriedades ópticas das superfícies
- Posições relativas das superfícies na cena
- Cores e posições das fontes de luz
- Uma especificação de como a cena irá ser observada

Um modelo de iluminação irá calcular a intensidade/cor projetada por um ponto particular numa superfície numa determinada direção de observação

Em Computação Gráfica, os modelos de iluminação são, por vezes, derivados de modelos baseados em leis da física, mas onde são aplicadas algumas aproximações com base na experiência, por forma a reduzir a complexidade computacional.

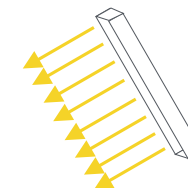
# Fontes de luz

- A luz refletida por um objeto é proveniente de contribuições das fontes de luz (emissores) e de outras superfícies refletoras (refletores).
- Em relação à geometria, as fontes de luz mais comuns são:
  - Pontuais
  - Direcionais
  - Distribuídas por uma área ou volume
  - Com um comportamento semelhante a um foco



Fonte de luz pontual

A área da fonte de luz é relativamente pequena quando comparada com os objetos da cena

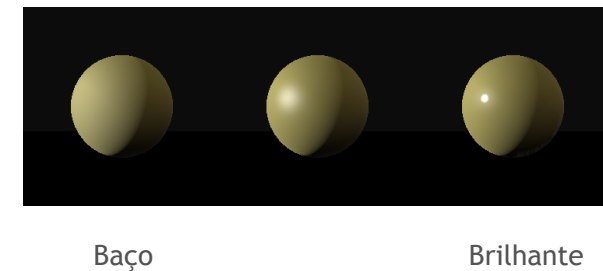
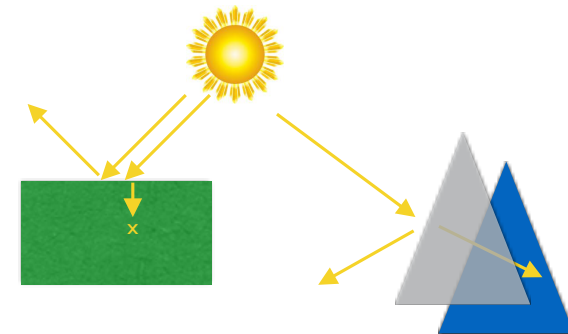


Fonte de luz distribuída

A área da fonte de luz é comparável à dimensão dos objetos

# Materiais

- A luz que incide num objeto opaco é parcialmente refletida e parcialmente absorvida
- Nos materiais transparentes, a luz é simultaneamente refletida e transmitida através do material
- As superfícies polidas ou brilhantes refletem mais luz que as superfícies mais baças, havendo nestas uma maior absorção
- As superfícies rugosas ou com grão tendem a espalhar a luz refletida (reflexão difusa) e a superfície aparenta o mesmo aspeto quando observada de diferentes direções
- A concentração dos reflexos numa determinada região (reflexão especular) ocorre nas superfícies polidas.



# Modelo de iluminação empírico

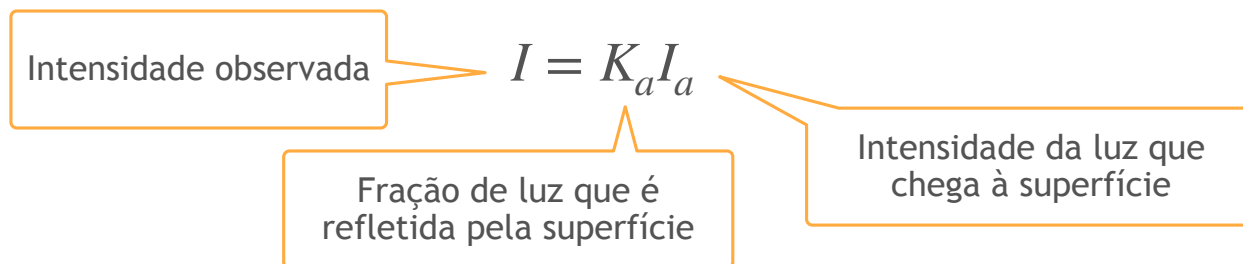
## Luz ambiente

- Uma superfície que não esteja exposta de forma direta a uma fonte emissora de luz será, ainda assim, visível, se os objetos nas proximidades estiverem a ser iluminados de forma direta.
- Uma aproximação simples é considerar que a todos os locais da cena, e de igual forma, chega luz, proveniente de toda e qualquer direção.
- Esta aproximação é fácil de modelar usando um parâmetro  $I_a$  (intensidade da luz ambiente) que afeta todas as superfícies da cena.
- Contudo, a luz refletida por cada superfície depende do respetivo material.



