

# Computação Gráfica I

## Professor:

Anselmo Montenegro  
[www.ic.uff.br/~anselmo](http://www.ic.uff.br/~anselmo)

## Conteúdo:

- Iluminação

## Iluminação: introdução

- A visualização realística de cenas requer a projeção perspectiva dos objetos e o tratamento da visibilidade das superfícies.
- Além disso, é fundamental aplicação de *efeitos de luz*.



## Iluminação: introdução

- Tais efeitos incluem reflexões, transparências, texturas e sombras.
- São descritos através de *modelos de iluminação*.

## Iluminação: introdução

- Um *modelo de iluminação* é um modelo utilizado para **calcular a intensidade** de luz observada em um ponto na superfície de um objeto.
- São baseados nas leis físicas que descrevem a intensidade luminosa em superfícies.

## Iluminação: introdução

- Modelos físicos de iluminação levam em conta:
  - tipo do objeto(material).
  - tipo e as condições de iluminação das fontes de luz.
  - posição relativa entre objetos e fontes de luz.
- Os objetos podem ser: *opacos*, *transparentes*, *translúcidos* ou *reflectivos*.
- As fontes de luz variam em *cor*, *forma*, *posição* e *orientação*.

## Iluminação: introdução

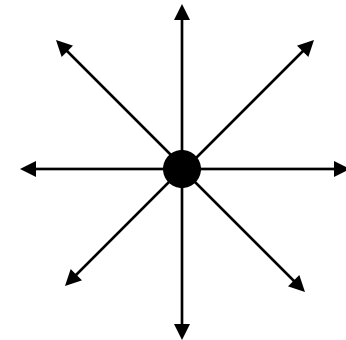
- A maioria dos pacotes gráficos utiliza modelos de iluminação **simplificados**.
- São modelos obtidos **empiricamente**.
- Modelos mais precisos calculam a propagação da energia radiante entre as superfícies e fontes de luz da cena. Exemplo: *Método da Radiosidade*.

## Iluminação: fontes de luz

- Quando observamos um objeto não luminoso, o que vemos é a **luz refletida pela superfície do objeto**.
- O total de luz refletida é dado pela soma das contribuições de todas as fontes de luz e de outras superfícies refletoras na cena.
- Aqui consideraremos como **fontes de luz somente objetos que emitem energia radiante**.

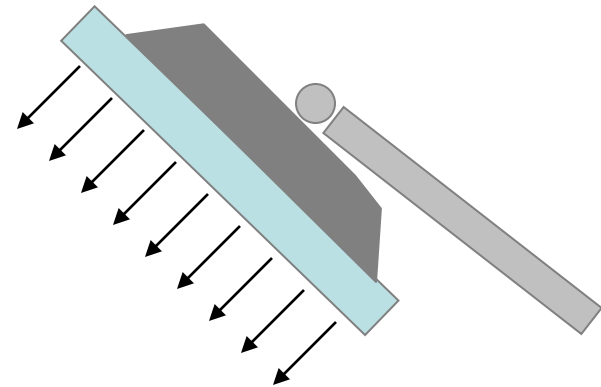
# Iluminação: fontes de luz

- O modelo mais simples de fonte de luz é o de *fonte pontual*.
- Os raios que partem da fonte de luz seguem caminhos **radialmente divergentes**.
- São boas aproximações quando:
  - A fonte está suficientemente **distante da cena**.
  - A fonte tem **dimensões pequenas** comparadas aos demais objetos.



## Iluminação: fontes de luz

- Quando a fonte de luz tem dimensões não desprezíveis e está próxima da cena, não podemos adotar o modelo de fonte pontual.
- Neste caso é preciso adotar o *modelo de fonte de luz distribuída*.
- Este modelo considera a intensidade total como a combinação da intensidade luminosa emitida por todos os pontos na superfície do emissor.



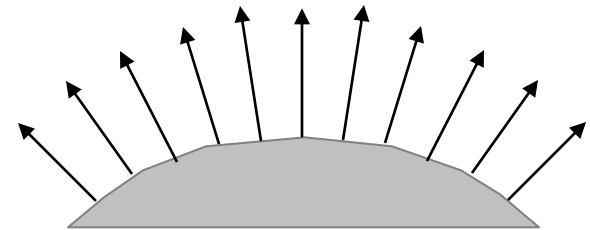
## Iluminação: modelos fundamentais

- A luz que atinge a superfície de um objeto pode ser, em maior ou menor intensidade:
  - absorvida.
  - refletida.
  - transmitida.
- O tipo do comportamento depende da **característica do material**. Estes podem ser agrupados de forma grosseira em: **opacos, transparentes e translúcidos**.



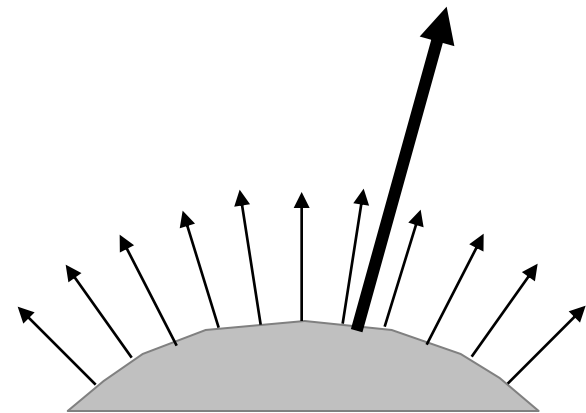
## Iluminação: modelos fundamentais

- Objetos rugosos tendem a refletir a luz em todas as direções. A luz espalhada é denominada *reflexão difusa*.
- Uma superfície fosca e rugosa produz principalmente reflexão difusa e aparenta ter o **mesmo brilho de qualquer ponto de vista**.
- A cor do objeto neste caso é a cor da reflexão difusa da luz incidente.



## Iluminação: modelos fundamentais

- Em alguns materiais, além da reflexão difusa, ocorre *reflexão especular* da luz incidente.
- Nestes casos, a reflexão produz pontos brilhosos (highlights) cujo presença *depende da posição do observador*.
- Estes efeitos são mais pronunciados em superfícies brilhosas como, por exemplo, os metais polidos.



## Iluminação: modelos fundamentais

- Os modelos aqui apresentados são modelos **simples** que permitem um **cálculo eficiente** da intensidade luminosa nos pontos da superfície dos objetos da cena.
- São **modelos empíricos** mas que produzem bons resultados para a maioria das cenas.

## Iluminação: modelos fundamentais

- São baseados nas propriedades dos materiais e nas características das fontes de luz.
- Os materiais são caracterizados por sua **reflectância**, isto é, em como reagem à luz incidente através de reflexão, absorção e transmissão.
- As fontes de luz são consideradas **fontes pontuais** e são caracterizadas por sua **posição e cor**.

## Iluminação: modelos fundamentais

- Uma superfície pode ser visível mesmo que não esteja diretamente iluminada por uma fonte de luz.
- Isto ocorre quando existem objetos iluminados em sua vizinhança.
- Em nosso modelo simplificado, podemos levar isso em conta estabelecendo um **nível de brilho geral para toda a cena**.

## Iluminação: *luz ambiente*

- Este é um modo simples de **combinar a reflexão de luz** das várias superfícies para produzir uma iluminação uniforme.
- Chamamos esta iluminação de *luz ambiente* ou *luz de fundo*.
- A luz ambiente **não tem características espaciais nem direcionais**.

## Iluminação: luz ambiente

- Podemos estabelecer um nível de luz ambiente para cena através de um parâmetro  $I_a$ .
- A luz incidente em cada superfície é constante, mas a luz refletida observável varia de acordo com a reflectância do material da superfície.

## Iluminação: reflexão difusa

- A quantidade de luz incidente que é refletida de forma difusa pode ser estabelecida para cada superfície através de um parâmetro  $K_d$ .
- $K_d$  é denominado coeficiente de reflexão difusa e é um valor constante no intervalo  $[0, 1]$ .



