

Universidade Estadual de Maringá

Departamento de Informática

Computação Gráfica

CG-10-ILUMINAÇÃO e SOMBREAMENTO

NOTAS DE AULA

Prof. Dr. Dante Alves Medeiros Filho

2017

1. Iluminação e Sombreamento

A computação gráfica permite a geração de imagens muito próximas à realidade objetiva. O sistema visual humano percebe o mundo de forma tridimensional e colorido. Podemos com a computação gráfica gerar imagens fotorealísticas de objetos e cenas tridimensionais. Para isto é preciso modelar, ou seja, exprimir a realidade por meio da representação dos fenômenos físicos envolvidos na percepção visual humana. Este processo é conhecido na computação gráfica, como síntese de imagens. Neste caminho, vale destacar que enxergamos as coisas porque elas emitem ou refletem luz e que nossa visão também depende das características e propriedades das superfícies dos objetos que por ela são iluminados. Assim, neste complexo processo, estão envolvidas as propriedades das fontes emissoras de luz e dos objetos que as refletem. A tradução precisa da realidade para um terminal de vídeo de computador é de difícil equacionamento, fato que leva a utilização de modelos aproximados ou empíricos. Na computação gráfica, com o auxílio da óptica, que estuda fenômenos relacionados com a luz, temos alguns modelos empíricos que se tornaram clássicos pelos seus resultados.

1.1 Modelos de Iluminação e Sombreamento

Os modelos de iluminação e sombreamento são iniciativas de retratar a realidade por meio da definição de procedimentos técnicos e pela adoção de variáveis representativas dos fenômenos físicos estudados. Os modelos de iluminação ou modelos de reflexão correspondem às técnicas utilizadas para calcular a intensidade de cor de um determinado ponto a ser exibido em um dispositivo gráfico. Nestes cálculos são utilizados:

- características dos objetos gráficos
 - propriedades físicas;
 - cor;
 - posição;
 - forma.
- características das fontes de luz;
 - cor;
 - posição;

- forma.
- dados do observador
 - posição.

Com estas informações é possível computar os valores que representam a cor de um determinado ponto em uma dada superfície. Já os modelos de sombreamento, também conhecidos como modelos de tonalização ou shading, consistem em determinar como os modelos de iluminação são aplicados. Os modelos de iluminação podem ser locais ou globais. Os modelos de sombreamento podem ser diretos ou interpolados.

Os modelos de iluminação local são utilizados para determinar a intensidade de energia luminosa em um determinado ponto/pixel da superfície dos objetos levando em consideração apenas a contribuição de uma fonte de luz. Os modelos globais são mais sofisticados, podem levar em consideração cálculos de sombras, reflexões e a interação de diversas fontes de luz, bem como a possível iluminação causada pela reflexão da energia luminosa provida de outros objetos integrantes de uma cena. Portanto, são modelos mais completos e complexos.

1.2 Fundamentos Teóricos

Os modelos de iluminação e sombreamento baseiam em conceitos provindos da óptica. A óptica pode ser dividida em óptica geométrica (luz é considerada como partícula) e óptica física (natureza ondulatória da luz). Óptica geométrica é a parte da física que estuda a luz e os fenômenos luminosos. A óptica física estuda a natureza física da luz e fenômenos como interferência, polarização, difração, dispersão entre outras.

A óptica geométrica estuda os fenômenos luminosos com base em leis experimentais, ou seja, empíricas, considera a teoria corpuscular da luz. Desta forma, seus fenômenos, são explicados sem que haja necessidade de se conhecer profundamente a natureza física da luz. Possui este nome porque usa como ferramenta principal de estudo a geometria. Assim, para descrever o percurso da luz, podemos utilizar, teoricamente, retas que representam a direção e sentido de sua propagação. Estas retas são conhecidas como raios de luz. Da óptica geométrica temos três princípios:

- propagação retilínea da luz: em meios homogêneos e transparentes, a luz se propaga em linha reta;
- Independência dos raios luminosos: quando dois ou mais feixes de luz se cruzam, um não altera a propagação do outro;
- reversibilidade dos raios luminosos: a trajetória seguida pela luz independe do seu sentido de propagação.

Com o auxílio dos princípios da óptica geométrica podemos esboçar uma interpretação geométrica de como interagimos com a luz. Vimos ainda a pouco que as coisas podem ser vistas porque elas emitem luz ou porque refletem a luz. Precisamos representar esta situação de alguma maneira. Para tal, vamos considerar três agentes principais do processo de visão humana, (figura 1):

- Fontes de luz;
- Objetos físicos;
- Observador.

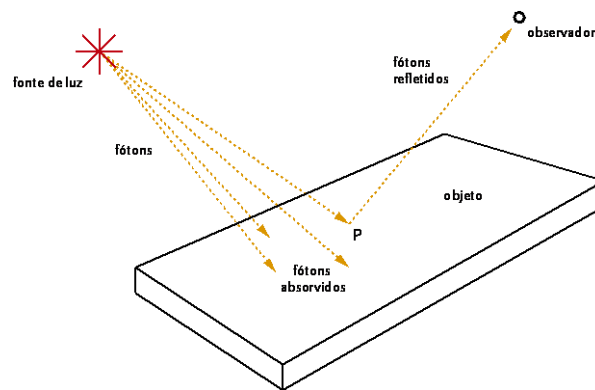


Figura 1: agentes da percepção visual humana

As fontes de luz emitem energia luminosa que incide sobre os objetos físicos que por sua vez possuem propriedades que podem absorvê-la, transmiti-la ou refleti-la. A reflexão e transmissão é que torna os objetos visíveis. É possível que a energia luminosa seja totalmente absorvida, não havendo reflexão. A quantidade de energia absorvida, refletida, ou transmitida depende do comprimento de onda da luz.

Na interação com a luz a cor dos objetos depende de quais comprimentos de onda são absorvidos e de quais são refletidos. Nossos olhos enxergam a energia refletida. As características da luz refletida de uma determinada superfície dependem de fatores ligados à fonte de luz e do objeto, sendo eles:

- composição da luz;
- direção da luz;

- geometria da fonte de luz
- orientação da superfície do objeto e
- propriedades da superfície do objeto.

No observador temos a sensibilização de células especializadas que produzem a percepção da cor. Das fontes luminosas temos a composição, direção e geometria. Das superfícies dos objetos temos a orientação e propriedades.

A interação da luz (energia luminosa) com os objetos pode ser expressa por raios de luz chegando ao objeto (raios incidentes) e outros emanados do objeto resultado da reflexão (raios refletidos). Desta interpretação temos os seguintes fenômenos ópticos:

reflexão difusa ideal: os raios refletidos possuem a mesma intensidade independente do ponto de vista, (figura 2).

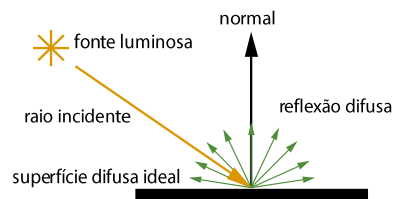


Figura 2: reflexão difusa ideal

reflexão especular ideal: o ângulo entre o raio incidente e a normal ao plano de reflexão é igual ao ângulo produzido entre a normal e o raio refletido, (figura 3).

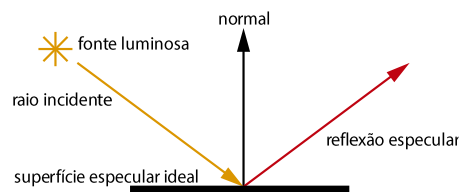


Figura 3: reflexão especular ideal

refração: ao incidir sobre uma superfície refratora o raio incidente é desviado devido a diferença de propriedade entre os meios de propagação, (figura 4).

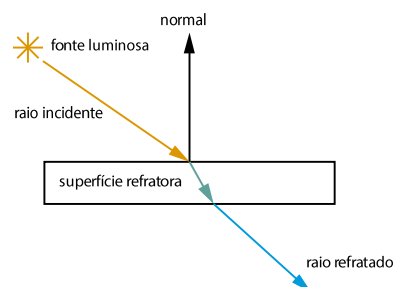


Figura 4: refração da energia luminosa

absorção da luz: a superfície absorve totalmente os raios incidentes. Não temos raios refratados nem refletidos (figura 5).

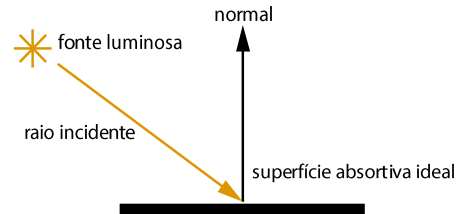


Figura 5: absorção total da energia luminosa

Reunindo todos os tipos de interação da luz interpretados até o momento com um objeto que possui propriedades de reflexão, refração e absorção de energia luminosa, temos que a intensidade emanada da fonte de luz (I) é igual à soma das intensidades refletidas difusa (I_d) e especularmente (I_e) com a absorvida (I_{abs}) e refratada (I_{ref}), figura 6.

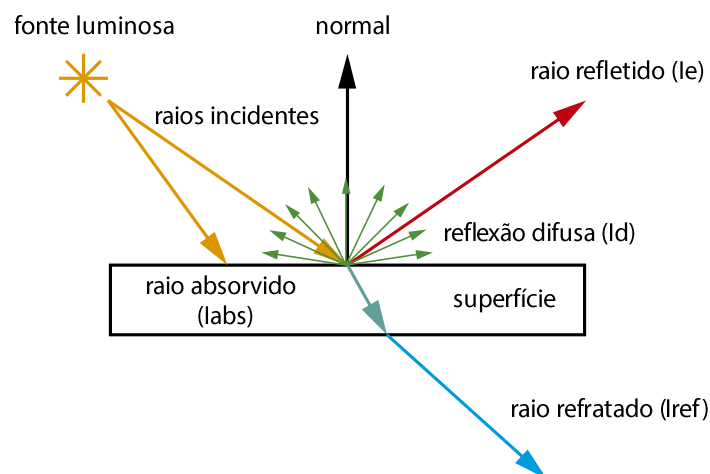


Figura 6: reflexão, refração e absorção da energia luminosa

Algebricamente:

$$I = I_d + I_e + I_{abs} + I_{ref}$$

Temos dois tipos de reflexão, a **difusa** e a **especular**. Ambas, são resultados de propriedades físicas da superfície do objeto. Quanto mais polida e lisa a superfície do objeto temos um índice de reflexão maior. A **reflexão difusa** ocorre pela rugosidade da superfície e a **especular** pela sua polidez.

A reflexão da luz em superfícies lisas pode ser descrita pelas chamadas **leis da reflexão**. Vamos ilustrar estas leis com auxílio da figura 7. Nela temos uma superfície que recebe um raio de luz (**raio incidente**) no ponto **P**. O **raio incidente** é refletido pela superfície sendo chamado de **raio refletido**. O **raio refletido** tem o mesmo comportamento do **raio incidente**.

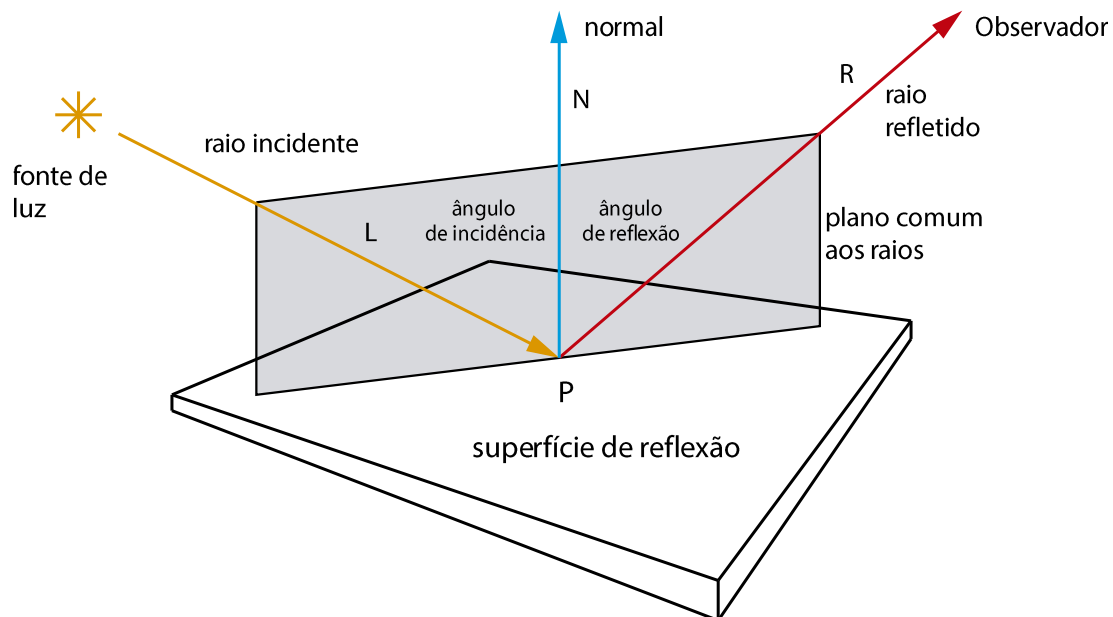


Figura 7: leis da reflexão

Se tomarmos uma semireta perpendicular à superfície no ponto de incidência **P**, notaremos que o ângulo formado por ela com o **raio de incidência** é igual ao ângulo formado por esta semireta com o **raio refletido**. Esta semireta é denominada **normal**. Os ângulos são denominados de **ângulos de incidência** θ_i e **ângulo de reflexão** θ_r . Do exposto, temos as seguintes **leis da reflexão** para superfícies perfeitamente lisas e polidas:

- o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência: $\theta_i = \theta_r$;
- o **raio incidente**, o **raio refletido** e a **normal** no ponto de incidência estão todos contidos em um mesmo plano.