## Luz ambiente (caso acromático)

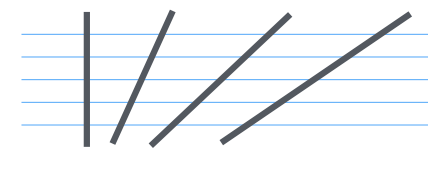
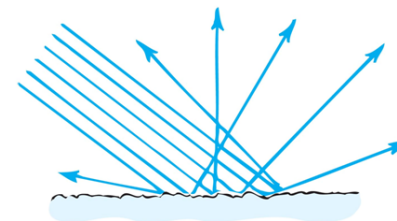
- A fração de luz incidente que é refletida por uma determinada superfície pode ser modelada por um parâmetro  $K_a \in [0,1]$
- $K_a$  é um parâmetro de natureza empírica e não corresponde a qualquer propriedade física do material
- A quantidade de luz refletida por essa superfície pode ser modelada por:



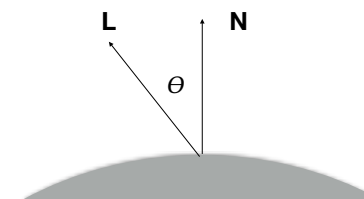
Computer Graphics Principles and Practice, 2nd ed.

# Reflexão difusa

- A reflexão difusa caracteriza-se por não depender da direção de observação, uma vez que a luz é igualmente refletida em todas as direções pela superfície.
- A quantidade de luz que chega por unidade de área depende do ângulo de incidência.
- Uma vez mais, a quantidade de luz que é refletida de forma difusa pela superfície pode ser modelada por um parâmetro dessa superfície  $K_d \in [0,1]$ .
- A intensidade depende apenas do ângulo  $\theta$  entre o vetor que aponta para a fonte de luz  $\mathbf{L}$  e o vetor normal  $\mathbf{N}$



*increasing area  $\Rightarrow$  less light per unit*



# Reflexão difusa (explicação física)

- As superfícies com este comportamento designam-se por refletores de Lambert, obedecendo à lei do cosseno:

*“a quantidade de luz refletida a partir por unidade de área  $dA$  em direção ao observador é diretamente proporcional ao cosseno do ângulo formado entre a direção do observador e a normal à superfície”*

- Uma vez que a área da superfície observada é inversamente proporcional ao cosseno daquele mesmo ângulo, os dois fatores cancelam-se.
- À medida que o ângulo de observação aumenta, o observador vê cada vez mais superfície, mas a quantidade de luz refletida por unidade de área é proporcionalmente menor.



# Reflexão difusa

- A reflexão difusa pode então ser modelada pela expressão:

$$I = I_p K_d \cos \theta$$

Intensidade da fonte de luz

Coeficiente de reflexão difusa do material

Ângulo formado entre **N** e **L**  $[0, \pi/2]$

- Se, **N** e **L** estiverem normalizados (norma unitária), então podemos escrever:

$$I = I_p K_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$

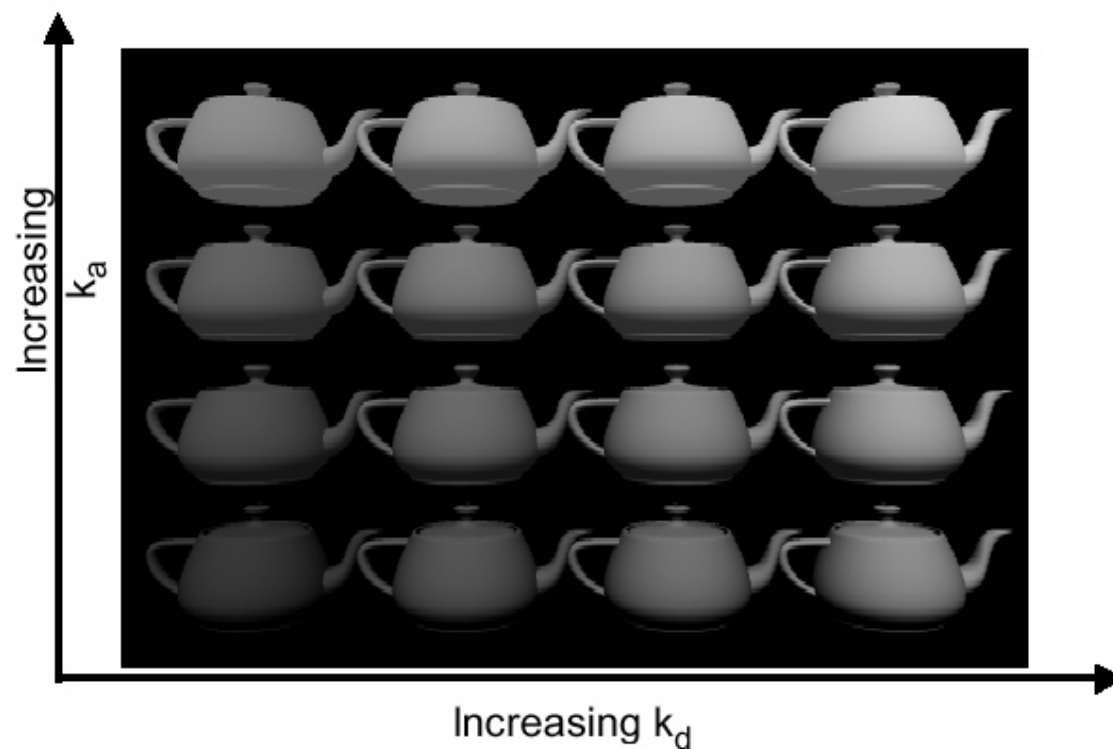
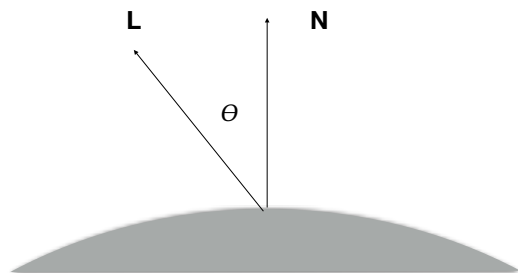
**Nota:** Se a luz estiver muito, muito, distante dos objectos, **L** poderá ser considerado constante e luz passará a ser direcional