## Iluminação: reflexão difusa

- O parâmetro  $K_d$  é uma função da cor da superfície.
- Por enquanto consideremos ele como uma constante.
- Se uma superfície é exposta somente a luz ambiente, podemos expressar a **intensidade da reflexão difusa** em cada ponto como:

$$I_{ambdiff} = K_d I_a$$

## Iluminação: reflexão difusa

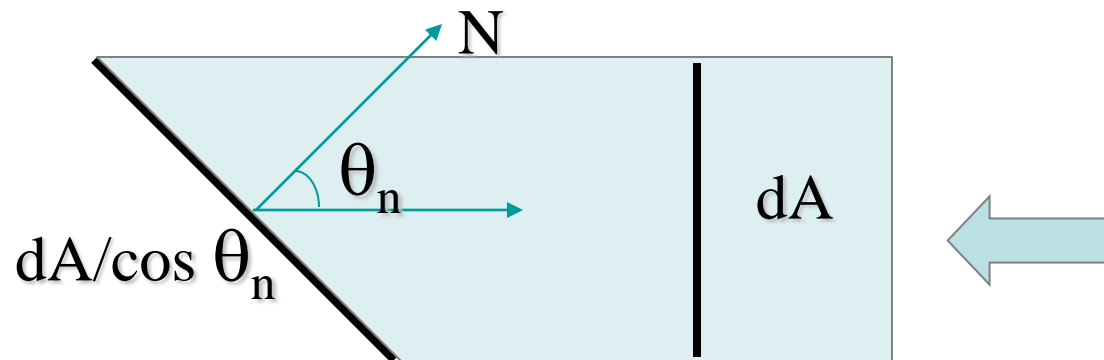
- A iluminação ambiente produz efeitos de tonalização  **muito uniformes**.
- Para termos efeitos mais interessantes é necessário adicionar, pelo menos, uma fonte de luz pontual.

## Iluminação: reflexão difusa

- O modelo de reflexão difusa de uma iluminação por fonte de luz pontual se baseia no seguinte fato:
  - reflexões difusas em uma superfície **são espalhadas de forma idêntica em todas as direções.**
- Superfícies com esta característica são denominadas ***Refletores Difusos Ideais*** ou ***Refletores Lambertianos***.

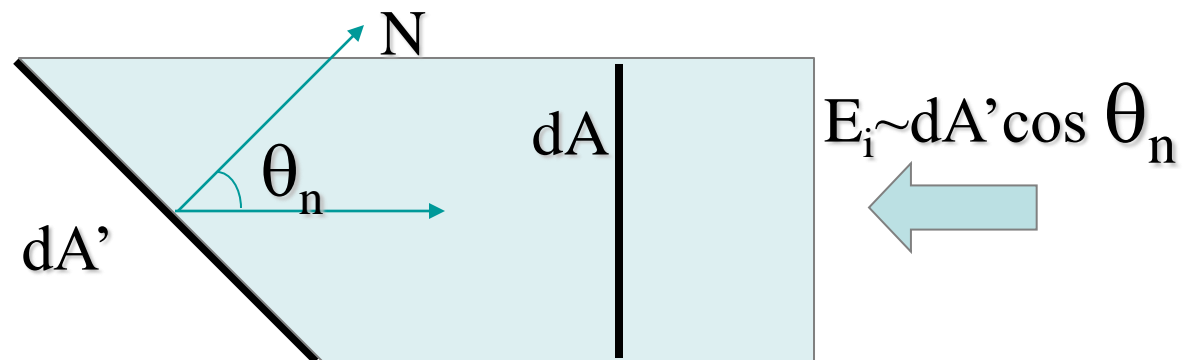
## Iluminação: reflexão difusa

- Por que isso ocorre?
  - Um foco de luz com seção de área  $dA$ , ao interceptar uma superfície, cobre uma área que é inversamente proporcional a cosseno do ângulo que ele faz com a normal  $N$ , isto é,  $dA/\cos \theta_n$ .



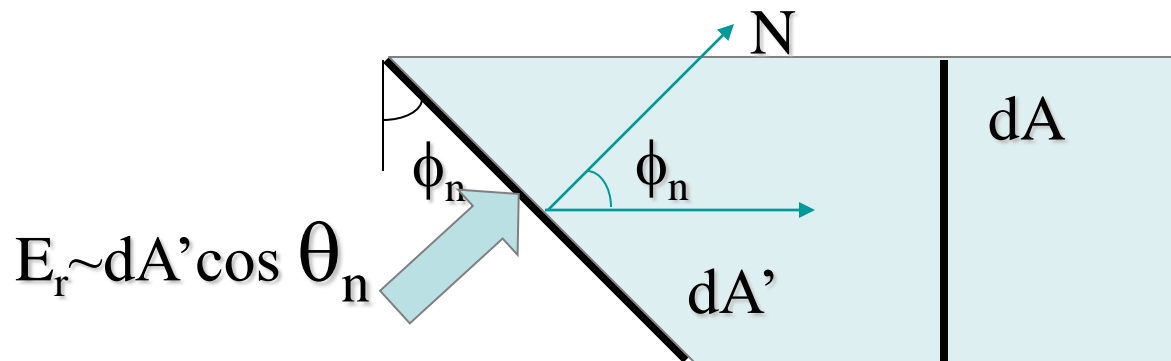
## Iluminação: reflexão difusa

- Logo, a energia luminosa que atinge uma área  $dA'$  em uma superfície, proveniente de um fecho de luz que faz um ângulo  $\theta_n$  com sua normal, é proporcional a  $\cos \theta_n$ .
- Esta lei independe do material da superfície.



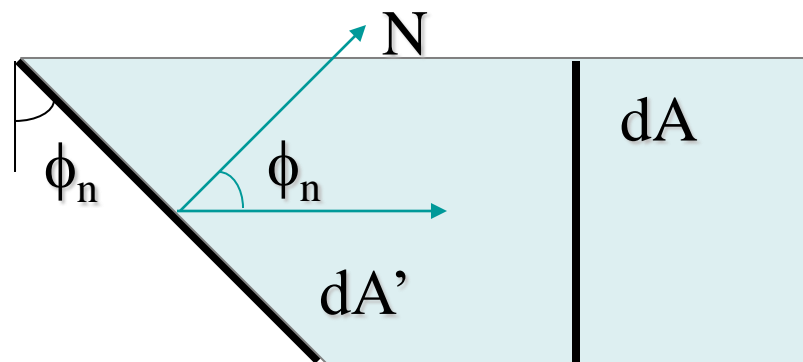
## Iluminação: reflexão difusa

- Por outro lado, a *Lei dos Cossenos de Lambert* para refletores difusos afirma que:
  - A energia radiante refletida por uma superfície com área **aparente** infinitesimal  $dA$ , para um observador em uma direção  $\phi_N$  em relação a norma da superfície, é proporcional ao  $\cos \phi_N$ .



## Iluminação: reflexão difusa

- Como a área aparente, isto é, a área visível é inversamente proporcional ao cosseno do ângulo, então os dois fatores se cancelam.
- Por exemplo, se o ângulo de visão aumenta, a área aparente aumenta, mas a quantidade de luz emitida por cada ponto é menor, porque o ângulo é mais oblíquo.



$$E_p \sim dA' \cos \theta_n \cos \phi_n$$

$$dA' = dA / \cos \phi_n$$



$$E_p \sim dA \cos \theta_n$$

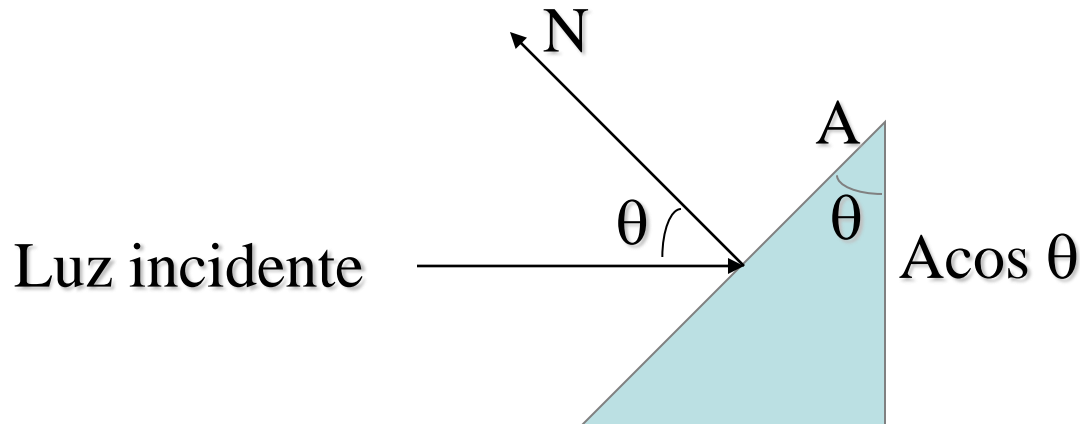
## Iluminação: reflexão difusa

- Apesar da luz ser espalhada de forma idêntica em todas as direções, a **intensidade de luz na superfície depende da sua orientação** em relação a fonte de luz.
- Superfícies perpendiculares em relação a fonte de luz apresentam maior intensidade que superfícies oblíquas.