Na vida real é difícil encontrar uma superfície perfeitamente lisa e polida. Em geral, os objetos que interagimos em nossa vida cotidiana possuem em sua superfície certa rugosidade. Esta característica ou propriedade de algumas superfícies influenciam a reflexão dos raios de luz.

Utilizando as leis da reflexão temos nas superfícies rugosas reflexão desuniforme, conforme a figura 8. Denominamos este tipo de reflexão de **reflexão difusa**.

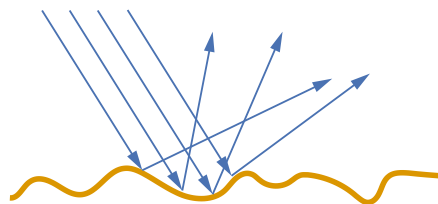


Figura 8: reflexão difusa em superfícies rugosas

A energia luminosa refletida na **reflexão difusa** obedece à **lei de Lambert**. A superfície que proporciona uma reflexão difusa ideal é chamada de **superfície Lambertiana**.

A **lei de Lambert** diz que a **intensidade luminosa refletida em uma superfície difusa ideal é proporcional ao cosseno do ângulo formado entre a direção da luz incidente e a normal a superfície**. Em uma **superfície ideal** ou lambertiana os raios difusos são refletidos uniformemente. O que indica perfeita regularidade da rugosidade da superfície, o que na prática não ocorre. Uma superfície lambertiana possui a mesma **radiância** quando vista de qualquer ângulo. Assim, a intensidade de luz refletida depende da orientação da superfície em relação à fonte de luz, mas independe da direção de visualização do observado (figura 9).

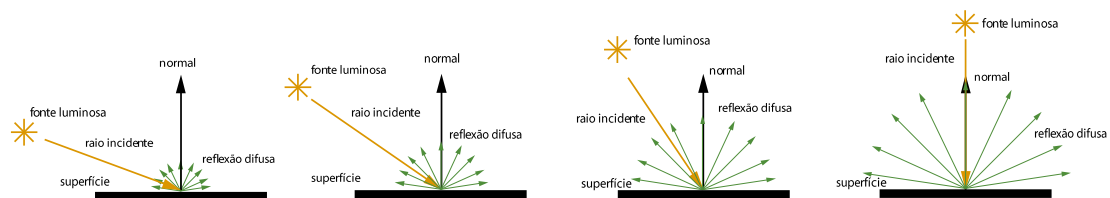


Figura 9: influência do ângulo θ entre raio incidente e normal sobre a reflexão difusa

$$I_{difusa} = I_{incidente} \cdot \cos(\theta)$$

Note que conforme o raio luminoso se aproxima da normal o ângulo θ diminui o que aumenta o valor do cosseno deste ângulo. Assim, quanto mais próximo da normal maior a reflexão difusa. A luz difusamente refletida espalha-se por todas as direções. Isto ocorre muito em nosso cotidiano, pois, como já mencionado, é difícil encontrarmos superfícies perfeitamente lisas. Graças à luz e a reflexão difusa é que enxergamos as coisas. Assim, neste tipo de reflexão, não é importante a posição do observador.

Superfícies lisas e polidas funcionam como espelhos. A figura 10 ilustra a situação de uma superfície perfeitamente lisa e polida quando submetidas a raios de luz. O ângulo entre a normal e os raios incidentes é igual ao ângulo formado pela normal e os raios refletidos.

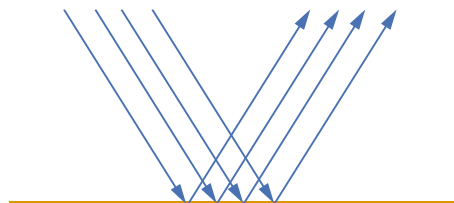


Figura 10: reflexão especular perfeita

Outra característica importante a ser considerada é a de que a **energia luminosa** decresce com o quadrado da distância entre o ponto iluminado e a fonte de iluminação, figura 11. Isto ocorre devido a influência da atmosfera, ou seja, de características do meio em que o raio de luz percorre. Este fenômeno é chamado de atenuação atmosférica.

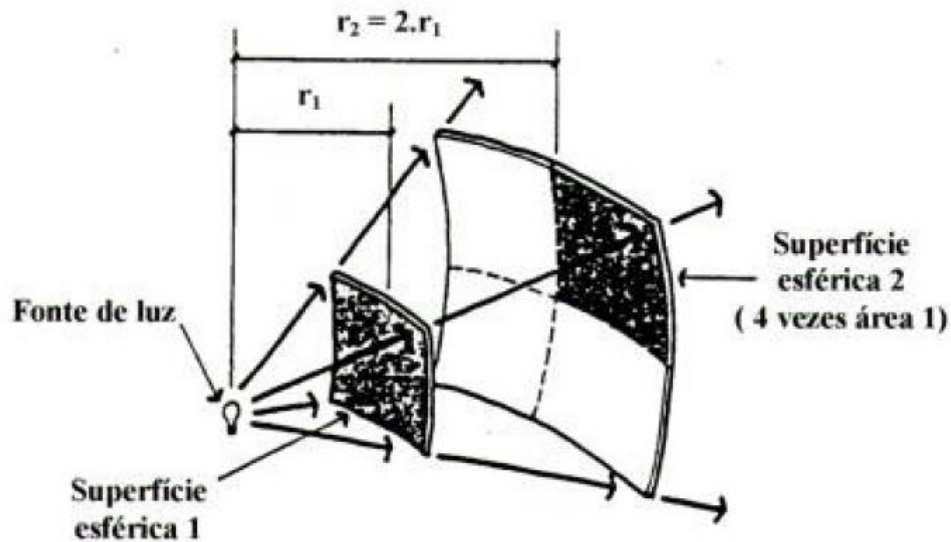


Figura 11:atenuação atmosférica obedece a lei do quadrado da distância

1.3 Modelos Locais de Iluminação

São modelos que tratam da interação de uma ou mais fontes de energia luminosa com os objetos de uma cena sem levar em conta a propagação da energia refletida de um objeto sobre outros objetos. Vamos apresentar um modelo que pela sua simplicidade e eficiência se tornou classicamente conhecido como modelo de iluminação de PHONG.

1.3.1 O Modelo de Iluminação de Bui Tuong Phong

Este modelo de iluminação foi desenvolvido na Universidade de Utah por volta de 1973. É uma proposta com bases empíricas e simples. É considerada uma solução clássica para o estudo de modelos de iluminação. Esta proposta considera inicialmente as **reflexões difusa** e **especular** levando em consideração as propriedades físicas das superfícies.

1.3.1.1A Reflexão Difusa no Modelo de Phong

O **modelo de PHONG** considera uma fonte de luz pontual situada no infinito que incide sobre uma superfície rugosa que provoca uma reflexão difusa que espalha luz de forma igual em todas as direções, conforme ilustra a figura 12.

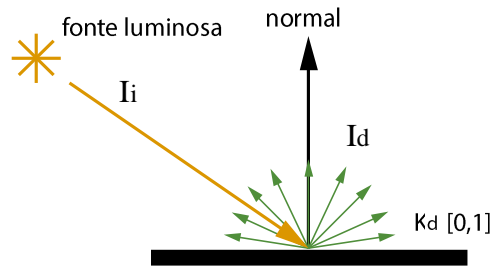


Figura 12: reflexão difusa da luz

A intensidade de luz espalhada difusamente é calculada pela seguinte equação:

$$I_d = I_i k_d \cos(\theta) \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

Onde I_d é a intensidade da **energia luminosa** refletida difusamente, I_i a intensidade que chega a superfície e k_d um coeficiente que representa a propriedade da superfície (material) em refletir ou absorver a **energia luminosa** incidente. k_d pode variar entre 0 a 1. $k_d = 0$, significa que o material absorve totalmente a **energia luminosa**, neste caso, não há reflexão, considerado um caso de **absorção ideal**. Para $k_d = 1$, temos a **reflexão ideal**, neste caso, não há absorção. Assim, o coeficiente k_d indica quanto de energia luminosa é refletida.

Neste modelo a fonte de luz está no infinito. Fazemos os cálculos do $\cos(\theta)$ utilizando uma semireta reta normal ao ponto de incidência da luz. Esta situação pode ser representada vetorialmente por meio de um vetor L que indica a direção do raio incidente de luz e outro vetor N indicando a normal. Estes vetores são unitários. Desta forma, o produto interno entre eles pode ser escrito da seguinte forma.

$$N \cdot L = |N| \cdot |L| \cdot \cos(\theta)$$

Note que como os vetores são unitários, podemos representar o cosseno do ângulo como $N \cdot L$. É importante observar que devido ao princípio de reversibilidade da luz, para efeito de cálculos, o raio incidente é utilizado como que chegando a não partindo d fonte luminosa. Temos graficamente e algebricamente a seguinte situação (figura 13):

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

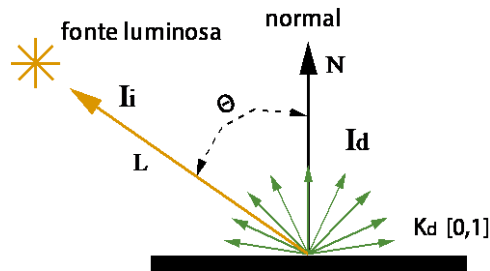


Figura 13:reflexão difusa com L chegando a fonte luminosa

$$I_d = I_i k_d (N \cdot L)$$

1.3.1.2 A Reflexão Especular no Modelo de Phong

O **modelo de PHONG** traz uma solução interessante para a reflexão especular. Sabemos que a reflexão especular ideal em que o ângulo de reflexão é exatamente igual ao ângulo incidente e toda energia luminosa é refletida e nada é absorvida, não é o que acontece em nosso cotidiano.

Neste sentido, **PHONG** propôs para compensar a ausência da reflexão especular ideal, uma direção S de observação em que a reflexão é deslocada por um ângulo ϕ em relação ao raio de reflexão R , conforme a figura 14.

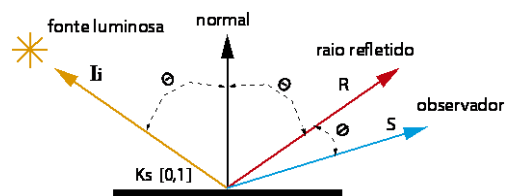


Figura 14 : direção do observador S

A intensidade da luz especular refletida depende do ângulo de incidência, do comprimento de onda, da intensidade de luz e das propriedades do material. Para superfícies imperfeitas a quantidade de luz que chega a um observador depende da distribuição espacial da reflexão especular. Quanto mais lisa a superfícies, mais estreita é a distribuição espacial da reflexão. Assim, a reflexão especular depende da posição do observador e da capacidade de reflexão especular do material expressa por k_s . Em uma superfície refletora ideal a luz é refletida apenas na direção R e nesta posição possui sua maior intensidade. A medida que \emptyset aumenta, o que indica uma maior rugosidade da superfície, ou seja uma dispersão da luz refletida, diminui a concentração da energia luminosa. Com estas informações **PHONG** propôs a seguinte equação empírica para a reflexão especular:

$$I_s = I_i \cdot k_s \cdot \cos(\emptyset)^n$$

Sendo:

- I_s : Intensidade de energia luminosa refletida especularmente de uma determinada superfície;
- I_i : intensidade de energia luminosa incidente na superfície;
- k_s : coeficiente de reflexão especular. Indica quanto uma superfície consegue refletir de energia luminosa. Varia de 0 a 1;
- \emptyset : ângulo formado entre o raio de reflexão ideal R e o raio que indica a direção do observador V ;
- n : número inteiro que auxilia a determinar o brilho de uma determinada região de uma superfície sujeita a reflexão de energia luminosa incidente.

Nesta equação a variável n controla a dispersão da reflexão. Note que quando $n \rightarrow \infty$ temos reflexão ideal, respeitando o ângulo \emptyset , figura 15.

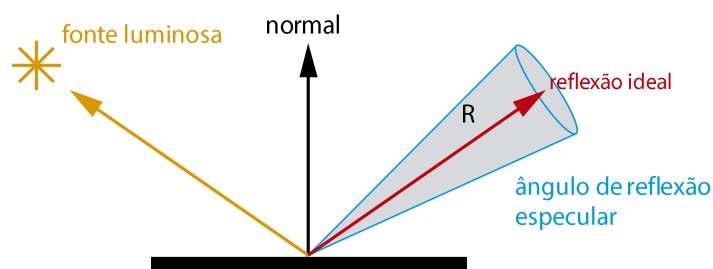


Figura 15 :cone de dispersão da reflexão especular

O gráfico a seguir mostra que conforme o ângulo \varnothing cresce maior é a dispersão que por sua vez pode ser focada com o aumento de n . Desta forma, quando \varnothing se aproxima de zero e n de infinito temos a reflexão ideal (figura 16). Assim, valores de n elevados, representam superfícies mais lisas e valores menores representam superfícies menos lisas, foscas.