**Nota:** A determinação da iluminação poderá ser efetuada em WC ou em coordenadas da câmara. Não podemos efetuar os cálculos em Clip Space (após multiplicação pela matriz de projeção)

## Reflexão ambiente + difusa

- Combinando os dois termos de reflexão:

$$I = I_a K_a + I_p K_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$



# Iluminação cromática

- Luzes e superfícies com cor são obtidas com facilidade amostrando a luz em diferentes comprimentos de onda
- Podemos escrever uma equação semelhante à da reflexão ambiente e da reflexão difusa para cada comprimento de onda  $\lambda$ :

$$I_\lambda = I_{a,\lambda} K_{a,\lambda} + I_{p_\lambda} K_{d,\lambda} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$

- Em vez de cobrir todo o espectro de luz visível, consideram-se normalmente apenas 3 amostras para vermelho, verde e azul
- Em alternativa, se quisermos separar a cor do objecto dos coeficientes de reflexão, podemos adoptar a equação:

$$I_\lambda = I_{a,\lambda} K_a O_{a,\lambda} + I_{p_\lambda} K_d O_{d,\lambda} (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$

- Ou em notação vetorial:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_a + \mathbf{I}_p K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$

**Nota:** Não há nenhuma razão física para  $\mathbf{O}_a \neq \mathbf{O}_d$

# Atenuação das fontes de luz

- A energia luminosa proveniente duma fonte decai com o quadrado da distância da superfície iluminada à respectiva fonte,  $dL$
- Com a introdução dum factor de atenuação  $f_{att} \leq 1$  podemos modelar esse decaimento:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_a + f_{att} \mathbf{I}_p K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})$$

- Uma escolha natural para  $f_{att}$  seria:

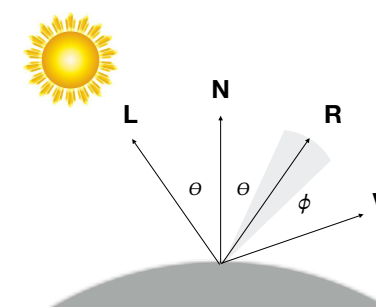
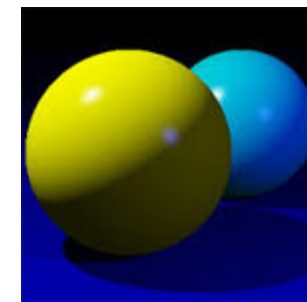
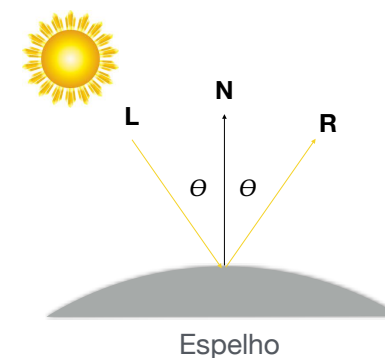
$$f_{att} = \frac{1}{d_L^2}$$

- Mas na prática não funciona bem (por falta da iluminação indirecta) e usa-se antes:

$$f_{att} = \min\left(1, \frac{1}{c_1 + c_2 d_L + c_3 d_L^2}\right)$$

# Reflexão especular

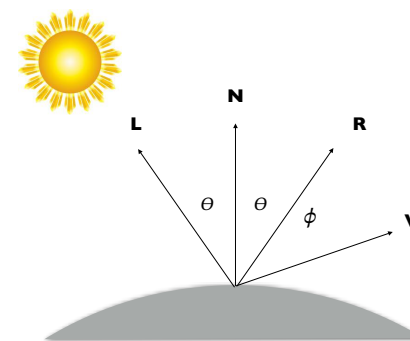
- Os refletores perfeitos (espelhos) refletem a luz de acordo com a lei da reflexão
- A reflexão especular é o resultado da reflexão total, ou quase total, da luz incidente, num conjunto de direções concentradas numa pequena região, criando *highlights*
- Os refletores não perfeitos possuem uma reflexão especular numa região finita em torno do vetor R