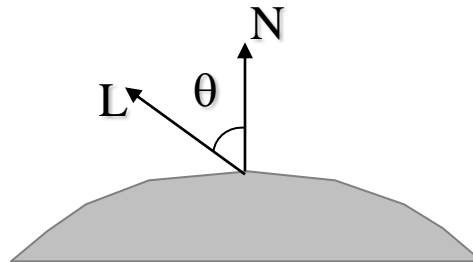
# Reflexão difusa

- De fato, a intensidade de luz refletida depende da área da superfície projetada perpendicularmente à fonte de luz.



## Iluminação: reflexão difusa

- Deste modo, o brilho em um ponto da superfície depende do ângulo entre a direção voltada para a fonte de luz **L** e a normal **N**.



## Iluminação: reflexão difusa

- Seja  $I_l$  a intensidade da fonte de luz pontual e  $K_d$  o coeficiente de reflexão especular da superfície.
- A equação de reflexão difusa para um ponto na superfície é dada por:

$$I_{l,diff} = K_d I_l \cos \theta$$

## Iluminação: reflexão difusa

- O cos é dado pelo produto escalar entre o vetor normal unitário e o vetor da direção de luz unitário. Daí que podemos re-escrever a equação como:

$$I_{l,diff} = K_d I_l \langle N, L \rangle$$

## Iluminação: reflexão difusa

- Podemos combinar as expressões que calculam a intensidade de luz causada pela reflexão difusa da luz ambiente e da luz pontual.
- Obtemos assim uma expressão para *reflexão difusa total*.

## Iluminação: reflexão difusa

- É possível ganhar maior flexibilidade criando-se um coeficiente de reflexão difusa ambiental  $K_a$  distinto do coeficiente  $K_d$ .
- Assim temos a seguinte expressão:

$$I_{diff} = K_a I_a + K_d I_l \langle N, L \rangle$$

## Iluminação: reflexão especular

- Para certos objetos podemos ver pontos brilhantes que se destacam a partir de certos pontos de vista.
- Este é o caso de materiais como certas pedras e metais polidos.



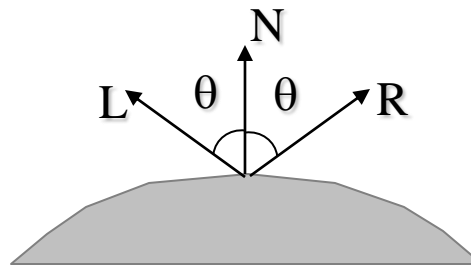
## Iluminação: reflexão especular

- Este fenômeno é denominado *reflexão especular*.
- A reflexão especular é causada pela reflexão total ou quase total da luz incidente em uma região em torno do *ângulo de reflexão especular*.



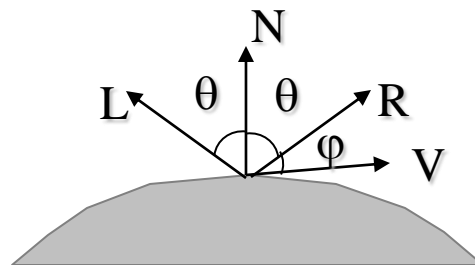
## Iluminação: reflexão especular

- O *ângulo de reflexão especular*  $\theta_r$  é igual ao ângulo que o raio refletido **R** forma com o vetor unitário normal **N**.
- A medida do ângulo de reflexão é igual ao ângulo  $\theta_i$  que o raio **L**, que aponta para a direção da luz, faz com o vetor normal unitário.
- Os raios **R** e **L** são coplanares.



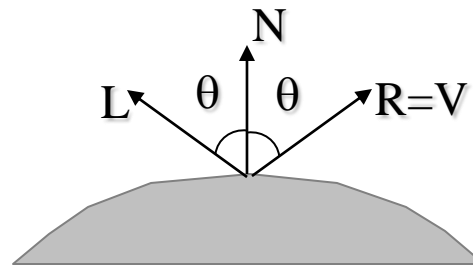
## Iluminação: reflexão especular

- Na *reflexão especular* a região correspondente a reflexão se move sobre a superfície a medida que o observador se desloca.
- Isto ocorre porque a reflexão especular, ao contrário da reflexão difusa, **depende do ponto de vista do observador  $V$** .



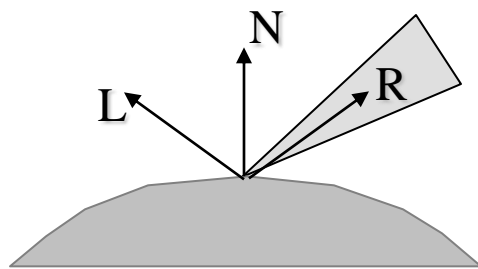
## Iluminação: reflexão especular

- Nos materiais com **reflexão especular perfeita**, como um espelho, vemos apenas luz na direção do raio de reflexão.
- Logo, a luz se torna visível apenas quando a **direção de observação coincide com o vetor de reflexão**.

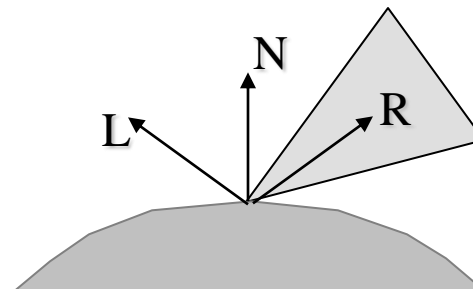


## Iluminação: reflexão especular

- Nos materiais que não são refletoras perfeitos, observamos a **reflexão especular sobre uma região finita** em torno do ângulo de reflexão.
- Quanto maior a especularidade do objeto menor a região de reflexão especular, e vice e versa.



Maior especularidade



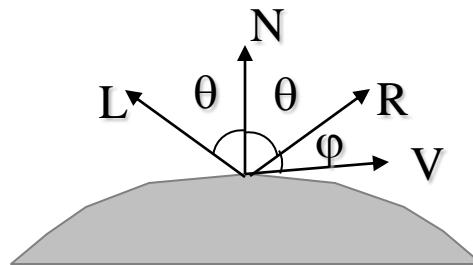
Menor especularidade

## Iluminação: reflexão especular

- Para modelar *refletores especulares não ideais*, Phong propôs um modelo empírico no qual a intensidade da reflexão especular é proporcional à

$$\cos^{ns}\phi,$$

onde  $\phi$  é ângulo entre o raio de reflexão  $R$  e a direção de observação  $V$ .



## Iluminação: reflexão especular

- O parâmetro  $ns$  é o *parâmetro de reflexão especular* e varia de acordo com o tipo de superfície.
- Para superfícies muito reflectivas,  $ns$  tem um valor alto (por exemplo, 100) e para superfícies opacas (foscas),  $ns$  tem um valor baixo (por exemplo, 1).
- Para os refletores ideais,  $ns$  deveria ter valor infinito, o que significa que a intensidade da reflexão só é diferente de zero na direção do vetor de reflexão.

## Iluminação: reflexão especular

- A intensidade da reflexão especular depende de diversos fatores sendo os principais, o **material da superfície** e o **ângulo de incidência da luz**.
- Para a maioria dos materiais opacos, o coeficiente de reflexão especular é constante em relação ao ângulo de incidência.
- Nestes casos, podemos modelá-lo através da constante  $K_s$ .