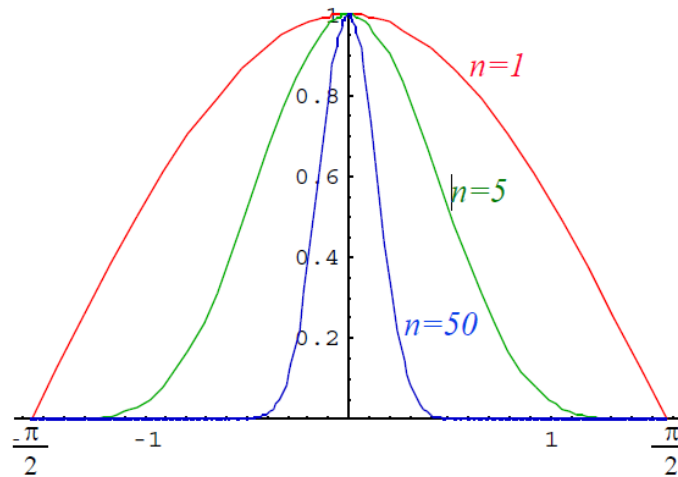


Figura 16: influência de n e \varnothing no espalhamento do brilho

Podemos dizer que a reflexão especular é o resultado da reflexão da luz incidente em uma determinada área concentrada ao redor de um ângulo de reflexão especular 3D. A figura 16 mostra vetorialmente esta situação.

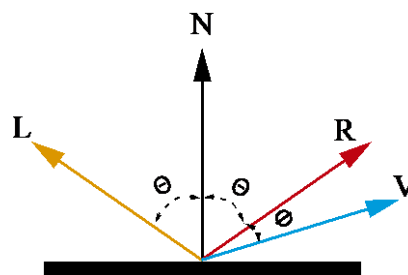


Figura 17: representação vetorial da reflexão especular

Os vetores são todos unitários. O vetor unitário L aponta na direção da fonte pontual de luz. O vetor R representa a direção de reflexão especular e o vetor V aponta na direção do observador. Note que quando $\varnothing = 0$ os vetores V e R são coincidentes, temos neste caso reflexão ideal. Quando isto não ocorre, ou seja, temos superfícies que não são refletoras ideais, a reflexão se dá ao redor de R em uma determinada região. Esta situação pode se representada por meio de um cone que ilustra a dispersão da reflexão de acordo com o

polimento da superfície. Superfícies mais polidas produzem um cone mais estreito e definido, superfícies mais foscas produzem um cone mais largo e menos preciso, figura 17.

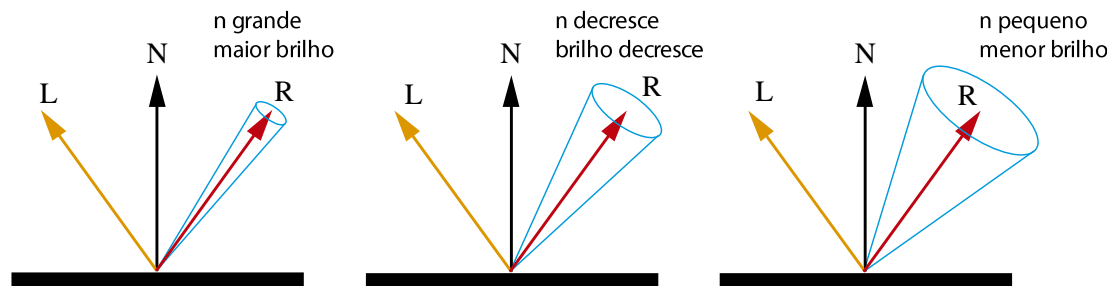


Figura 18: influência do valor de n no brilho

Observe que V e R são vetores unitários. Assim temos que:

$$V \cdot R = |V||R|\cos(\phi)$$

$$V \cdot R = \cos(\phi)$$

Assumindo que o coeficiente de reflexão especular é constante para qualquer material, podemos calcular:

$$I_{\text{especular}} = \begin{cases} I_i k_s (V \cdot R)^n & \text{se } V \cdot R > 0 \\ 0 & \text{se } V \cdot R \leq 0 \end{cases}$$

A direção de R (energia luminosa refletida) pode ser obtida a partir dos **vetores unitários**, de L (direção da energia luminosa incidente) e de N (vetor normal a superfície de reflexão).

Figura 19:

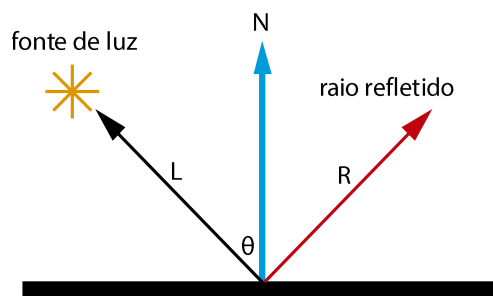


Figura 19 :representação vetorial de R a partir de L e N

Para calcular R vamos, inicialmente, fazer uma projeção ortogonal de um vetor sobre outro. No caso o vetor unitário L sobre o vetor normal N , Figura 20.

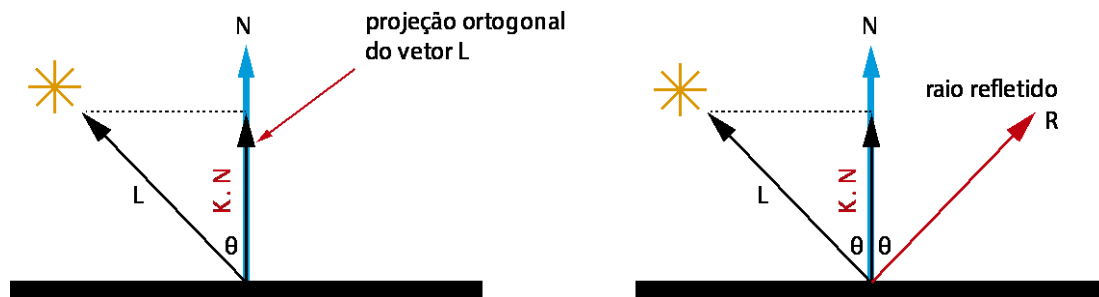


Figura 20 :projecção ortogonal de L para cálculo de R

Considere os vetores unitários L e N . A projeção de L sobre N pode ser feita por um escalar k multiplicando o vetor N , da seguinte forma kN . O vetor $L - kN$ é perpendicular ao vetor N . figura 21:

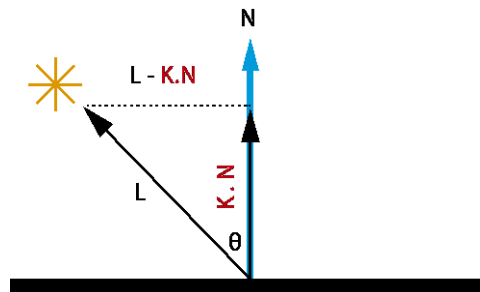


Figura 21 :projecção ortogonal de L

Temos que encontrar que valor de k realiza esta projeção. Como kN , produz um vetor ortogonal a $L - kN$, então o produto interno entre eles é zero, ou seja:

$$(kN) \cdot (L - kN) = 0$$

Deste modo, aplicando a propriedade distributiva do produto interno, temos:

$$(kN) \cdot L - (kN) \cdot (kN) = 0$$

$$k(N \cdot L) - k^2 |N|^2 = 0$$

Como o vetor N é unitário o módulo $|N|^2 = 1$, o que nos leva a equação:

$$k(N \cdot L) - k^2 = 0$$

Colocando o escalar k em evidência:

$$k(N.L - k) = 0$$

Lembrando que todos os termos desta equação são escalares, esta equação só pode ser zero se $k = 0$ ou $N.L - k = 0$, como não é conveniente que k seja igual a zero temos:

$$N.L - k = 0$$

Que nos leva ao valor de:

$$k = N.L$$

Assim, temos que a projeção ortogonal de L sobre N é igual a kN , ou seja, a multiplicação do produto interno (escalar) entre N e L sobre N , da seguinte forma: $N.L(N)$, figura 22.

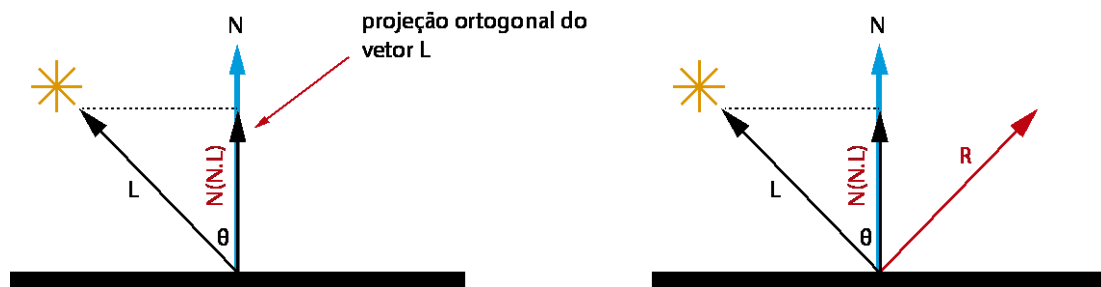


Figura 22 :projeção ortogonal de L em função de N e L

Para o cálculo de R , vetorialmente temos:

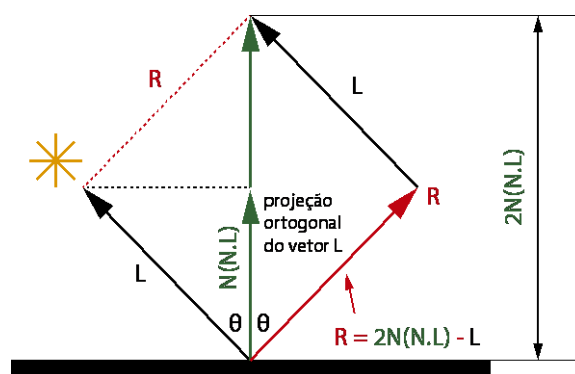


Figura 23 :representação vetorial do cálculo de N

$$R = 2N(N \cdot L) - L$$

ou

$$R = (2N \cdot L)N - L$$

Resumidamente temos:

$$I_s = \begin{cases} I_i k_s (V \cdot R)^n & \text{se } V \cdot R > 0 \\ 0 & \text{se } V \cdot R \leq 0 \end{cases}$$

1.3.1.3A Proposta de James F. Blinn

Na busca de uma solução mais eficiente **James F. Blinn** da Universidade de Utah, considera, para definir a direção do observador, um vetor **H** intermediário entre os vetores **L** e **V**.

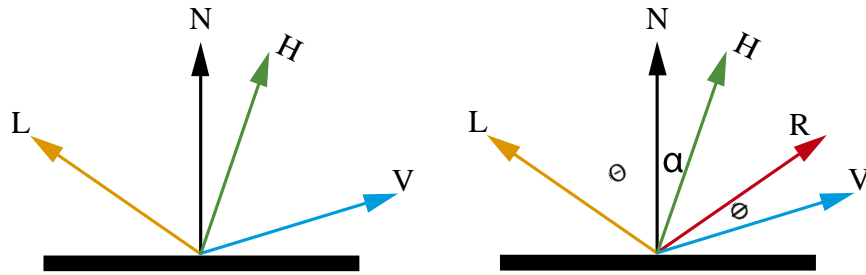


Figura 24 :representação vetorial da proposta de Blinn

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

Se $(N \cdot H)$ for usado no lugar de $(V \cdot R)$, então, trocamos o cálculo de $\cos(\phi)$ pelo de $\cos(\alpha)$.

Se **V** for coplanar a **L** e **R** entre $\alpha = \frac{\phi}{2}$. Para superfícies não planares, **N.H** requer menos cálculos do que **V.R** porque o cálculo de **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.

$$I_{\text{especular}} = \begin{cases} I_i k_s (N \cdot H)^n & \text{se } N \cdot H > 0 \\ 0 & \text{se } N \cdot H \leq 0 \end{cases}$$

1.3.1.4 Reflexão Difusa com Especular no Modelo de Phong

Para uma única fonte de luz pontual situada no infinito, podemos modelar a combinação das reflexões difusa e especular no modelo proposto por **PHONG** como:

$$I = I_{difuso} + I_{especular}$$

$$I = I_i k_d (N \cdot L) + I_i k_s (V \cdot R)^n$$

ou

$$I = I_i k_d (N \cdot L) + I_i k_s (N \cdot H)^n$$

1.3.1.5 Luz ambiente no Modelo de Phong

Considerando apenas as reflexões difusa e especular, os objetos que não sofrerem incidência direta de energia luminosa providas destas fontes, não serão iluminados. Por exemplo, um objeto que tenha a luz obstruída por outro objeto e que por esta razão, não receba raios de luz diretamente de fontes luminosas, não será iluminado. A figura 25 mostra que o objeto A obstrui os raios luminosos com relação ao objeto B.