## Reflexão especular (Modelo de Phong)

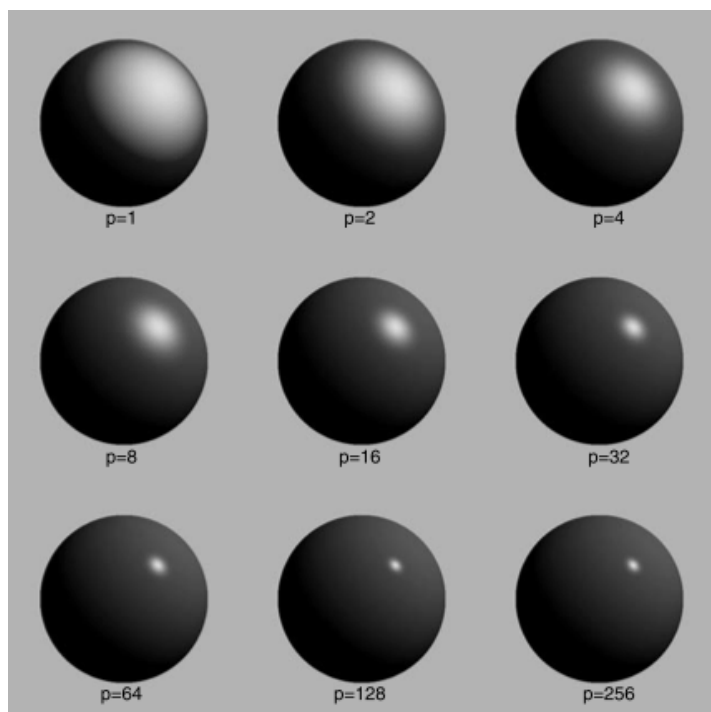
- Desenvolvido por Phong Bui-Tuong em 1975.
- A reflexão especular é máxima quando  $\mathbf{V} = \mathbf{R}$  ( $\phi = 0$ ) e decai rapidamente à medida que  $\phi$  cresce.
- O decaimento é modelado por um termo  $\cos^n \phi$ .



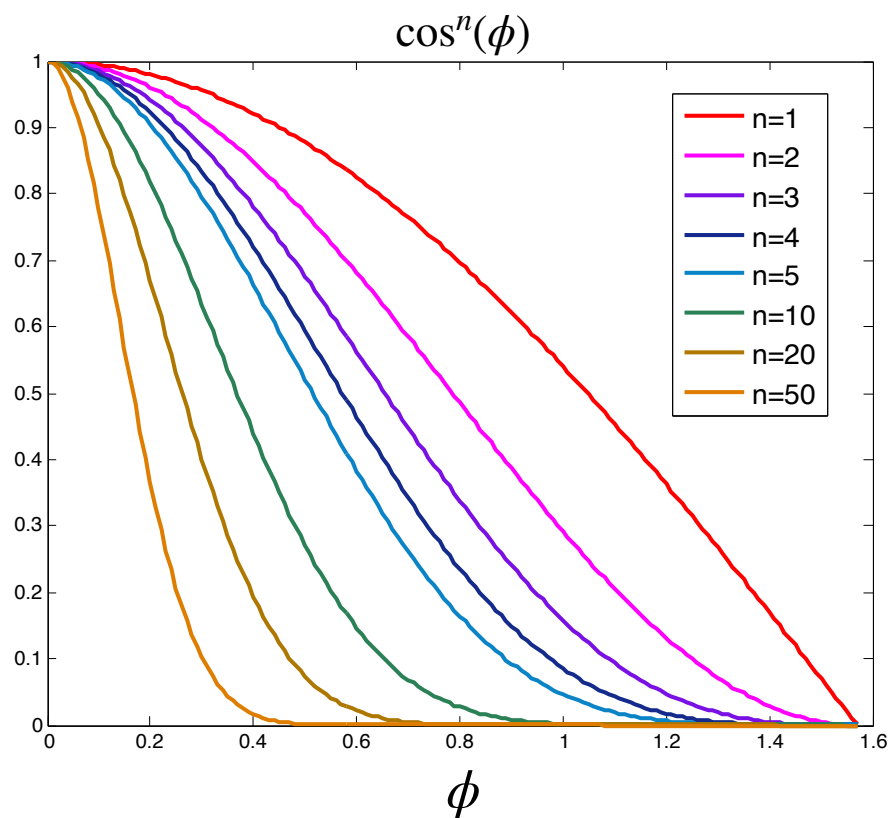
$$I_p W(\theta) \cos^n \phi$$

Para objectos reais, o coeficiente de reflexão especular depende do ângulo de incidência da luz, embora na prática se

# Reflexão especular (Modelo de Phong)



Efeito da variação do expoente n (aqui p) do termo der reflexão especular



$$I_p W(\theta) \cos^n \phi$$

## Reflexão especular (Modelo de Phong)

- Se  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{L}$  e  $\mathbf{N}$  estiverem normalizados e se simplificarmos, fazendo  $W(\theta) = K_s$ , então:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_a + f_{att} \mathbf{I}_p \left[ K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + K_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n \right]$$

- Note-se que os reflexos especulares têm a mesma cor que a fonte de luz. Isto é válido para a maior parte dos objetos, mas não para todos...

## Modelo de iluminação de Phong

- Generalizando o modelo com a introdução duma cor especular  $\mathbf{O}_s$ :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_a + f_{att} \mathbf{I}_p \left[ K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + K_s \mathbf{O}_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n \right]$$

- Em algumas implementações encontramos  $K_a = K_d \dots$
- Por vezes encontramos os coeficientes de reflexão pré-multiplicados pela cor:

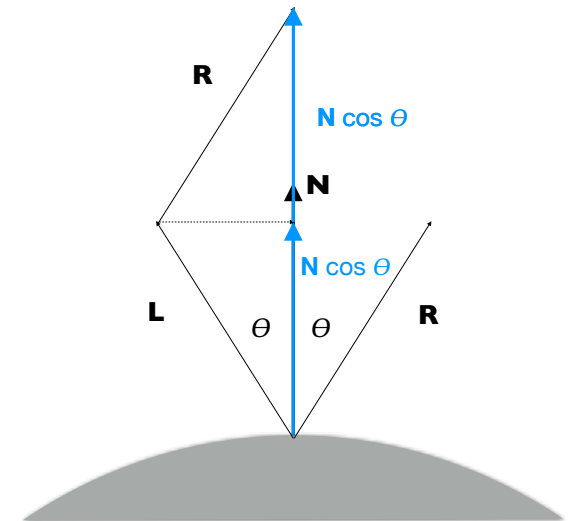
$$\mathbf{K}_i = K_i \mathbf{O}_i, \text{ para } i \in \{a, d, s\}$$

## Determinação de $\mathbf{R}$

- Para calcular  $\mathbf{R}$  é necessário refletir o vetor  $\mathbf{L}$  em relação a  $\mathbf{N}$
- A projeção de  $\mathbf{L}$  segundo  $\mathbf{N}$  é dada por  $\mathbf{N} \cos(\theta) = (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})\mathbf{N}$
- Como  $\mathbf{L} + \mathbf{R} = 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})\mathbf{N}$ , obtém-se:

$$\mathbf{R} = 2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})\mathbf{N} - \mathbf{L}$$

- GLSL tem uma função `reflect(L, N)`, que devolve  $\mathbf{R}$ , mas  $\mathbf{L}$  terá que apontar para a superfície (vetor incidente)



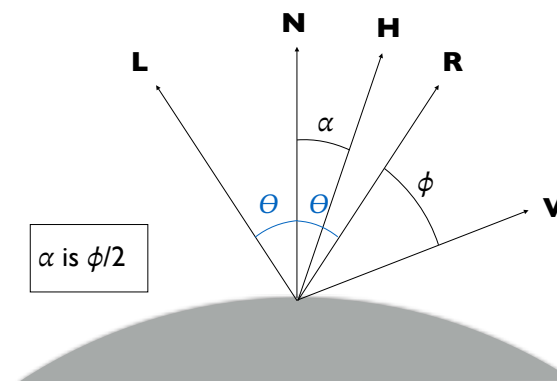
# Modelo de iluminação de Phong (Formulação do vetor médio)

- Uma aproximação à componente especular no modelo de iluminação de Phong consiste na utilização do vetor médio **H**:

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

e na substituição de  $\cos \phi (= \mathbf{R} \cdot \mathbf{V})$  por  $\cos \alpha (= \mathbf{N} \cdot \mathbf{H})$

- Para luzes e observadores afastados, **H** é essencialmente constante, evitando o cálculo de **R**. Para superfícies curvas, **N** varia ao longo da superfície



**Nota:** Assume-se que todos os vetores estão no mesmo plano

# Modelo de iluminação de Phong (Formulação do vetor médio)

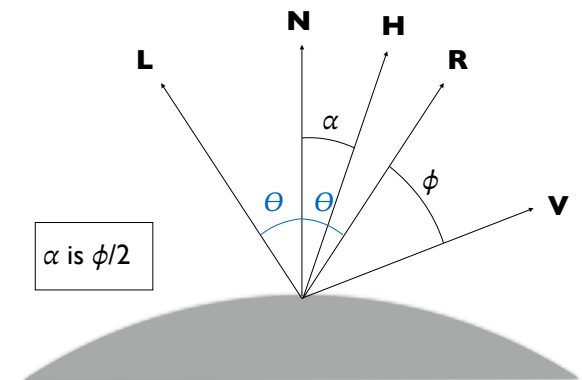
•

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_a + f_{att} \mathbf{I}_{p_d} [K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + K_s \mathbf{O}_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n]$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_d + f_{att} \mathbf{I}_p [K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + K_s \mathbf{O}_s (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n]$$

Cor difusa

Cor especular



**Nota:** Assume-se que todos os vetores estão no mesmo plano

## Múltiplas fontes de luz

- A intensidade de luz ambiente ( $\mathbf{I}_a$ ) pode ser tratada como uma propriedade global da cena:

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_a K_a \mathbf{O}_d + \sum_{l=1}^L f_{att,l} \mathbf{I}_{p,l} \left[ K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + K_s \mathbf{O}_s (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n \right]$$

- Ou como resultado do contributo de cada fonte de luz:

$$\mathbf{I} = \sum_{l=1}^L \mathbf{I}_{a,l} K_a \mathbf{O}_d + f_{att,l} \mathbf{I}_{p,l} \left[ K_d \mathbf{O}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + K_s \mathbf{O}_s (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n \right]$$

- A radiância é uma grandeza que não está majorada.
- Normalmente, a cor está limitada ao intervalo  $[0,1]$ ...
- ... nessas condições, qualquer dos termos acima pode saturar!