## Iluminação: reflexão especular

- Sejam  $V$  e  $R$ , respectivamente, os vetores unitários correspondentes a direção de observação e ao raio de reflexão.
- Além disso, sejam  $I_l$ ,  $K_s$ , e  $n_s$ , a intensidade da fonte, de luz, o coef. de especularidade da superfície, e o parâmetro de especularidade.
- A equação que determina a intensidade da reflexão especular é dada abaixo:

$$I_{spec} = K_l I_l \langle V, R \rangle^{n_s}$$



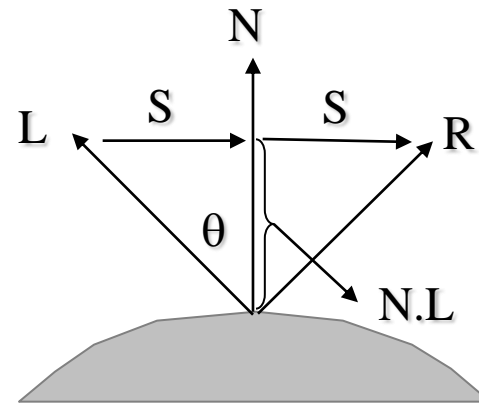
## Iluminação: cálculo do vetor de reflexão

- O vetor **R** é dado pelo espelhamento de **L** em torno da norma **N**.
- Isto é obtido através de um simples cálculo geométrico.

$$R = N\langle N, L \rangle + S,$$

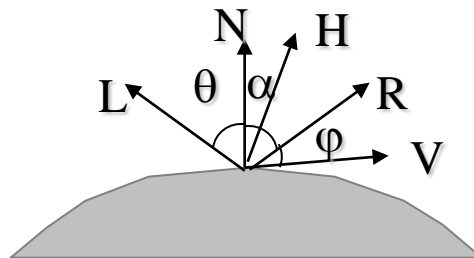
$$R = N\langle N, L \rangle + N\langle N, L \rangle - L$$

$$R = 2N\langle N, L \rangle - L$$



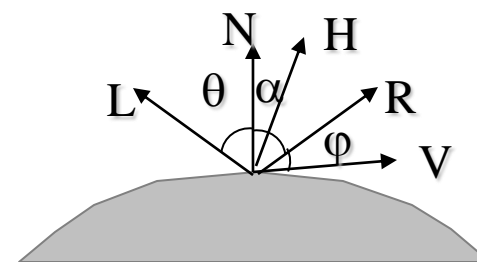
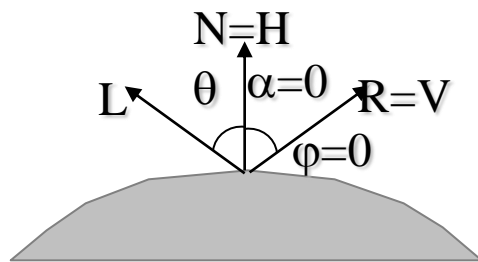
## Iluminação: *halfway vector*

- Uma outra formulação para o modelo de Phong é a que se utiliza do conceito de *halfway vector*.
- O vetor H é o vetor que fica a meio caminho da direção da fonte de luz e o observador.



## Iluminação: *halfway vector*

- Se a superfície tivesse normal na direção de **H**, então a intensidade de especularidade seria máxima pois **V** se alinharia com **R**.



## Iluminação: *halfway vector*

- O novo termo que mede a intensidade da reflexão especular é  $\langle N, H \rangle^{ns}$ , onde  $H = (L+V)/|L+V|$ .
- Temos então a seguinte equação:

$$I_{spec} = K_l I_l \langle N, H \rangle^{n_s}$$

## Iluminação: *halfway vector*

- Vantagem:
  - Na primeira formulação teríamos que calcular  $\langle R, V \rangle = (2N\langle N, L \rangle - L) \cdot V$  para cada ponto da superfície.
  - Na nova formulação, calculamos apenas  $\langle N, H \rangle$  para cada ponto, onde  $H$  é uma simples constante quando o observador e a fonte de luz estão no infinito.

## Iluminação: combinando reflexões difusas e especulares

- Para uma única fonte de luz, podemos **combinar** as reflexões especulares e difusas através da seguinte equação:

$$I = I_{diff} + I_{spec} = K_a I_a + K_d I_l \langle N, L \rangle + K_s I_l \langle N, H \rangle^{n_s}$$

- No caso de mais de uma fonte de luz **somamos as contribuições individuais** de cada uma delas:

$$I = K_a I_a + \sum_{i=1}^n I_{li} \left[ K_d \langle N, L_i \rangle + K_s \langle N, H_i \rangle^{n_s} \right]$$

## Iluminação: atenuação

- No mundo real, a energia luminosa tem sua **amplitude atenuada** a medida que se propaga no espaço.
- É conveniente modelar este fenômeno adicionando, por exemplo, um fator que **atenua a intensidade com o quadrado da distância**.

## Iluminação: atenuação

- Na prática, isto não produz bons resultados pois  $1/d^2$  causa variações muito grandes para  $d$  com valores pequenos, e pouca variação para  $d$  com valores grandes.
- Por este motivo os pacotes gráficos adotam a seguinte função de atenuação:

$$f(d) = \min\left(1, \frac{1}{a_0 + a_1d + a_2d^2}\right)$$

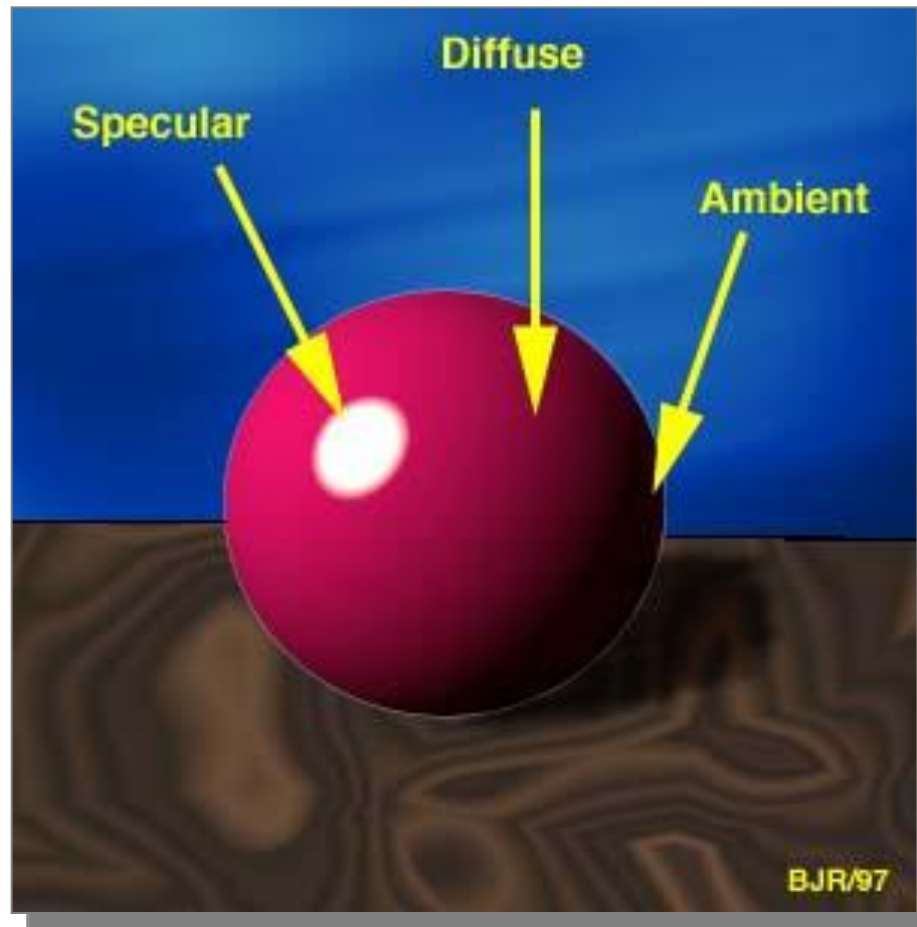


## Iluminação: usando cores

- Podemos definir as equações onde os coeficientes de reflexão difusa e especular são especificados separadamente para cada componente de cor.
- Temos então:

$$I_R = K_{aR}I_{aR} + \sum_{i=1}^n f(d_i)I_{lRi} \left[ K_{dR} \langle N, L_i \rangle + K_{sR} \langle N, H_i \rangle^{n_s} \right]$$
$$I_G = K_{aG}I_{aG} + \sum_{i=1}^n f(d_i)I_{lGi} \left[ K_{dG} \langle N, L_i \rangle + K_{sG} \langle N, H_i \rangle^{n_s} \right]$$
$$I_B = K_{aB}I_{aB} + \sum_{i=1}^n f(d_i)I_{lBi} \left[ K_{dB} \langle N, L_i \rangle + K_{sB} \langle N, H_i \rangle^{n_s} \right]$$

## Iluminação: exemplo



## Iluminação: *transparências*

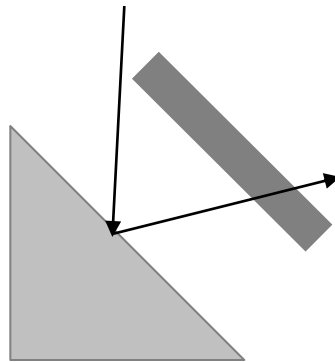
- Assim como existem superfícies que refletem luz de forma difusa ou especular, existem superfícies que **transmitem luz**.
- As transmissões que ocorrem através da superfície podem ser tanto de **natureza difusa quanto especular**.