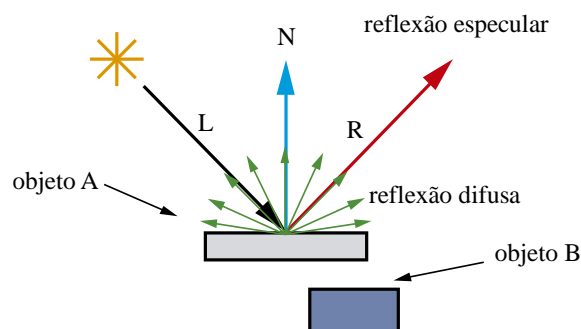


Figura 25: objeto A obstrui os raios luminosos em relação ao objeto B

Para resolver este problema **PHONG** propôs a utilização de uma luz ambiente que tem efeito sobre todos os objetos de cena. Assim, mesmo aqueles objetos que não receberem raios de luz diretamente de fontes de luz serão contemplados com esta iluminação. Como os objetos são vistos porque refletem luz, ele indicou a utilização de um coeficiente de reflexão específico para a luz ambiente. A intensidade luminosa produzida pela luz ambiente é

uniforme para todos os objetos o que vai diferenciar a reflexão é o coeficiente de reflexão (k_a) da superfície específica dos objetos. Algebricamente temos:

$$I = I_a \cdot k_a$$

1.3.1.6 Somando Reflexões no Modelo de PHONG

Com a luz ambiente e a pontual situada no infinito podemos calcular o resultado da intensidade de energia luminosa refletida em um determinado objeto, o que caracteriza um modelo local de iluminação. Assim, podemos escrever algebricamente a seguinte equação representativa deste modelo:

$$I = I_a \cdot k_a + I_i[k_d(N \cdot L) + k_s(V \cdot R)^n]$$

Ou, na proposta de **Blinn**:

$$I = I_a \cdot k_a + I_i[k_d(N \cdot L) + k_s(N \cdot H)^n]$$

As variáveis representam:

- I :intensidade de energia luminosa refletida até o observador;
- I_a :intensidade de energia luminosa provinda da luz ambiente incidente uniformemente em todos os objetos da cena;
- k_a :coeficiente que indica a capacidade de reflexão das superfícies dos objetos gráficos em relação a luz ambiente;
- I_i :intensidade de energia luminosa que chega a superfície (incidente) do objeto provindo de uma fonte de luz pontual situada no infinito;
- k_d :coeficiente que indica a capacidade de reflexão difusa das superfícies dos objetos gráficos em relação a uma luz pontual situada no infinito;
- N :vetor unitário normal a superfície de reflexão;
- L :vetor unitário que indica a direção da luz pontual situada no infinito;
- k_s :coeficiente que indica a capacidade de reflexão especular das superfícies dos objetos gráficos em relação a uma luz pontual situada no infinito;

- \mathbf{R} : vetor unitário que indica a direção de reflexão especular ideal de luz provinda de fonte pontual situada no infinito;
- \mathbf{V} : vetor unitário que indica a direção do observador;
- \mathbf{H} : vetor unitário intermediário a \mathbf{L} e \mathbf{V} que representa de forma empírica a reflexão especular de energia luminosa provinda de fonte luminosa pontual situada no infinito;
- n : constante que pode variar de 0 a ∞ . Quanto maior o valor de n mais próximo estará o vetor \mathbf{V} de representar o vetor \mathbf{R} .

Exemplo 01: Dada um fonte de luz pontual com intensidade de 8 na direção $-4\vec{i} + 3\vec{j}$ sobre um objeto com as seguintes características $k_a = 0.15, k_d = 0.7, k_s = 0.2$ e $n = 2$. Calcule a intensidade de energia luminosa refletida segundo a proposta de PHONG. Considere como direção de observação: $4\vec{i} + 2.5\vec{j}$, uma luz ambiente de: $I_a = 1$ e o vetor normal: $N = \vec{j}$.

Dados do Objeto:

$$k_a = 0.15$$

$$k_d = 0.70$$

$$k_s = 0.20$$

$$n = 2$$

$$N = \vec{j}$$

Dados das Fontes de Luz:

$$\text{Direção da luz pontual: } L = -4\vec{i} + 3\vec{j}$$

$$\text{Intensidade luz pontual: } 8.0$$

$$\text{Posição da luz pontual: } \infty$$

$$\text{Intensidade Luz ambiente: } 1.0$$

Dados do Observador:

$$\text{Direção de observação: } V = 4\vec{i} + 2.0\vec{j}$$

$$\text{Posição do observador: } \infty$$

Observe que no problema, a fonte de luz pontual e o observador estão no infinito. Assim, temos apenas direções o que nos leva a concluir que não teremos fator de atenuação. Vamos então utilizar a seguinte formulação:

$$I = I_a \cdot k_a + I_i [k_d(N.L) + k_s(V.R)^n]$$

Cálculo de $N.L$:

$$N = \vec{j}$$

$$\frac{N}{|N|} = \frac{\vec{j}}{\sqrt{1^2}} = \vec{j}$$

$$\frac{N}{|N|} = \vec{j}$$

$$L = -4\vec{i} + 3\vec{j}$$

$$|L| = \sqrt{-4^2 + 3^2} = 5$$

$$\frac{L}{|L|} = \frac{-4\vec{i} + 3\vec{j}}{\sqrt{-4^2 + 3^2}} = -0.8\vec{i} + 0.6\vec{j}$$

$$\frac{L}{|L|} = -0.8\vec{i} + 0.6\vec{j}$$

$$N.L = 0.6$$

A reflexão especular ideal é dada por:

$$R = 2(N.L)N - L$$

$$R = 2(0.6)\vec{j} - (-0.8\vec{i} + 0.6\vec{j})$$

$$R = 0.8\vec{i} + 0.6\vec{j}$$

Cálculo de $R.V$:

$$|V| = \sqrt{-4^2 + 2^2} = 4.472$$

$$\frac{V}{|V|} = \frac{4\vec{i} + 2\vec{j}}{\sqrt{-4^2 + 2^2}} = 0.8944\vec{i} + 0.4472\vec{j}$$

$$V.R = 0.9838$$

$$I = (1.0)(0.15) + (8.0)(0.70)(N.L) + (8.0).(0.20)(V.R)^2$$

$$I = (1.0)(0.15) + (8.0)(0.70)(0.6) + (8.0).(0.20)(0.98384)^2$$

$$I = 5,0588$$

Na Proposta de Blinn:

$$I = I_a.k_a + I_i[k_a(N.L) + k_s(N.H)^n]$$

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

$$H = \frac{(-0.8\vec{i} + 0.6\vec{j}) + (0.8944\vec{i} + 0.4472\vec{j})}{|5 + 4.472|}$$

$$H = 0.090\vec{i} + 0.996\vec{j}$$

$$N.H = 0,99596$$

$$I = (1.0)(0.15) + (8.0)(0.70)(N.L) + (8.0).(0.20)(N.H)^2$$

$$I = (1.0)(0.15) + (8.0)(0.70)(0.6) + (8.0).(0.20)(0.99596)^2$$

$$I = 5,0971$$

1.3.1.7 Atenuação

Os cálculos de iluminação que fizemos até agora levam em consideração a direção da fonte luminosa, a posição da superfície de reflexão, as propriedades do material e a direção de observação. Desta forma, as superfícies que embora estejam em diferentes posições, mas possuem o vetor normal na mesma direção, terão a mesma iluminação. As equações apresentadas até agora, não distinguem, em termos de cálculo de iluminação, os pontos de faces paralelas com as mesmas propriedades como as apresentadas pelas faces 1 e 2 da figura 26.

Apesar disso, sabemos que a energia luminosa decresce à medida que nos afastamos da fonte de luz.

Este fenômeno é chamado de atenuação e pode ser expresso de forma algébrica como um fator de atenuação da seguinte forma:

$$f_{atenuação} = \frac{1}{d^2}$$

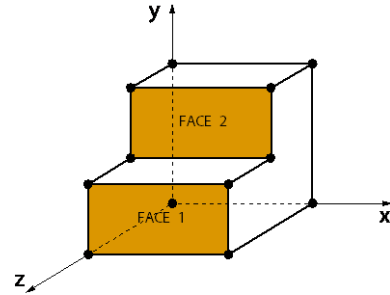


Figura 26 :faces com mesma direção

Este fator de atenuação indica que a luz decresce à medida que nos afastamos dela de acordo com o inverso do quadrado da distância. Todavia, a aplicação desta equação não trouxe bons resultados. Quando a fonte está muito próxima $\frac{1}{d^2}$ causa variações muito grandes e um resultado inverso, isto é, pouca variação quando muito distante. Foi então apresentada uma solução empírica que trouxe bons resultados:

$$f_{atenuação} = f_{at.} = \frac{1}{k_2 d^2 + k_1 B d + k}$$

É possível utilizar a forma simplificada substituindo o denominador por $d + k$, onde d informa a distância da fonte de luz até o ponto da superfície iluminada e k uma constante empírica para calibrar a fórmula.

$$f_{at.} = \frac{1}{d + k}$$

No **modelo de Phong** o fator de atenuação não é aplicado para luz ambiente. Ele pode ser aplicado à fonte de luz pontual. Neste caso, se a posição da luz for definida e não apenas a sua direção, é possível aplicar atenuação da seguinte forma:

$$I = I_a \cdot k_a + \frac{I_i}{d + k} [k_d(N \cdot L) + k_s(V \cdot R)^n]$$

Na proposta de **Blinn**:

$$I = I_a \cdot k_a + \frac{I_i}{d + k} [k_d(N \cdot L) + k_s(N \cdot H)^n]$$

Exemplo 02: considere os dados do exemplo 1 só que agora com a posição da fonte de luz definida na seguinte posição: $P_L(-40,30)$. Note que, com estas coordenadas da fonte de luz, a direção da luz não se altera e d é a distância da fonte de luz até o ponto de incidência $P(0,0)$ sobre a superfície do objeto.

Cálculo de d (distancia entre P_L e P :

$$d = \sqrt{(-40 - 0)^2 + (30 - 0)^2} = 50$$

Adotando $K = 1$. Para PHONG temos:

$$I = I_a \cdot k_a + \frac{I_i}{d + k} [k_d(N \cdot L) + k_s(V \cdot R)^n]$$

$$I = 1(0,15) + \frac{8}{(50 + 1)} [0,7(0,6) + 0,20(0,98384)^2]$$

$$I = 0,2462$$

Para BLINN:

$$I = I_a \cdot k_a + \frac{I_i}{d + k} [k_d(N \cdot L) + k_s(N \cdot H)^n]$$

$$I = 1(0,15) + \frac{8}{(50 + 1)} [0,7(0,6) + 0,20(0,99596)^2]$$

$$I = 0,24700$$

1.3.1.8 Acrescentando Cores

A sensibilização causada pelos raios luminosos nos olhos humanos produz o espectro de cores visual. Este fenômeno é fundamental para a compreensão da realidade que nos cerca. As cores nos auxiliam a distinguir a forma e distância dos objetos. Dentre os fatores que produzem a visão dos objetos suas cores estão as características da luz incidente sobre eles e de suas superfícies em absorver, transmitir ou refletir a energia luminosa recebida.

As formulações até aqui desenvolvidas utilizam uma **luz incidente** monocromática. Nesta situação, a cor da **luz refletida** dependerá das propriedades da superfície do material em absorver, transmitir ou refletir comprimentos de onda específicos da **energia luminosa**

incidente. Assim, a cor gerada na reflexão, nesta aproximação, depende do material e da cor da luz incidente.

No caso de se ter luz incidente colorida, é possível especificá-la por meio de um **sistema de cores**, por exemplo, o **RGB**. Assim, I_i , ou seja, a luz incidente pode ser especificada em termos de um sistema de cores como o **RGB**. Nesta perspectiva, a luz incidente passa a ser expressa por três componentes relativas aos espectros vermelho, verde e azul, respectivamente, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}I_{iRED} &= I_{iR} \\I_{iGREEN} &= I_{iG} \\I_{iBLUE} &= I_{iB}\end{aligned}$$

Analogamente a luz, este modelo de iluminação, também permite especificar o coeficiente de reflexão difusa do material em termos do **sistema de cores**, no caso, **RGB**. Temos então, $k_{dRED} = k_{dR}$, $k_{dGREEN} = k_{dG}$, $k_{dBLUE} = k_{dB}$. A intensidade de energia luminosa refletida difusamente fica:

$$\begin{aligned}I_{dR} &= I_{iR}k_{dR}(N.L) \\I_{dG} &= I_{iG}k_{dG}(N.L) \\I_{dB} &= I_{iB}k_{dB}(N.L)\end{aligned}$$

Neste exemplo, os valores referentes à cor no sistema RGB encontram-se integrados como as constantes de reflexão da superfície do objeto. Tendo em vista maior flexibilidade na definição da cor da superfície objeto, podemos separar o coeficiente de reflexão difusa da definição de cores. Desta forma teremos apenas um coeficiente de reflexão difusa denotado por k_d e um representante para cada componente de cores, da seguinte forma: O_{dR}, O_{dG}, O_{dB} . A determinação da cor referente a reflexão difusa fica:

$$\begin{aligned}I_{dR} &= I_{iR}k_dO_{dR}(N.L) \\I_{dG} &= I_{iG}k_dO_{dG}(N.L) \\I_{dB} &= I_{iB}k_dO_{dB}(N.L)\end{aligned}$$

O mesmo raciocínio pode ser utilizado para a reflexão especular e para a luz ambiente ficando:

$$I_{sR} = I_{iR}k_sO_{sR}(V.R)^n$$

$$I_{sG} = I_{iG} k_s O_{sG} (V.R)^n$$

$$I_{sB} = I_{iB} k_s O_{sB} (V.R)^n$$

Para a luz ambiente:

$$I_{ambR} = I_{aR} \cdot k_{aR}$$

$$I_{ambG} = I_{aG} \cdot k_{aG}$$

$$I_{ambB} = I_{aB} \cdot k_{aB}$$

Somando a reflexão referente a luz ambiente e as componentes das reflexões difusa e especular as equações que determinam a intensidade luminosa refletida fica:

$$I_R = I_{aR} \cdot k_a O_{dR} + \frac{I_{iR}}{d+k} [k_d O_{dR} (N.L) + k_s O_{sR} (V.R)^n]$$

$$I_G = I_{aG} \cdot k_a O_{dG} + \frac{I_{iG}}{d+k} [k_d O_{dG} (N.L) + k_s O_{sG} (V.R)^n]$$

$$I_B = I_{aB} \cdot k_a O_{dB} + \frac{I_{iB}}{d+k} [k_d O_{dB} (N.L) + k_s O_{sB} (V.R)^n]$$

O mesmo pode ser aplicado para a aproximação de **Blinn**:

$$I_R = I_{aR} \cdot k_a O_{dR} + \frac{I_{iR}}{d+k} [k_d O_{dR} (N.L) + k_s O_{sR} (N.H)^n]$$

$$I_G = I_{aG} \cdot k_a O_{dG} + \frac{I_{iG}}{d+k} [k_d O_{dG} (N.L) + k_s O_{sG} (N.H)^n]$$

$$I_B = I_{aB} \cdot k_a O_{dB} + \frac{I_{iB}}{d+k} [k_d O_{dB} (N.L) + k_s O_{sB} (N.H)^n]$$

Exemplo 03: vamos acrescentar cores aos nossos exemplos 01 e 02. Para a luz pontual vamos adotar a cor RGB(0.2, 0.7, 0.45) e para a superfície do objeto a cor branca RGB(1,1,1). Considere uma luz ambiente branca RGB(1,1,1).