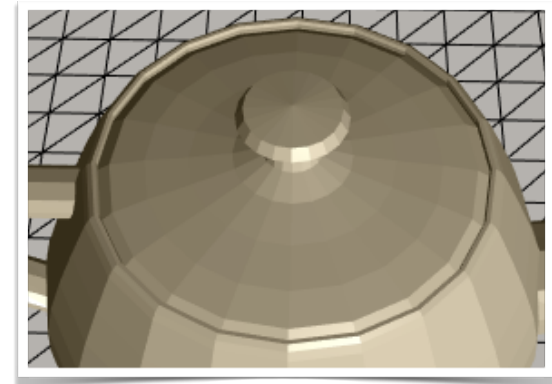
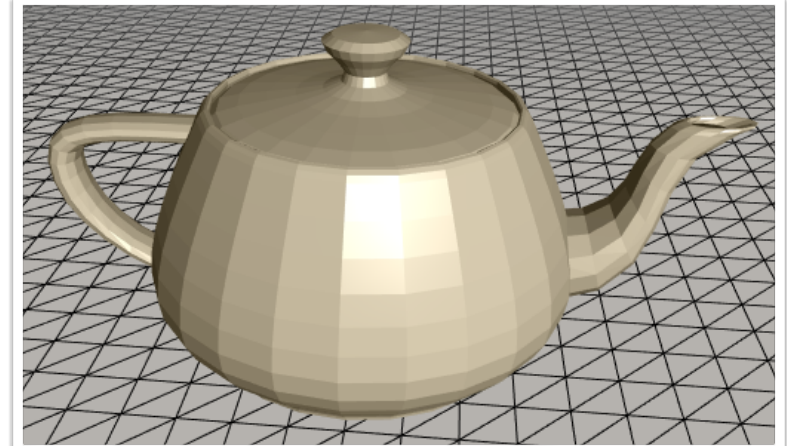


$$\mathbf{I} = \sum_{l=1}^L [\mathbf{I}_{a,l} \mathbf{K}_a + \mathbf{I}_{d,l} \mathbf{K}_d (\mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + \mathbf{I}_{s,l} \mathbf{K}_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n]$$

# Métodos de sombreamento

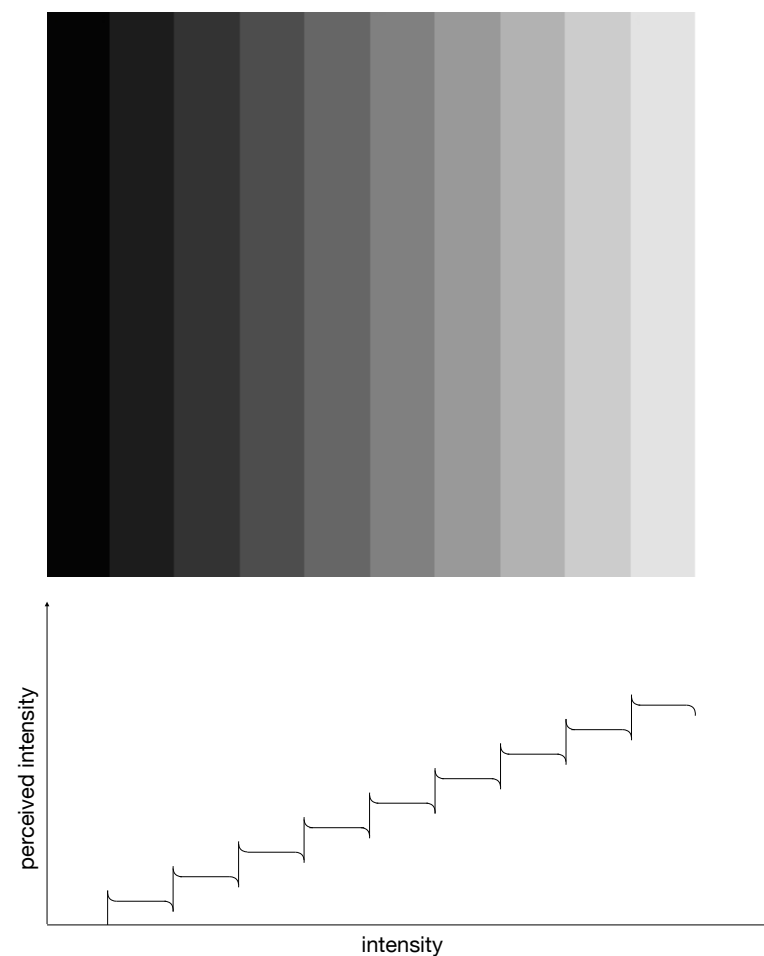
# Sombreamento constante

- Pressupostos:
  - Luzes no infinito (direcionais)  $\Rightarrow \mathbf{L}$  é constante
  - $\mathbf{N}$  é constante ao longo da superfície  $\Rightarrow$  a superfície é plana
  - O observador está no infinito  $\Rightarrow \mathbf{V}$  é constante
- A iluminação é determinada uma única vez por face e a mesma cor é atribuída a todos os píxeis da face.
- Caso algum dos pressupostos não seja válido, a escolha do ponto onde é determinada a iluminação tem influência no resultado
- Bandas de Mach visíveis nas transições entre polígonos