## Iluminação: *transparências*

- Na *transmissão difusa*, a luz que atravessa a superfície é espalhada gerando um efeito borrado.
- Superfícies com esta característica de transmissão são conhecidas com *translúcidas*.
- As superfícies através das quais podemos ver claramente são denominadas *transparentes*.

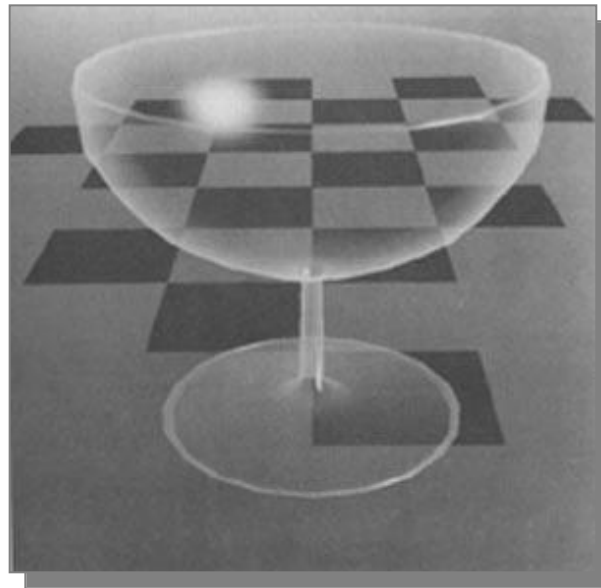
## Iluminação: transparências

- A quantidade de luz transmitida depende do **grau de transparência** da superfície e da existência de fontes ou objetos iluminados atrás da superfície.



## Iluminação: *transparências*

- Na modelagem de superfícies transparentes é necessário **modificar as equações de intensidade** para que levem em conta contribuições de luz que atravessam a superfície.



## Iluminação: *transparências*

- Existem dois modos de modelar efeitos de transparência:
  - Sem refração.
  - Com refração.

## Iluminação: transparências sem refração

- Nos modelos sem refração, os raios de luz **não sofrem desvios** ao atravessar a superfície.
- Apesar de não ser tão realístico, este modelo produz resultados razoáveis quando modelamos **objetos transparentes finos**.



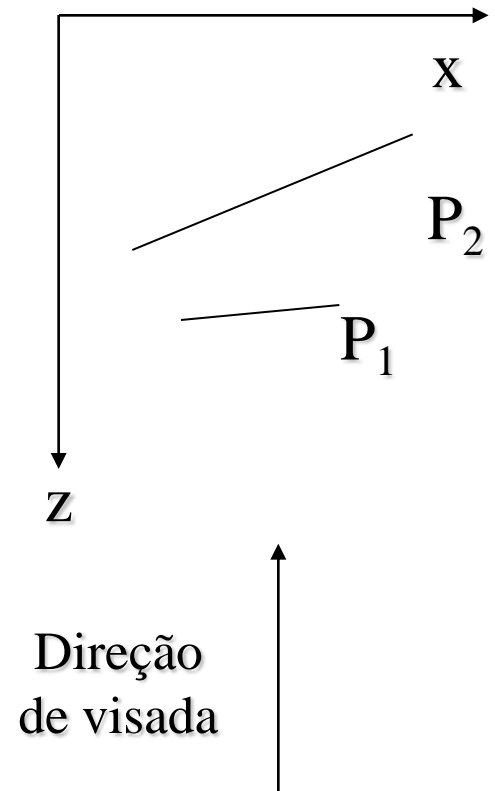
## Iluminação: transparências sem refração

- Existem dois métodos para modelar transparências sem refração:
  - *Transparência interpolada.*
  - *Transparência filtrada.*

## Iluminação: transparência interpolada

- Considere dois polígonos  $P_1$  e  $P_2$ .
- As intensidades das componentes de cor  $I_\lambda$  em um pixel são dadas pela interpolação linear das intensidades individuais  $I_{\lambda 1}$  e  $I_{\lambda 2}$  em  $P_1$  e  $P_2$ .
- A interpolação é feita com base em um coeficiente de transparência  $K_{t1} \in [0, 1]$  do polígono  $P_1$ .

$$I_\lambda = (1 - k_{t1})I_{\lambda 1} + k_{t1}I_{\lambda 2}$$



## Iluminação: transparência filtrada

- Na transparência filtrada, os polígonos são tratados como **filtros transparentes**.
- Eles deixam passar diferentes comprimentos de onda seletivamente.
- Este tipo de transparência é modelado através da seguinte equação:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda 1} + k_t O_{t\lambda} I_{\lambda 2}$$

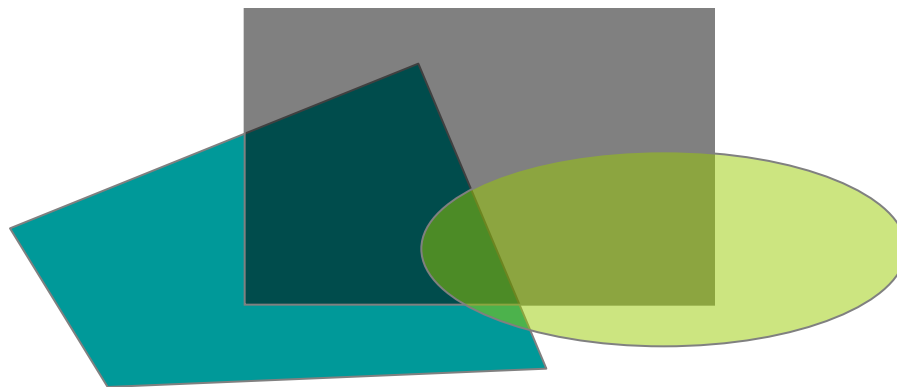
- $O_{t\lambda}$  é a **transparência de cor** do polígono mais próximo da câmera.

## Iluminação: transparências por máscara

- Nesta abordagem os polígonos são vistos como **malhas**.
- Somente alguns dos pixels associados a projeção da primitiva são desenhados.
- O conjunto de pixels de um polígono forma uma **máscara**, no qual alguns deles são visíveis e outros não.

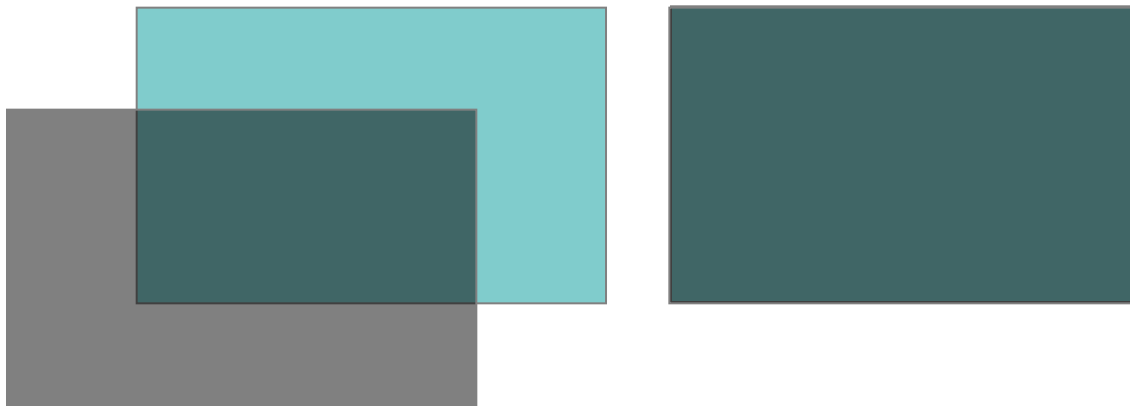
## Iluminação: transparência por máscara

- Os bits de mais baixa ordem no endereço de um pixel são utilizados para determinar a sua transparência (no caso, 0 ou 1).
- Quanto menor for a densidade de pixels visíveis (bit igual a 1 na máscara), maior será a transparência do polígono.