Dados da luz pontual:

Posição: $P_L(-40,30)$

Cor:

$$I_{iR} = 0.20$$

$$I_{iG} = 0.70$$

$$I_{iB} = 0.45$$

Dados da luz Ambiente:

$$I_{aR} = 1.0$$

$$I_{aG} = 1.0$$

$$I_{aB} = 1.0$$

Dados do Objeto:

Cor:

$$O_{aR} = 1.0$$

$$O_{aG} = 1.0$$

$$O_{aB} = 1.0$$

Ponto de incidência:

$$P(0,0)$$

Coefficientes de Reflexão:

$$k_a = 0.15$$

$$k_d = 0.70$$

$$k_s = 0.20$$

Índice de Brilho:

$$n = 2$$

Normal a superfície:

$$N = \vec{j}$$

Dados do Observador:

$$\text{Direção de observação: } V = 4\vec{i} + 2.0\vec{j}$$

$$\text{Posição do observador: } \infty$$

Aplicando a equação de **Phong**. Vamos iniciar com o cálculo da intensidade de **Vermelho**:

$$I_R = I_{aR}k_aO_{dR} + \frac{I_{iR}}{d+k} [k_dO_{dR}(N.L) + k_sO_{sR}(V.R)^n]$$

$$I_R = 1(0,15)(1) + \frac{0,20}{(50+1)} [0,7(1)(0,6) + 0,20(1)(0,98384)^2]$$

$$I_R = 0.15241$$

Cálculo da intensidade de **Verde**:

$$I_G = I_{aG}k_aO_{dG} + \frac{I_{iG}}{d+k} [k_dO_{dG}(N.L) + k_sO_{sG}(V.R)^n]$$

$$I_G = 1(0,15)(1) + \frac{0,70}{(50+1)} [0,7(1)(0,6) + 0,20(1)(0,98384)^2]$$

$$I_G = 0.15842$$

Cálculo da intensidade de **Azul**:

$$I_B = I_{aB}k_aO_{dB} + \frac{I_{iB}}{d+k} [k_dO_{dB}(N.L) + k_sO_{sB}(V.R)^n]$$

$$I_B = 1(0,15)(1) + \frac{0,45}{(50+1)} [0,7(1)(0,6) + 0,20(1)(0,98384)^2]$$

$$I_B = 0.15541$$

Cor final utilizando método de **Phong**:

$$(I_R = 0.152, I_G = 0.158, I_B = 0.155)$$

Aplicando a equação de **Blinn**. Cálculo da intensidade de **Vermelho**:

$$I_R = I_{aR}k_aO_{dR} + \frac{I_{iR}}{d+k} [k_dO_{dR}(N.L) + k_sO_{sR}(N.H)^n]$$

$$I_R = 1(0,15)(1) + \frac{0,20}{(50+1)} [0,7(1)(0,6) + 0,20(1)(0,99596)^2]$$

$$I_R = 0.15243$$

Cálculo da intensidade de **Verde** para o método de **Blinn**:

$$I_G = I_{aG}k_aO_{dG} + \frac{I_{iG}}{d+k} [k_dO_{dG}(N.L) + k_sO_{sG}(N.H)^n]$$

$$I_G = 1(0,15)(1) + \frac{0,45}{(50+1)} [0,7(1)(0,6) + 0,20(1)(0,99596)^2]$$

$$I_G = 0.15849$$

Cálculo da intensidade de **Azul** para o método de **Blinn**:

$$I_B = I_{aB}k_aO_{dB} + \frac{I_{iB}}{d+k} [k_dO_{dB}(N.L) + k_sO_{sB}(N.H)^n]$$

$$I_B = 1(0,15)(1) + \frac{0,70}{(50+1)} [0,7(1)(0,6) + 0,20(1)(0,99596)^2]$$

$$I_B = 0.15546$$

Cor final **Blinn**:

$$(I_R = 0.152, I_G = 0.158, I_B = 0.155)$$

1.3.1.9 Acrescentados várias fontes de luz

Estes procedimentos valem para uma única fonte de luz, no entanto, o raciocínio utilizado para uma fonte de luz pode ser estendido para várias fontes (**nl** - número de fontes de luz) apenas fazendo o somatório delas, da seguinte forma:

$$I_R = I_{aR}k_aO_{dR} + \sum_{i=1}^{nl} \frac{I_{iR}}{d+k} [k_dO_{dR}(N.L) + k_sO_{sR}(V.R)^n]$$

$$I_G = I_{aG}k_aO_{dG} + \sum_{i=1}^{nl} \frac{I_{iG}}{d+k} [k_dO_{dG}(N.L) + k_sO_{sG}(V.R)^n]$$

$$I_B = I_{aB}k_aO_{dB} + \sum_{i=1}^{nl} \frac{I_{iB}}{d+k} [k_dO_{dB}(N.L) + k_sO_{sB}(V.R)^n]$$

Com a sugestão de **Blinn**:

$$I_R = I_{aR}k_aO_{dR} + \sum_{i=1}^{nl} \frac{I_{iR}}{d+k} [k_dO_{dR}(N.L) + k_sO_{sR}(N.H)^n]$$

$$I_G = I_{aG}k_aO_{dG} + \sum_{i=1}^{nl} \frac{I_{iG}}{d+k} [k_dO_{dG}(N.L) + k_sO_{sG}(N.H)^n]$$

$$I_B = I_{aB}k_aO_{dB} + \sum_{i=1}^{nl} \frac{I_{iB}}{d+k} [k_dO_{dB}(N.L) + k_sO_{sB}(N.H)^n]$$

1.4 Modelos Globais de Iluminação

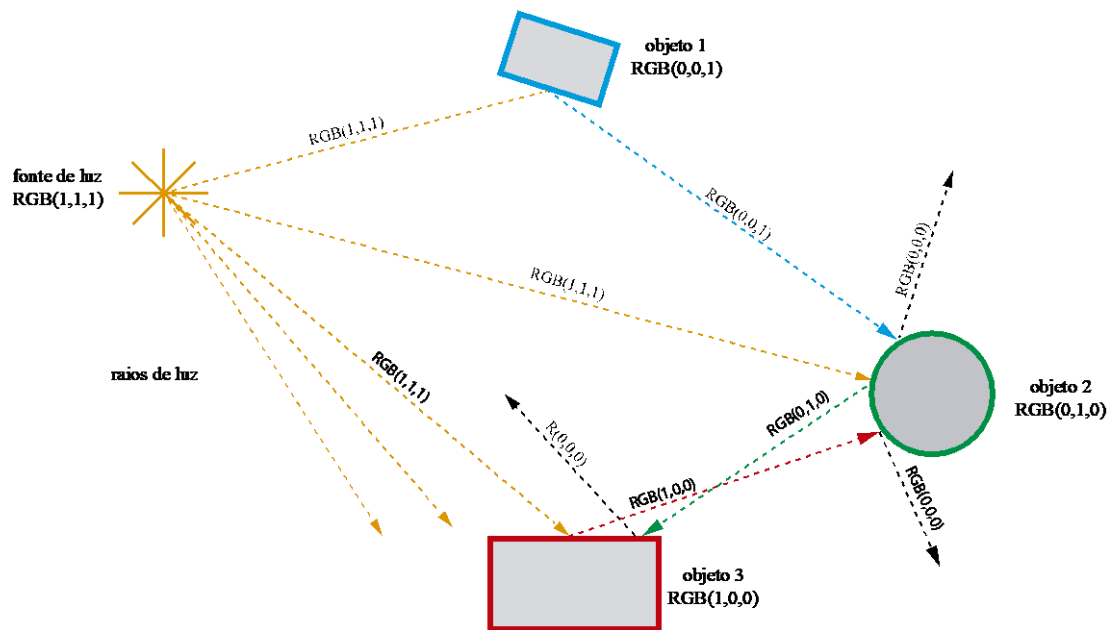


Figura 27: interações de objetos e luz em um modelo de iluminação global

1.5 Modelos de Tonalização ou Sombreamento

Os **modelos de sombreamento** são conhecidos na literatura internacional como **shading** e tem como objetivo calcular a cor de cada ponto das superfícies visíveis dos objetos gráficos. Esta tarefa pode ser realizada calculando-se a normal em cada ponto e aplicar o modelo de iluminação pretendido. Apesar dessa solução ser simples, ela é custosa sendo conhecida como algoritmo da força bruta. Na busca de eficiência computacional, para o caso de malhas poligonais, foram desenvolvidas algumas soluções que se tornaram clássicas que podem ser classificadas em:

- sombreamento constante ou **Flat Shading**;

- sombreamento interpolado ou **Smooth Shading**
 - algoritmo de **Gouraud**
 - algoritmo de **Phong**

1.5.1 Sombreamento Constante

Este tipo de sombreamento também é conhecido como **sombreador plano** ou **flat shading**. Consiste em calcular a iluminação sobre um ponto do polígono visível e atribuir a cor obtida a ele todo. É importante salientar algumas suposições adotadas por esta proposta, sendo elas:

- Leva-se em consideração apenas a direção dos raios luminosos provindos de uma fonte de luz pontual no infinito e um vetor normal ao polígono, supondo que ela esteja no infinito o que leva o produto interno $N \cdot L$ a ficar constante em qualquer ponto sobre o polígono. Na prática é como se todos os raios que incidem sobre a superfície fossem paralelos.
- Analogamente aos raios incidentes os raios refletidos também são paralelos chegando a um observador que está no infinito. É levada em conta apenas a direção de observação. Assim, o produto $R \cdot V$ é constante.
- As faces dos objetos são descritas por planos.

Para ilustrar este tipo de sombreamento apresentamos a figura 28 em que apenas uma normal é calculada para toda a superfície e a iluminação (cálculo da intensidade de energia luminosa refletida) calculada por meio desta normal e utilizada para colorir todos os pixels do polígono que representa a superfície.

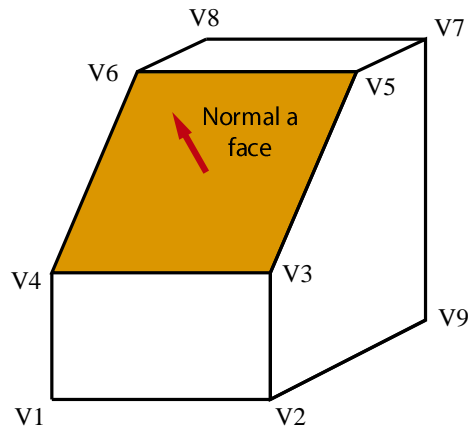


Figura 28: sombreamento plano

Note, na figura 28 que a superfície é colorizada uniformemente. O efeito deste processo de cálculo é mais aparente em uma esfera, figura 29. Na esfera, o uso do mesmo cálculo de iluminação para todos os pixels, causa um efeito uniforme no processo de sombreamento (**flat shading**) o que dá modesta aparência ao objeto gráfico.

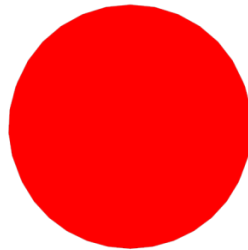


Figura 29: sombreamento plano em uma esfera

Podemos concluir que neste processo de sombreamento, embora de baixo custo computacional, as superfícies curvas, são retratadas de forma distante da realidade, pois, são representadas por superfícies planas colorizadas uniformemente. Se as superfícies curvas forem discretizadas em polígonos menores aparece uma diferença de coloração de polígono para polígono conhecida como **match banding**. Aumentando o número de polígonos para representar a superfície este efeito pode ser minimizado, figura 30.

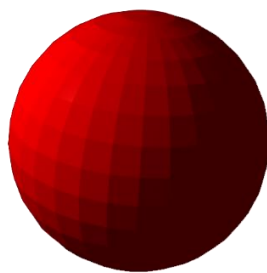


Figura 30: sombreamento plano sobre malha poligonal

1.5.2 Sombreamento Interpolado

Nesta perspectiva o cálculo da iluminação é feito em alguns pontos do polígono e para os demais via interpolação. Esta solução ajuda a aproximação de uma superfície curva por meio de uma malha poligonal. É bem verdade que embora melhore os resultados em relação ao sombreamento constante ainda teremos certa descontinuidade de cor entre os polígonos adjacentes. Esta descontinuidade de coloração é conhecida como **Mach Band**. As soluções apresentadas para realizar a interpolação partem do cálculo da iluminação de alguns pontos que fazem parte da superfície original, ou seja, seus vértices, para realizar a interpolação. Para o cálculo da iluminação é necessário a determinação da **normal** a cada um destes vértices originais.