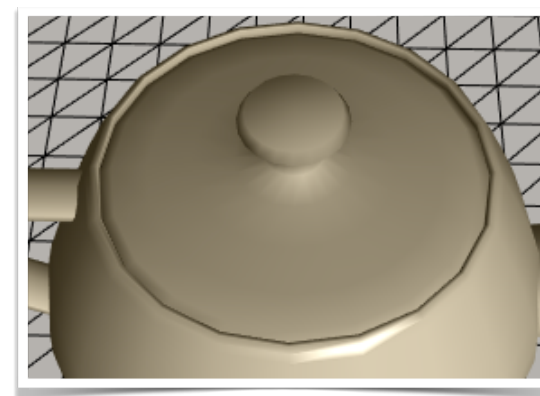
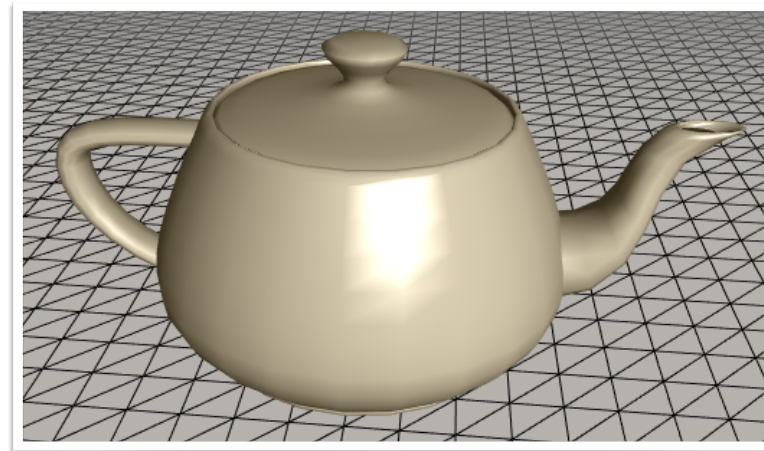
# Bandas de Mach

- O sombreamento constante dá origem às bandas de Mach
- As intensidade perto de cores mais escuras parecem mais claras
- As intensidades perto de cores mais claras parecem mais escuras
- O fenómeno é criado pela inibição lateral dos sensores no olho
- A superfície parece ser formada por fatias curvas



# Sombreamento de Gouraud

- O sombreamento de Gouraud elimina as discontinuidades na cor através da interpolação da cor (ou intensidade) dentro dos polígonos
- As normais nos vértices deverão ser conhecidas ou possíveis de estimar
- O modelo de iluminação é avaliado em cada vértice e a cor resultante interpolada no interior da face
- As bandas de Mach, embora menos notórias, continuam presentes (descontinuidade na taxa de variação da intensidade)

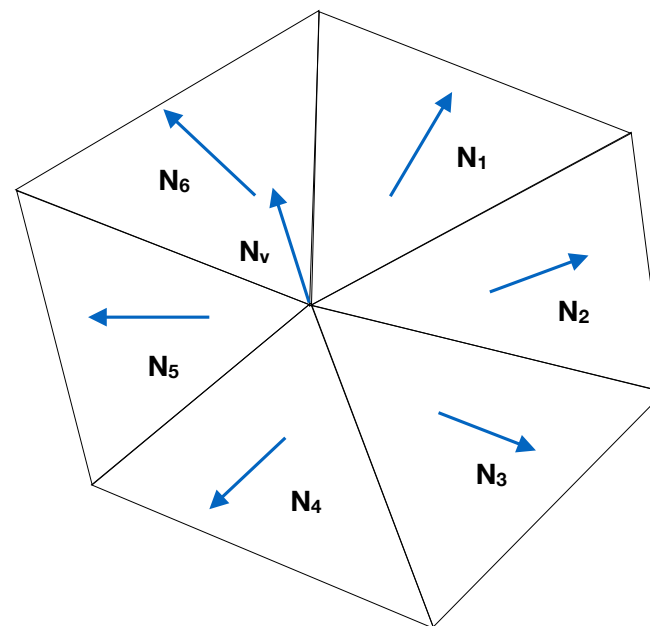


## Cálculo das normais nos vértices

- Se as normais nos vértices não forem dadas com o modelo, podem estimar-se como valores médios
- Somam-se todas as normais (normalizadas previamente) de todos os polígonos em redor do vértice e normaliza-se o resultado

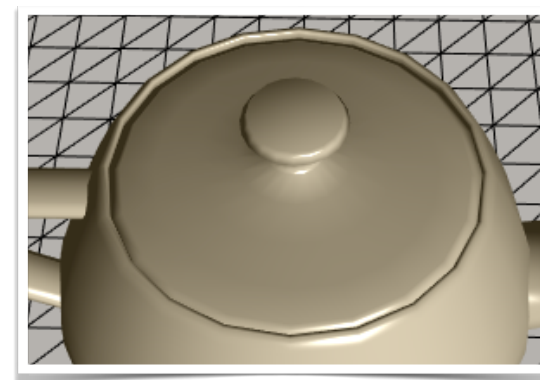
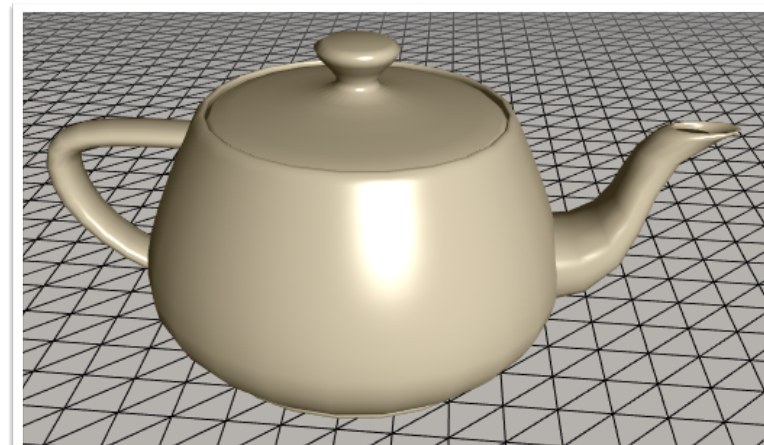
$$\mathbf{N}_v = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{N}_i}{\|\sum_{i=1}^N \mathbf{N}_i\|}$$

- Se uma aresta deve ser visível, então a soma deverá ser efetuada de cada lado da aresta.