## Iluminação: *transparência por máscara*

- Este método é baseado no processo de **integração espacial** produzido pelo olho humano para gerar **transparência interpolada**.
- Alguns efeitos indesejados podem ocorrer
- Exemplo: um objeto pode ser completamente escondido por um objeto transparente com mesma máscara a sua frente.



## Iluminação: implementação de transparência sem refração

- Vários algoritmos de visualização com tratamento de visibilidade podem ser adaptados para lidar com transparência.
- Em algoritmos de *listas de prioridades* (Z-sort), a cor de um pixel que será coberta por um polígono transparente pode ser recuperada e utilizada nas equações de intensidade.

## Iluminação: implementação de transparência sem refração

- Alguns sistemas que utilizam **Z-buffer** adotam a transparência por máscara.
- Nesta abordagem pode-se combinar objetos opacos com transparentes independentemente da ordem em que são desenhados.



## Iluminação: implementação de transparência sem refração

- Implementar transparência interpolada ou filtrada em sistemas com Z-buffer é mais complicado.
- É necessário **considerar a ordem de desenho dos polígonos transparentes e opacos**, o que não é possível de se determinar através do simples mapa de profundidades.

## Iluminação: implementação de transparência sem refração

- Uma abordagem simples, no entanto incorreta, consiste em:
  - desenhar os polígonos opacos primeiramente
  - desligar o mapa de profundidades
  - desenhar os polígonos transparentes.
- Isso pode ser feito em OpenGL usando *canal alfa*.

# Iluminação: *transparências geradas em OpenGL*



Opacidade 20%



Opacidade 40%

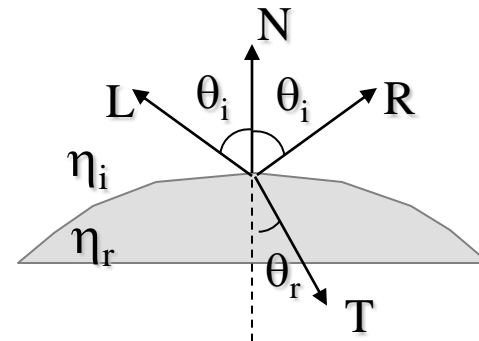
## Iluminação: transparências com refração

- Os efeitos de *transparência com refração* são baseados nas leis físicas que regem os processos de *refração de luz*.
- Neste fenômeno, o caminho que a luz refratada segue é distinto do caminho seguido pela luz incidente, devido às diferenças na velocidade da luz em cada um dos meios.

## Iluminação: transparências com refração

- Segundo a *Lei de Snell*, o *ângulo de refração da luz*  $\theta_r$  é função do ângulo de incidência da luz  $\theta_i$  e dos índices de refração  $\eta_i$  e  $\eta_r$  de cada um dos materiais.
- O índice de refração de um material é dado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no material.

$$\sin \theta_r = \frac{\eta_i}{\eta_r} \sin \theta_i$$



## Iluminação: transparências com refração

- O índice de refração de um material é de fato uma função do comprimento de onda da luz incidente.
- Logo, componentes de cor distintas de um raio de luz são refratadas com ângulos diferentes.
- Nas aplicações utiliza-se um índice de refração médio para os materiais que compõem a cena.

| Material | $\eta$ |
|----------|--------|
| ar       | 1.0    |
| vidro    | 1.5    |
| água     | 1.3    |

# Iluminação: cálculo do raio refratado

$$T = \sin \theta_t M - \cos \theta_t N$$

$$T = \frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} (N \cos \theta_i - L) - \cos \theta_t N$$

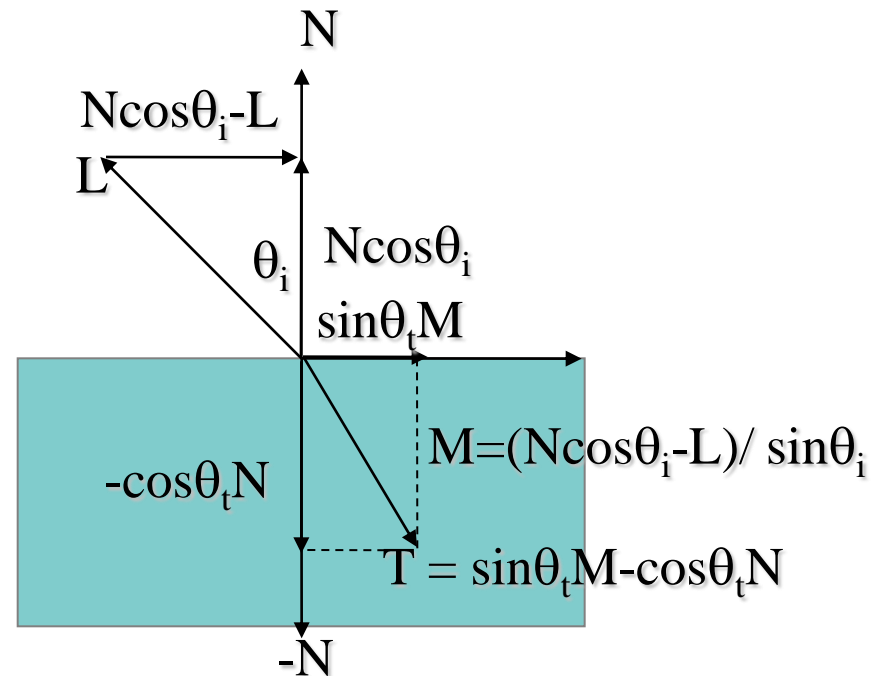
$$\eta_{r\lambda} = \eta_{i\lambda} / \eta_{t\lambda} = \sin \theta_t / \sin \theta_i$$

$$T = \eta_{r\lambda} (\cos \theta_i - \cos \theta_t) N - \eta_{r\lambda} L$$

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_t} = \sqrt{1 - \eta_{r\lambda}^2 \sin^2 \theta_i} =$$

$$\sqrt{1 - \eta_{r\lambda}^2 (1 - \langle N, L \rangle)^2}$$

$$T = \left( \eta_{r\lambda} \langle N, L \rangle - \sqrt{1 - \eta_{r\lambda}^2 (1 - \langle N, L \rangle)^2} \right) N - \eta_{r\lambda} L$$



## Iluminação: cálculo do raio refratado

- O raio refratado **T** pode ser utilizado para determinar sua **interseção com superfícies atrás da superfície transparente**.
- Podemos então adicionar a contribuição de intensidade de luz proveniente de tais superfícies.
- Isto faz mais sentido em algoritmos de **Traçado de raios** que veremos mais a frente.



## Iluminação: cálculo da intensidade total

- A intensidade total observada em um ponto de uma superfície transparente é dada pela combinação da *intensidade transmitida*  $I_{trans}$  com a intensidade refletida  $I_{refl}$ , através de um *coeficiente de transparência*  $K_t$  que assume valores em  $[0,1]$ .

$$I = (1 - k_t) I_{refl} + k_t I_{trans}$$

## Iluminação: modelos para renderização de polígonos

- Consideremos agora o usos dos modelos de iluminação na **renderização de superfícies poliedrais**.
- Os algoritmos de rastreamento aplicam os modelos de iluminação segundo dois esquemas:
  - Polígonos são desenhados com uma **única intensidade**.
  - A intensidade é determinada em cada ponto através de um **esquema de interpolação**.

## Iluminação: tonalização constante

- Método simples e rápido para desenhar objetos poligonais.
- Também é conhecido como *flat-shading*.
- Uma única intensidade é calculada para cada polígono.