1.5.2.10 Método de Gouraud

O método de **Gouraud** parte do **cálculo de iluminação** de cada vértice que define o polígono a ser sombreado. Em seguida, é feita uma interpolação bilinear para o cálculo da iluminação dos demais pontos que formam o polígono, figura 31.

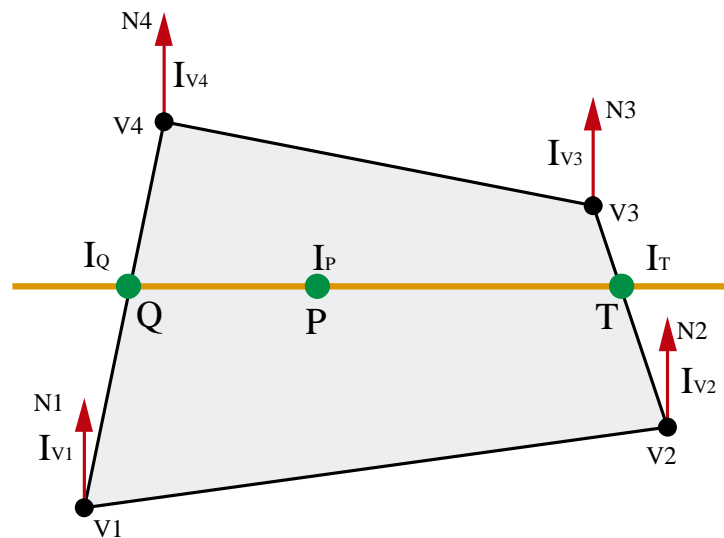


Figura 31:interpolação de Gouraud

Tomando-se como exemplo a situação mostrada na figura 31, o método de Gouraud calcula os vetores normais nos vértices V_1, V_2, V_3, V_4 , para em seguida, calcular a iluminação nestes pontos e, depois, interpolar as iluminações nos pontos Q e T . Em seguida, são interpoladas as iluminações representadas pelo ponto P ao longo da **scanline**.

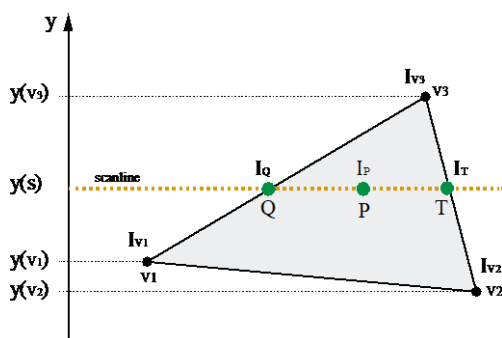


Figura 32:interpolação da iluminação

Vamos ilustrar com funciona a interpolação. Tomemos a figura 32 que mostra uma face triangular de um objeto gráfico a ser sombreada pelo método de **Gouraud**. O cálculo da interpolação da iluminação (intensidade da energia luminosa) será referente ao um ponto P pertencente a uma **scanline** genérica.

A interpolação da iluminação em um ponto P no interior do triângulo inicialmente passa pela interpolação da iluminação nas arestas entre V_1V_3 e V_2V_3 para depois, realizar a interpolação no interior do polígono. Este procedimento é realizado por meio de uma **scanline** horizontal que avança na direção vertical no sentido de cima para baixo, portanto decrescendo o valor de y . Assim, vamos iniciar o cálculo da interpolação entre a iluminação do vértice V_3 e o vértice V_1 (iluminação no ponto Q , chamada I_Q). Depois, realizamos a interpolação entre os vértices V_3 e V_2 (iluminação no ponto T , chamada I_T) obtendo os valores de iluminação nos pontos Q e T .

$$I_Q = I_{V3} - (I_{V3} - I_{V1}) \frac{(y_{V3} - y_s)}{(y_{V3} - y_{V1})}$$

$$I_T = I_{V3} - (I_{V3} - I_{V2}) \frac{(y_{V3} - y_s)}{(y_{V3} - y_{V2})}$$

Em seguida, com os resultados da iluminação dos pontos Q e T calculamos ao longo da **scaline**, por meio da interpolação entre pontos Q e T , a intensidade de energia luminosa no ponto P, I_P .

$$I_P = I_T - (I_T - I_Q) \frac{(x_T - x_p)}{(x_T - x_Q)}$$

É importante destacar que **este método interpola iluminação**. Desta forma, a cor do ponto Q é obtida por meio da interpolação da iluminação dos vértices V_3 e V_1 e a do ponto T pela interpolação da iluminação dos vértices V_3 e V_2 . O ponto P por sua vez, é resultado da interpolação da intensidade de energia luminosa dos pontos Q e T ao longo da **scanline**.

A realização dos cálculos da iluminação necessita da normal ao ponto analisado. No método de **Gouraud** a iluminação é calculada nos vértices do objeto gráfico. Assim, precisamos calcular a normal nesses vértices. Ocorre que a normal é definida sobre um plano e não sobre um ponto. Desta forma, para se obter a normal em um vértice (ponto), **Gouraud** leva em consideração a contribuição de faces que possuam arestas concorrentes a este ponto calculando um representante do vetor normal para este vértice, figura 33.

É feita uma estimativa de vetor normal nos vértices por meio de uma média dos vetores normais das faces que concorrem a este vértice. Com o auxílio da figura 33 ilustramos os cálculos dos vetores nos vértices V_3 e V_5 .

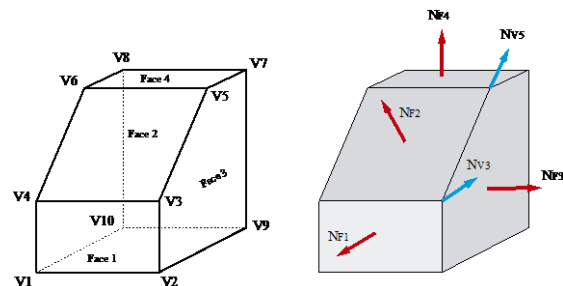


Figura 33: normal média

$$N_{V3} = \frac{N_{F1} + N_{F2} + N_{F3}}{3}$$

$$N_{V5} = \frac{N_{F2} + N_{F3} + N_{F4}}{3}$$

SOMBREAMENTO GOURAUD

- {
- determinar o vetor normal para cada face/polígono do objeto gráfico;
- determinar o vetor unitário médio para cada vértice do polígono;
- aplicar um modelo de iluminação para cada vértice;
- interpolar linearmente a intensidade luminosa entre vértices (arestas);
- interpolar linearmente a intensidade luminosa entre arestas (superfície do polígono);
- }

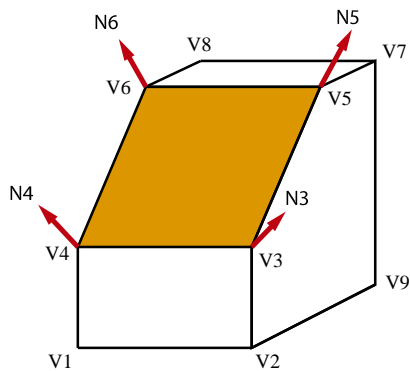


Figura 34: normais calculadas nos vértices

A figura 34 mostra as normais calculadas nos vértices de uma face de um objeto gráfico. Com estas normais são calculadas as luminosidades referente aos vértices. Em seguida, utilizando a intensidade de energia luminosa calculada nos vértices são interpoladas as luminosidades referentes a outros pixels do polígono.

Em uma superfície plana como da figura 34 não apresenta muita diferença do sombreamento constante (**flat shading**). No entanto, em superfícies curvas, a diferença do método proposto por **Gouraud** em relação ao sombreamento plano é acentuada, figura 35.

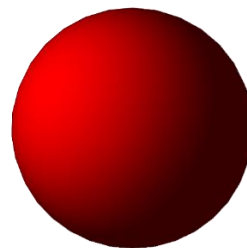


Figura 35: sombreamento Gouraud em um esfera

Observe que na figura 34 o brilho da superfície da esfera é espalhado, não oferece destaque. Esta é uma característica do sombreamento de superfícies curvas quando é utilizado o método de **Gouraud**. Neste sentido, perde aproximação com a realidade.

1.5.2.20 Método de Phong

Outra proposta para sombreamento foi feita por PHONG. Neste método é proposto que o cálculo da iluminação também seja feita por meio de interpolação, porém, a interpolação proposta é de normais e não de iluminação. Desta forma, partindo das normais calculadas nos vértices dos polígonos que representam as faces do objeto gráfico, é feito o cálculo das normais, para cada ponto (pixel) e neste contexto, o cálculo da iluminação.

Como neste método o cálculo da iluminação é feito para todos os pixels que formam a face analisada do objeto gráfico o cálculo da normal pode ser feito utilizando a expressão analítica da superfície ou por interpolação utilizando as normais calculadas nos vértices com a ajuda dos polígonos vizinhos figura 36.

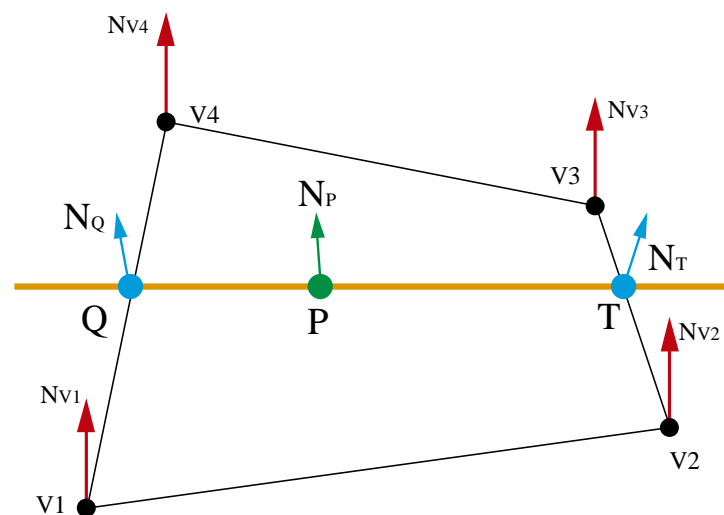


Figura 36:interpolação de normais

É feita uma estimativa de vetor normal nos vértices por meio da média dos vetores normais que representam as superfícies adjacentes ao vértice analisado. Com as normais dos vértices torna-se possível calcular as normais das arestas e com estas calcular as normais da linha de varrimento (**scanline**). Em seguida é calculada a intensidade de energia luminosa em cada ponto (pixel) com sua respectiva normal.

SOMBREAMENTO PHONG

```
{  
    • determinar o vetor normal para cada face/polígono do objeto gráfico;  
    • determinar o vetor unitário médio para cada vértice do polígono;  
    • interpolar linearmente o vetor normal para os pontos das arestas;  
    • interpolar linearmente o vetor normal para os pontos entre arestas;  
    • aplicar um modelo de iluminação para cada ponto (pixel) do polígono cuja  
      normal foi calculada (superfície do polígono);  
}
```

A figura 37 mostra como o método de Phong trabalha com as normais nos vértices e as interpolações feitas nas arestas e na scanline.

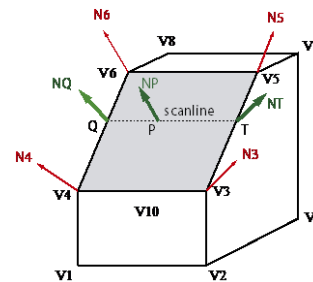


Figura 37: normais no método de Phong

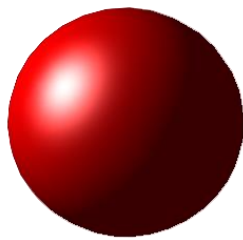


Figura 38: lei do quadrado da distância

Em uma superfície curva a contribuição de **PHONG** fica mais acentuada. Nela há maior destaque em relação ao brilho, o que dá melhor aparência aos objetos sombreados (figura 38)

1.5.2.3 Problemas com o Sombreamento Interpolado

Os sombreamentos interpolados apresentam alguns problemas. Dentre eles está o de que a distribuição do brilho em determinados objetos podem variar de acordo com a sua posição e geometria. Veja o exemplo a seguir, figura 41. O objeto gráfico consiste em um retângulo que inicialmente está com sua parte mais longa na horizontal (posição original). Vamos tomar o sombreamento feito neste objeto nesta posição, ou seja, o **scanline** sai da aresta AB e vai até a aresta DC. Observe que se em seguida o objeto for rotacionado de 90° no sentido anti-horário o sombreamento segue uma determinada direção que é diferente do caso em que o objeto é inicialmente rotacionado para depois ser sombreado. Assim, notamos que a interpolação depende da orientação do polígono podendo trazer resultados diferenciados.