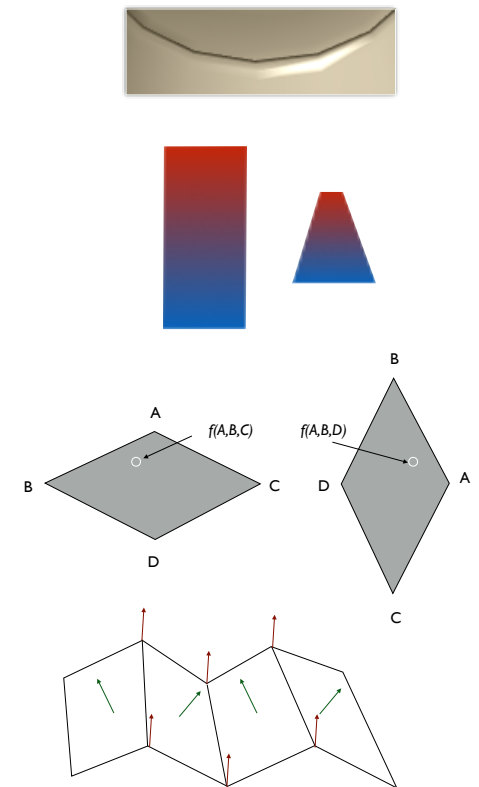
# Sombreamento de Phong

- Pressupostos
  - A malha poligonal é uma aproximação de uma superfície curva
  - As normais nos vértices são fornecidas ou estimadas a partir de normais representativas em torno do vértice
- Interpola-se ao vetor normal dentro de cada face, em vez da cor
- Avalia-se o modelo de iluminação em cada pixel usando a normal obtida por interpolação



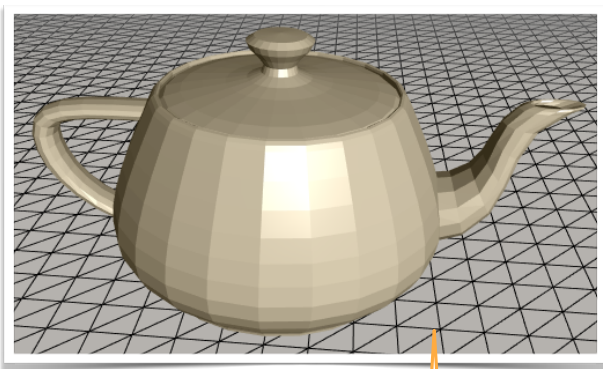
# Limitações

- A silhueta poligonal da malha de polígonos será sempre visível, contrastando com a aparência curva no interior
- A projeção perspectiva introduz uma distorção pelo que a interpolação no espaço do ecrã (entre linhas de varrimento) necessitará de correção
- O resultado depende da orientação da superfície no caso dos polígonos não serem apenas triângulos
- Um possível cálculo das normais nos vértices poderá resultar em normais que não são representativas da geometria da superfície



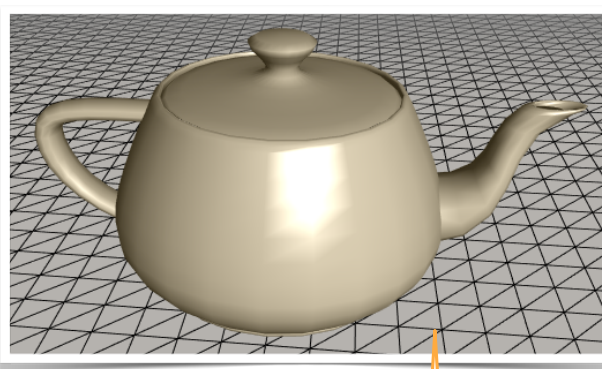


# Métodos de sombreamento



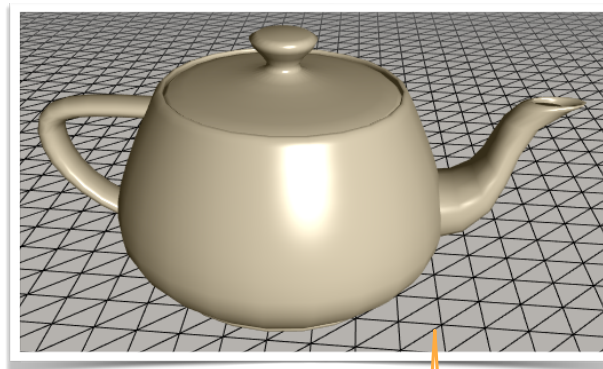
Constante

Os reflexos especulares, se ocorrerem no ponto onde o modelo é avaliado, propagam-se a toda a face.



Gouraud

Os reflexos especulares só serão visíveis se ocorrerem, pelo menos, num vértice



Phong

Os reflexos especulares podem ocorrer no interior dum triângulo