## Iluminação: modelos para renderização de polígonos

- Pode ser utilizada adequadamente quando:
  - O objeto é realmente uma *superfície poliédrica* e não a aproximação de uma superfície curva.
  - As fontes de luz estão muito longe de modo que  $\langle N, L \rangle$  seja praticamente constante na face do polígono.
  - O observador está muito distante de modo que  $\langle V, R \rangle$  seja praticamente constante na face do polígono.

## Iluminação: Tonalização de Gouraud

- Cada polígono é desenhado segundo o seguinte esquema:
  - Determina-se a **normal média unitária em cada vértice**, tomando-se a média das normais dos polígonos adjacentes.

$$N_V = \frac{\sum_{k=1}^n N_k}{\left| \sum_{k=1}^n N_k \right|}$$

- Aplica-se o modelo de iluminação para **calcular a intensidade nos vértices**.
- **Interpola-se linearmente as intensidades dos vértices** sobre a superfície do polígono.

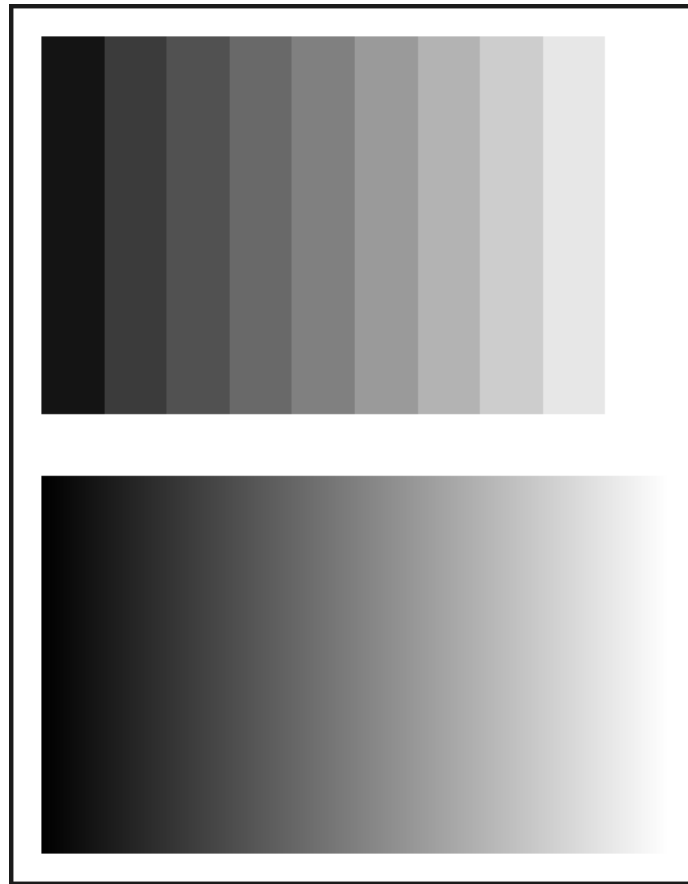
## Iluminação: Tonalização de Gouraud

- O esquema de *Gouraud* remove as descontinuidades de intensidade que surgem no uso da tonalização constante.
- Entretanto, highlights podem ser distorcidos e podem ser criados artefatos chamados *Bandas de Mach*.

## Iluminação: *Bandas de Mach*

- As **Bandas de Mach** correspondem a um exagero da percepção de descontinuidade de intensidade entre faces adjacentes.
- Elas são produzidas por causa do mecanismo de *inibição lateral* do sistema visual humano.
- Um receptor recebendo muita luz inibe a recepção de receptores adjacentes em um proporção inversa às suas distâncias.

## Iluminação: *Bandas de Mach*





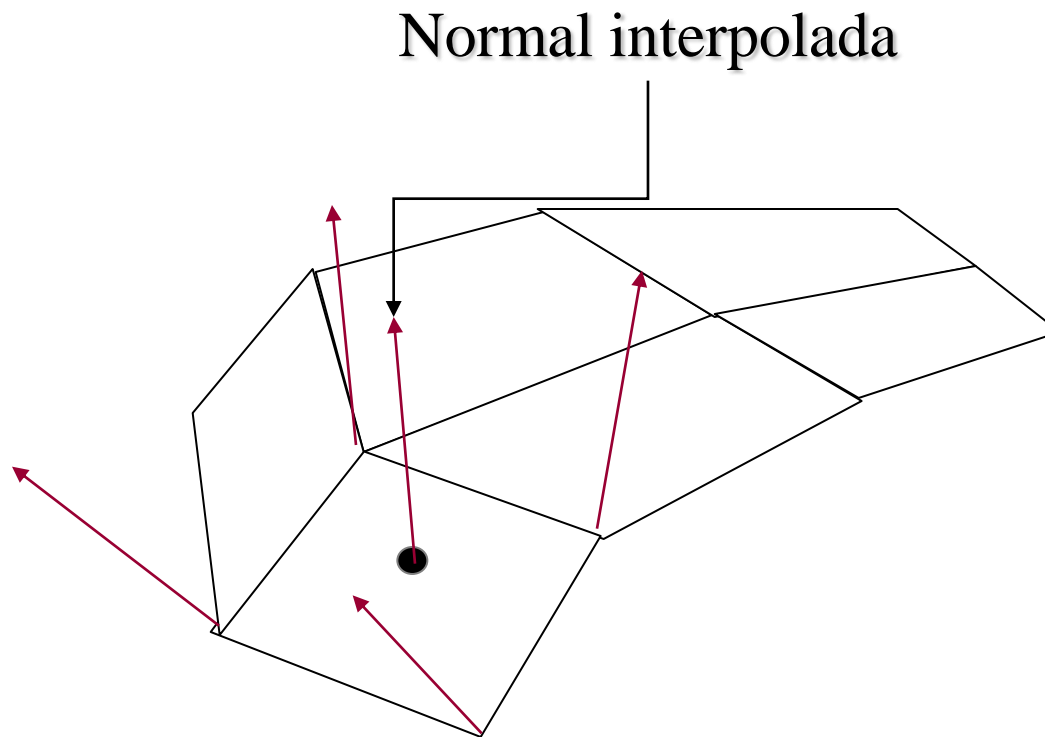
## Iluminação: Tonalização de Phong

- É um método mais preciso, que se baseia na **interpolação dos vetores normais** definidos nos vértices dos polígonos.
- É também conhecido como *Normal-vector Interpolation Shading*.
- Foi proposto por Phong Bui Tuong.
- Produz *highlights* realísticos e diminui o efeito da Banda de Mach.

## Iluminação: Tonalização de Phong

- Cada polígono é desenhado segundo o seguinte esquema:
  - Determina-se a normal média unitária em cada vértice, tomando-se a média das normais dos polígonos adjacentes.
  - **Interpola-se linearmente as normais** sobre a superfície do polígono.
  - Aplica-se o modelo de iluminação para calcular a intensidade nos vértices.