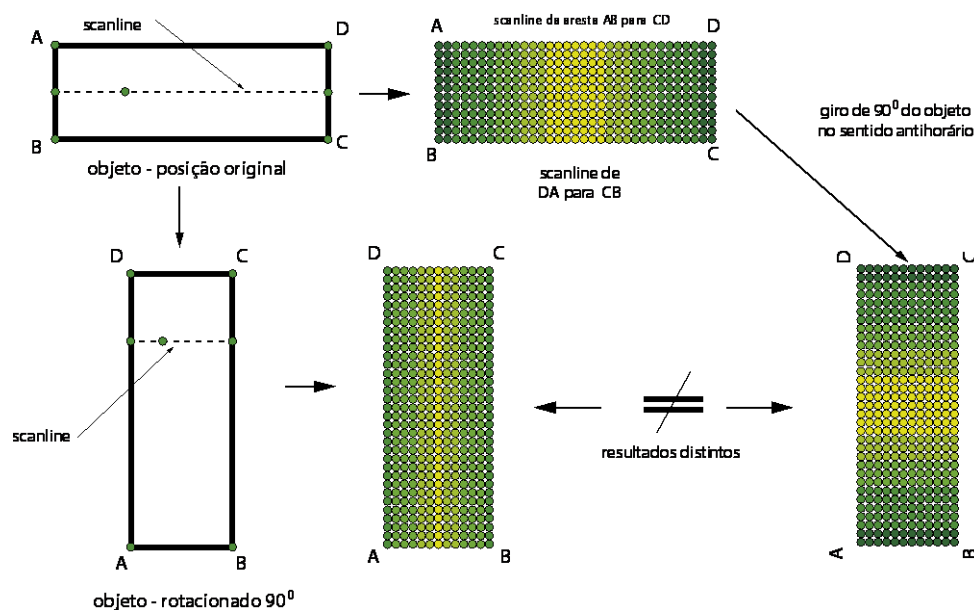


Figura 41: diferença no resultado do sombreamento devido a interpolação

1.5.2.4 Síntese dos Métodos Interpolados

Tabela 01: Gouraud Shading vs Phong Shading

Quesito	Sombreamento Gouraud	Sombreamento Phong
Pseudônimos	Este método também é conhecido como sombreamento interpolado (interpolation Shading) ou método de sombreamento de interpolação de cores.	Este método também é conhecido como sombreamento interpolado por meio de vetores normais (normal vector interpolation shading).
Autor e Ano de Criação	Este método foi proposto pelo francês Henri Gouraud em 1971 em seus estudos de doutoramento na Universidade de UTAH, USA..	Este método foi introduzido por Phong Bui Tuong em 1973.
Tempo de execução/Custo	O método de Gouraud é mais rápido do que o Phong . Executa menor número de cálculos, portando menos custoso.	Mais lento do que o de Gouraud , executa maior número de operações, portando mais custoso.
Precisão	Menos precisão que PHONG	Mais preciso que Gouraud
Base de cálculo	Calcula a intensidade de energia luminosa (iluminação) em cada vértice de polígono que serve de base para interpolação da iluminação dos demais pontos do polígono.	Calcula para cada vértice o vetor médio auferido dos vetores que representam as superfícies que concorrem ao vértice. Com estes resultados interpola normais para depois calcular a iluminação
Base Física ou Empírica	Empírica	Empírica
Proximidade dos resultados com a realidade	Mais distantes da realidade	Menos distantes da realidade
Interpolação	Interpola a intensidade de energia luminosa sobre a superfície do polígono. Interpola iluminação.	Interpola as normais da superfície para então realizar o calculo da intensidade da energia luminosa refletida
Área de Brilho	Mais espalhadas e menos precisas e definidas	Mais concentradas, precisas e bem definidas

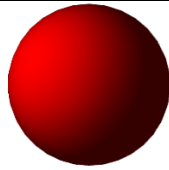


Figura 39: lei do quadrado da distância

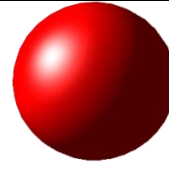


Figura 40: lei do quadrado da distância

Representação de superfícies curvas	Aproximação grosseira devido ao calculo ser feito por uma interpolação linear.	Aproximação mais precisa devido ao calculo da normal ser feito para cada pixel que representa a superfície.
Detalhes especulares	Os destaques produzidos por reflexões especulares aparecem e desaparecem rapidamente devido a interpolação de iluminação ser feita por meio da iluminação dos vértices	Detalhes especulares mais concentrados devido a interpolação de normais serem mais próximos as características das superfícies sombreadas
Mach Bands	O problema das bandas mach é mais acentuado se comparado com o Método de PHONG .	O problema das bandas mach é menor se comparado com o Método de Gouraud .
Vantagens	Mais rápido, menor número de cálculos	Mais preciso. Representa melhor a iluminação de superfícies curvas.
Desvantagens	Pode ocorrer suavizações indevidas de superfícies curvas discretizadas por polígonos. Além disso, possui dificuldades em representar superfícies curvas.	Executa mais cálculos do que o método de Gouraud , portanto é mais demorado. Além disso, apesar de menores, também possui dificuldades em representar superfícies curvas discretizadas por polígonos.

1.6 Exercícios

1.6.1 Quais são as principais simplificações geométricas adotadas por **Phong Bui Tuong** em seu Modelo de Iluminação?

Resposta:

As fontes de luz e o observador são pontuais e localizados no infinito. Além disso, não leva em conta a geometria dos objetos.

1.6.2 Qual a diferença entre os **Modelos de Sombreamento não Interpolados e Interpolados** ?

Resposta:

Os modelos não interpolados realizam os cálculos de iluminação em todos os pontos do polígono que representa a superfície, por esta razão, também são conhecidos como métodos diretos.

Nos métodos interpolados realizam os cálculos de iluminação ou de normais somente em alguns pontos estratégicos da superfície, para depois, interpolar valores de normais ou intensidade luminosa para os demais pontos.

Os métodos de **Gouraud** e **Phong** utilizam interpolação. O método de **Gouraud** calcula as normais e iluminação nos vértices de polígonos que representam as superfícies para depois, interpolar o cálculo de iluminação nos demais pontos. O método de **Phong** também calcula as normais nos vértices dos polígonos que representam as superfícies. A diferença é que **Phong** propôs a interpolação de normais, para depois efetuar o cálculo da iluminação nesses pontos.

1.6.3 No **Modelo de Iluminação de Phong** existe um parâmetro que pretende simular o fato das superfícies não serem refletoras especulares puras. Que fator é esse e qual a contribuição na forma global?

Resposta:

O parâmetro de brilho, n determina as dimensões da área especular: quanto mais brilhante for a superfície, menor deverá ser a área de brilho, ou seja, n elevado. Pelo contrário, quanto mais fosca for a superfície maior será a dimensão dessa área e, portanto n baixo. Na fórmula a componente especular aparece como: $K_s(R.V)^n$ em que:

- K_s é o coeficiente de reflexão especular, de valor constante e dependente das propriedades ópticas do material;
- R é o raio reflectido e
- V é o raio em direção ao ponto de vista.

1.6.4 Descreva, justificando, um problema comum aos **Modelos de Sombreamento de Gouraud e Phong** relacionado com o modo como são calculadas as normais. Proponha uma solução para este tipo de problema.

Resposta:

Podem ocorrer erros porque as normais aos vértices são calculadas pela média das normais aos polígonos. É possível observar na figura 41 que pode ocorrer um falso alisamento da superfície, quando a aproximação poligonal é pouco rigorosa e se observa uma conjunção indesejada dos valores das normais em polígonos adjacentes.

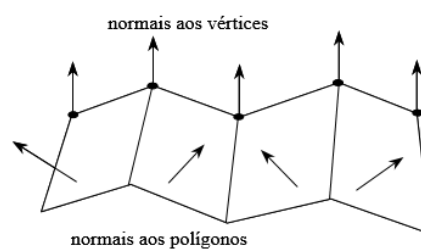


Figura 41: efeito de falso alisamento da superfície

A solução é trivial, basta utilizar um Modelo de Sombreamento não Interpolado também designado por Método Direto.

1.6.5 Descreva o que entende por **Modelo de Reflexão** e **Modelo de Iluminação** e qual a relação entre eles.

Resposta:

O **Modelo de Reflexão** descreve a forma como a luz interage com a superfície dos objetos, função das propriedades dessas superfícies e da natureza da luz incidente. O **Modelo de Iluminação** descreve a natureza e a distribuição de intensidade da luz emanada pelas fontes luminosas presentes na cena que se pretende representar. Definidos estes modelos e conhecidas as posições e orientações relativas dos objetos e das fontes de luz, é possível proceder ao Cálculo de Sombreamento das superfícies desses objetos.

1.6.6 O **Modelo de Iluminação de Phong** suporta corretamente o decaimento da intensidade luminosa (**depth cueing**) de um raio de luz devido ao efeito de nevoeiro? Qual a solução adotada?

Resposta:

O modelo de Iluminação de **Phong** suporta o **depth cueing** de um modo empírico, limitando-se a definir uma constante ***K*** e a introduzir na fórmula uma dependência da distância do objecto ao ponto de vista, ***d***.

Na fórmula todas as componentes, exceto, por razões óbvias, a de ambiente, são divididas pelo valor de **$(d + K)$** .

1.6.7 Observe as duas figuras juntas que representam uma placa iluminada diretamente por uma fonte de luz, igual, colocada na mesma posição e orientada na mesma direção nos dois casos. O cálculo de uma delas empregou o **sombreamento de Gouraud**, enquanto na outra foi empregue o **sombreamento de Phong**. Identifique qual das duas figuras foi gerada empregando o **sombreamento de Gouraud** e explique a(s) razão(ões) da diferença verificada para a outra figura.

Resposta:

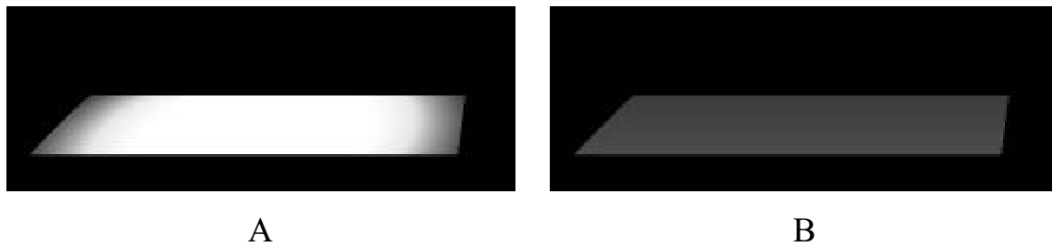


Figura 42: diferença de propagação do brilho ente Gouraud e Phong

A figura B emprega o sombreado de Gouraud. Este sombreado é aplicado a partir da iluminação calculada nos vértices dos polígonos que, depois, é interpolada para os pontos restantes. Assim, se os vértices estiverem todos mal iluminados, todo o polígono será representado como se estivesse completamente mal iluminado. No sombreado de Phong, a iluminação local é calculada a partir das normais interpoladas localmente, podendo agora surgir zonas de maior iluminação que é exatamente o que acontece com a figura A.

1.6.8 O que é um **Modelo de Iluminação** e um **Modelo de Reflexão**? O que se entende por componente especular e por componente Difusa? Em que contexto aparecem estes conceitos?

Resposta:

O **Modelo de Reflexão** descreve a forma como a luz interage com a superfície dos objetos, função das propriedades dessas superfícies e da natureza da luz incidente enquanto que o **Modelo de Iluminação** descreve a natureza e a distribuição de intensidade da luz emanada pelas fontes luminosas presentes na cena que se pretende representar. Definidos estes modelos e conhecidas às posições e orientações relativas dos objetos e das fontes de luz, é possível proceder ao cálculo de sombreado das superfícies desses objetos (**Shading**). O **Modelo de Reflexão de Phong** considera a existência de Reflexão Ambiente, Reflexão Difusa e Reflexão Especular. A componente especular modela a reflexão da energia luminosa numa única direção (ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência). A componente difusa modela reflexão da energia luminosa em todas as direções e é responsável pela cor do objeto (parte da luz incidente é seletivamente absorvida pelo próprio objeto).

1.6.9 Escreva a fórmula do **Modelo de Reflexão de Phong** e descreva o significado de cada um de seus componentes. Use uma figura para ilustrar o significado de alguns dos componentes. Considere-se a seguinte imagem (figura 43):

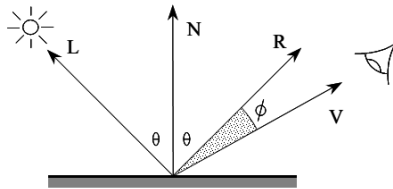


Figura 43: modelo de reflexão de Phong

Resposta:

A Fórmula de Iluminação de Phong é:

$$I = I_a \cdot K_a + I_i [K_d (L \cdot N) + K_s (R \cdot V)^n]$$

Em que:

- I é Intensidade da Energia Luminosa Reflectida pelo objecto.
- I_a é a Intensidade da Energia Luminosa Ambiente.
- I_i é a Intensidade da Energia Luminosa Incidente.
- K_a é constante para um dado objecto (Coeficiente de Reflexão de Luz Ambiental)
- K_d é a constante de refletividade difusa (0.0,1.0) e traduz o modo como o material reage ao comprimento de onda da luz incidente.
- K_s é o coeficiente de reflexão especular, de valor constante e dependente das propriedades ópticas do material.
- n ("shininess") traduz o grau de brilho.

1.6.10 Ordene os seguintes métodos de geração de imagens do mais rápido para o mais lento em termos do tempo de cálculo de imagem:

- A) Sombreamento de Phong
- B) Sombreamento plano
- C) Modelo de Arames
- D) Sombreamento de Gouraud.

Para cada um dos modelos indique qual a interpolação usada (normais, intensidades ou ambas).