# Iluminação: Tonalização de Phong

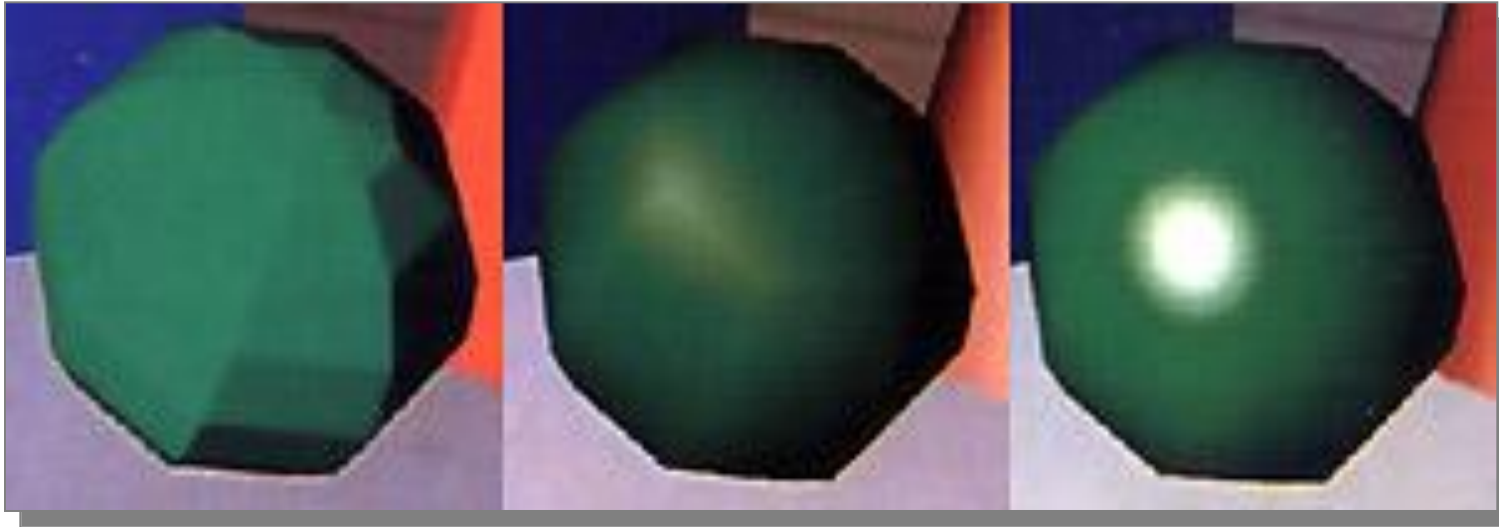


# Iluminação: comparações

Flat

Gouraud

Phong



## Iluminação: Traçado de raios

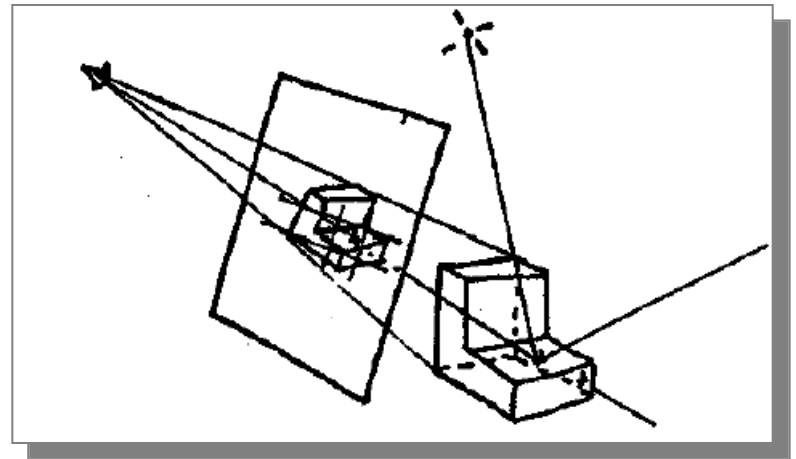
- É uma técnica poderosa para visualização que permite a **geração de efeitos de reflexão e transmissão globais**.
- Tipicamente implementado em Software.
- Combina um **modelo de iluminação com determinação de visibilidade**.

## Iluminação: Traçado de raios

- Simula efeitos de iluminação global tais como
  - Sombras.
  - Reflexão especular e refração recursivas.
  - Acompanha vários caminhos da luz.
- Desvantagens
  - Lento.
  - Não simula reflexão difusa recursiva.

## Iluminação: Traçado de raios

- Raios são lançados passando pelo olho e por cada pixel da imagem
  - Teste de interseção entre cada objeto da cena e raio
  - Pixel é pintado com cor do objeto mais próximo.
  - Sombras são calculadas lançando raios desde o ponto do objeto até a fonte de luz



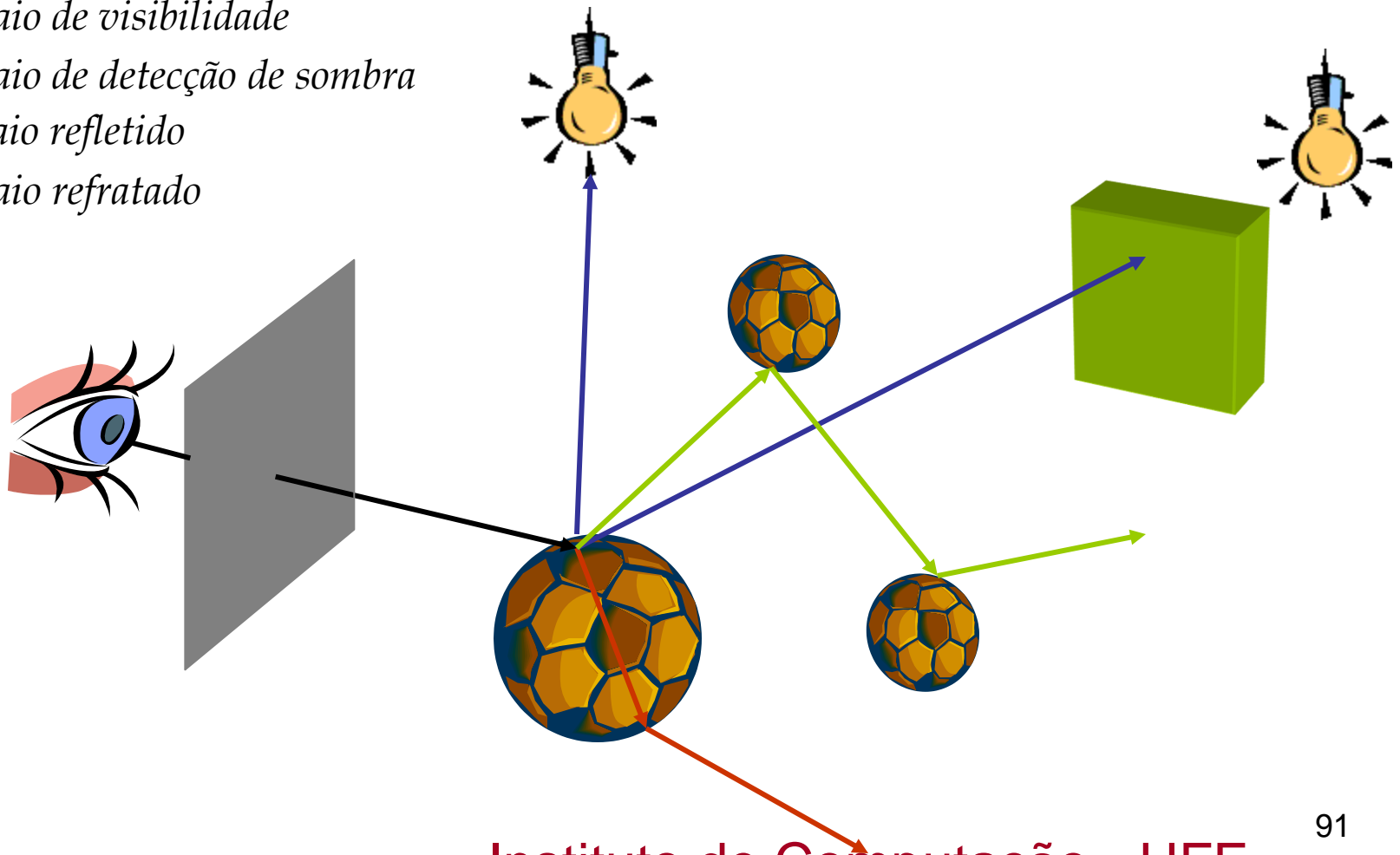
## Iluminação: Traçado de raios recursivo

- Ao interceptar a primeira superfície visível, o raio continua seu trajeto através de reflexões e refrações em um **processo recursivo**.
- Na volta, as contribuições de intensidade em cada interseção são calculadas e combinadas de modo a produzir a intensidade final nas componentes de cor do pixel.



# Iluminação: Traçado de raios recursivo

- Raio de visibilidade
- Raio de detecção de sombra
- Raio refletido
- Raio refratado



# Iluminação: Algoritmo

- Para cada pixel da imagem
  - Calcular raio que passa pelo pixel e pelo olho.
  - Determinar para o objeto atingido pelo raio:
    - Ponto de interseção
    - Normal
    - Propriedades de material
    - Propriedades de textura
  - Computar contribuição da iluminação ambiente.
  - Para cada fonte de luz, determinar visibilidade (raios de detecção de sombra)
    - Se fonte visível, somar contribuição reflexão difusa
  - Se limite de recursão não foi atingido
    - Somar contribuição reflexão especular acompanhando raio refletido
    - Somar contribuição de transmissão acompanhando raio refratado