Resposta:

- A ordem correta é C –B –D –A
- C e B – não usa interpolação
- D – Interpola intensidades
- A – Interpola normais

1.6.11 que se entende por **Depth Cueing**? Escreva a equação de iluminação de **Phong** contemplando o efeito do **Depth Cueing**.

Resposta:

Depth Cueing pretende representar, de modo empírico a menor intensidade da energia luminosa refletida pelos objetos que se encontrem mais afastados do ponto de observação. No modelo de **Phong** para considerar o efeito da atenuação atmosférica sobre a intensidade da luz que parte dos objetos e atinge o ponto de observação introduzem-se duas variáveis: d a distância entre o objeto e o ponto de observação e K uma constante a qual permite controlar, de modo empírico a diminuição da intensidade da energia luminosa. A fórmula fica:

$$I = I_a \cdot k_a + \frac{I_i}{(d + k)} [k_d(N \cdot L) + k_s(R \cdot V)^n]$$

1.6.12 Descreva o método de Sombreamento Constante e duas situações em que a utilização dessa técnica pode ser adequada.

Resposta:

O método de Sombreamento Constante consiste em calcular a intensidade luminosa para um só ponto de cada polígono e aplicar o valor obtido no sombreamento de toda a sua área interior. Tal procedimento corresponde a admitir que os produtos $N \cdot L$ e $R \cdot V$ (produto interno de vetores) são constantes dentro de cada polígono.

Os resultados obtidos por este método só são aceitáveis se:

1. A malha poligonal a ser sombreada representa realmente a superfície do objeto;
2. A pretensão for realizar uma representação rápida da cena.

1.6.13 Descreva 2 limitações do sombreado de **Gouraud** sendo uma delas não resolvida pelo sombreado de **Phong**. Justifique.

Resposta:

Percepção parcial da malha poligonal de base, devido ao efeito de **Mach banding**. Vista humana é sensível a variações de intensidade luminosa até à segunda derivada, apreende descontinuidades junto das fronteiras poligonais (faixas brilhantes). Bastante perceptível quando a zona especular se estende por vários polígonos.

ou

Perturbações perceptíveis em sequências animadas (c/ rotações, translações, movimentações de câmara), dado que a interpolação de intensidades é executada em coordenadas do dispositivo, mas partindo de vetores normais calculados em coordenadas do Mundo.

e

Podem ocorrer erros porque as normais aos vértices são calculadas pela média das normais aos polígonos como se pode observar na figura 44:

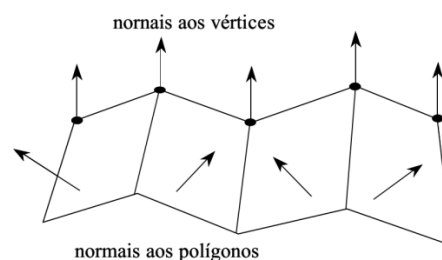


Figura 44: falso alisamento da superfície

Como se trata de um problema de erro no cálculo das normais aos vértices o problema se mantém no sombreado de Phong.

1.6.14 Considere que tem uma fonte de energia luminosa branca a iluminar um a cena composta por um objeto dourado.

- a) Descreva o significado dos vários parâmetros da seguinte expressão do **modelo de iluminação de Phong**:

$$I = I_a k_a O_d + I_i [k_d O_d (N \cdot L)]$$

Resposta:

- I_a – Intensidade da Energia Luminosa Ambiente emitida por uma Fonte de Iluminação
- I_i – Intensidade da Energia Luminosa emitida por uma Fonte de Iluminação
- k_a – Coeficiente de Reflexão Ambiente
- k_d – Coeficiente de Reflexão Difusa
- O_d – Cor difusa do material
- N – Vector Normal à superfície no ponto em que se está aplicando o Modelo de Iluminação
- L – Vector que une o ponto na superfície do objecto à Fonte de Iluminação

b) A equação está incompleta. Qual a componente que está em falta e qual a sua importância para a visualização do objeto dourado?

Falta a componente especular que tem a seguinte fórmula: $I_s = I_i k_s O_s (R \cdot V)^n$. Como o objecto a visualizar é dourado reflete predominantemente de modo especular a energia luminosa que lhe incide, pelo que sem a componente especular o objecto não poderia ser realisticamente visualizado.

1.6.15 Apresente 2 exemplos de problemas na imagens de objectos obtidas através da aplicação de métodos de sombreamento interpolados. Se entender pode recorrer a desenhos para suportar a explicação do problema. Podem ser escolhidos quaisquer dois dos seguintes:

Resposta:

- Aspecto marcadamente poligonal ao longo dos lados que constituem a silhueta de superfícies curvas, aproximadas por malhas de polígonos.
- O resultado do sombreamento depende da orientação dos polígonos. Podem ocorrer perturbações quando a orientação de um objeto varia lentamente ao longo da sequência de imagens de uma animação.

- Nem sempre as normais calculadas nos vértices da malha de polígonos constituem uma boa aproximação à normal da superfície a sombrear, situação em que é necessário refinar a aproximação poligonal.

1.6.16 Em uma cena contendo uma superfície de cor amarela existe uma fonte de luz branca. A cena é também iluminada por luz ambiente de cor verde em que a intensidade de cada componente é 50% da intensidade respectiva da fonte de luz branca. A superfície é caracterizada por apresentar coeficientes de reflexão ambiente iguais a um terço dos coeficientes de reflexão difusa (0.6, 0.6, 0 para as componentes RGB respectivamente) e coeficientes de reflexão especular idênticos e iguais a 0.1. Nestas condições, determine a cor com que a superfície será visualizada com e sem reflexão especular.

Resposta:

Vamos aplicar os dados da fonte de luz e do objeto inicialmente sem a reflexão especular. A tabela 2 mostra o resultado:

Tabela 2: calculo da iluminação sem reflexão especular

F. de Luz		Objeto		Cor Refletida
Tipo	Cor	Coef. Reflexão	Cor	
Ambiente	[0.0, 0.5, 0.0]	Ka = 0.2	[1.0, 1.0, 0.0]	[0.0, 0.1, 0.0]
Pontual	[1.0, 1.0, 1.0]	Kd = 0.6	[1.0, 1.0, 0.0]	[0.6, 0.6, 0.0]
Resultado				[0.6, 0.7, 0.1]

Adicionando a reflexão especular aos dados do problema temos os seguintes resultados expostos na tabela 03:

Tabela 3: calculo da iluminação com reflexão especular

F. de Luz		Objeto		Cor
Tipo	Cor	Coef. Reflexão	Cor	Refletida
Ambiente	[0.0, 0.5, 0.0]	Ka = 0.2	[1.0, 1.0, 0.0]	[0.0, 0.1, 0.0]
Pontual	[1.0, 1.0, 1.0]	Kd = 0.6	[1.0,1.0, 0.0]	[0.6, 0.6, 0.0]
		Ks = 0.1	[1.0, 1.0, 1.0]	[0.1, 0.1, 0.1]
Resultado				[0.7, 0.8, 0.1]

1.6.17 Numa cena contendo uma superfície de cor amarela existe uma fonte de luz branca. A cena é também iluminada por luz ambiente de cor verde e com uma intensidade igual a 50%. A superfície é caracterizada por apresentar coeficientes de reflexão ambiente iguais a dois terços dos coeficientes de reflexão difusa [0.6, 0.6, 0] e coeficientes de reflexão especular idênticos e iguais a 0,3.

Resposta:

- a) nestas condições, determine a cor com que a superfície será visualizada com e sem reflexão especular.

Vamos aplicar os dados da fonte de luz e do objeto inicialmente sem a reflexão especular. A tabela 4 mostra o resultado:

Tabela 4: calculo da iluminação sem reflexão especular

F. de Luz		Objeto		Cor
Tipo	Cor	Coef. Reflexão	Cor	Refletida
Ambiente	[0.0, 0.5, 0.0]	Ka = 0.4	[1.0, 1.0, 0.0]	[0.0, 0.2, 0.0]
Pontual	[1.0, 1.0, 1.0]	Kd = 0.6	[1.0, 1.0, 0.0]	[0.6, 0.6, 0.0]
Resultado				[0.6, 0.8, 0.0]

Adicionando a reflexão especular aos dados do problema temos os seguintes resultados expostos na tabela 05:

Tabela 5: calculo da iluminação com reflexão especular

F. de Luz		Objeto		Cor
Tipo	Cor	Coef. Reflexão	Cor	Refletida
Ambiente	[0.0, 0.5, 0.0]	Ka = 0.4	[1.0, 1.0, 0.0]	[0.0, 0.2, 0.0]
Pontual	[1.0, 1.0, 1.0]	Kd = 0.6	[1.0,1.0, 0.0]	[0.6, 0.6, 0.0]
		Ks = 0.3	[1.0, 1.0, 1.0]	[0.3, 0.3, 0.3]
Resultado				[0.9, 1.1, 0.3]

b) Comente o resultado e proponha soluções.

Note que temos no resultado com a reflexão especular valores superiores a 1. No caso, o valor referente à Green (verde) é 1.1. Os valores válidos variam de 0 a 1. Uma solução para este problema é atribuir valor 1 a resultados que excedam a 1 ou normalizar os valores RGB, o que pode ser feito dividindo-se todos os valores RGB pelo maior valor. No caso, 1.1 da seguinte forma: $[0.9/1.1, 1.1/1.1, 0.3/1.1]$ resultado em **[0.818, 1.000, 0.272]**.

1.6.18 Considere uma certa cena com uma superfície iluminada por uma fonte de luz branca pontual e uma luz ambiente verde. Se o ângulo de incidência da luz pontual com uma dada superfície for de 60° , em relação a normal, quais serão as características do material, segundo o modelo de **Phong** simplificado, para que a cor visualizada seja um verde de componente RGB (0.4; 0.8; 0.2). Empregue o modelo simplificado de **Phong** ignorando a componente especular, isto é, definindo o material em termos dos coeficientes ambientes $K_a(K_{aR}; K_{aG}; K_{aB})$, e difuso $K_d(K_{dR}; K_{dG}; K_{dB})$. Lembre que as constantes K (maiúsculo) empregues pelo modelo simplificado são o produto das constantes k (minúsculo) pela cor (O) das superfícies do objeto no modelo de iluminação de **Phong** mais detalhado.

Resposta:

$$I_t = k_a O_a I_a + k_d O_d I_d (N \cdot V)$$

A equação de Phong simplificada fica:

$$K_a = k_a O_a \text{ e } K_d = k_d O_d$$

$$K_a(0; 1; 0) + K_d(1; 1; 1)0.5 = (0.4; 0.8; 0.2)$$

Que nos leva as seguintes equações:

$$K_{aR} * 0 + K_{dR} * 1 * 0.5 = 0.4$$

$$K_{aG} * 1 + K_{dG} * 1 * 0.5 = 0.8$$

$$K_{aB} * 0 + K_{dB} * 1 * 0.5 = 0.2$$

Uma solução possível é $K_a = (0; 0.5; 0)$ e $K_d = (0.8; 0.6; 0.4)$:

Sem assumir a simplificação:

$$(0.4; 0.8; 0.2) = (k_a O_R; k_a O_G; k_a O_B) * (0; 1; 0) + 0.5 * k_d O_R; 0.5 * k_d O_G; 0.5 * k_d O_B * (1; 1; 1)$$

$$(k_a * 0 + k_d * 0.5 * 0.1) * O_R = 0.4$$

$$(k_a * 1 + k_d * 0.5 * 0.1) * O_G = 0.8$$

$$(k_a * 0 + k_d * 0.5 * 0.1) * O_B = 0.2$$

Uma possível solução é:

$$k_a = 0.5; k_d = 1$$

$$O = (0.8; 0.8; 0.4)$$

1.6.19 Numa cena, uma câmara virtual olha uma **superfície plana branca** segundo um ângulo de 45° . Presa à câmara virtual, está colocada uma **fonte pontual de luz amarela RGB (1,1,0)**. A cena é ainda iluminada por uma **luz ambiente verde RGB (0,1,0)**. O material da superfície plana é descrito pelos seguintes termos: $k_a = 0,2$, $k_d = 0,5$, $k_s = 0,7$ e $n = 2$. Considere a superfície “metálica” (a cor da luz refletida especularmente é igual à da fonte de luz). Calcule a cor no ponto para onde a câmara aponta segundo o modelo de Phong.

Resposta:

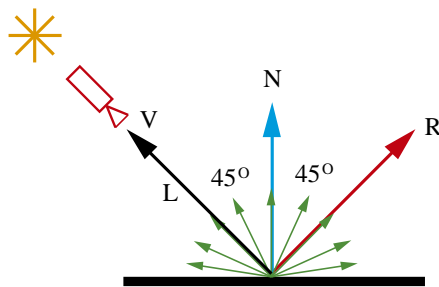


Figura 45: ponto de vista e fontes na mesma direção

$$I_{\text{total}} = k_a O_d I_a + K_d O_d I_d (N \cdot L) + k_s O_s I_s (R \cdot V)^n$$

$$O_d I_a = [1, 1, 1] * [0, 1, 0] = [0, 1, 0]$$

$$O_d I_d = [1, 1, 1] * [1, 1, 0] = [1, 1, 0]$$

$$O_s I_s = [1, 1, 1] * [1, 1, 0] = [1, 1, 0]$$

Lembrando que:

$$N.L = \cos(45) = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$R.V = \cos(90) = 0$$

$$I(R, G, B)_{\text{total}} = 0,2 * [0,1,0] + 0,5 * [1,1,0] * \frac{\sqrt{2}}{2} + 0,7 * [1,1,0] * I_s(0)^2$$

$$I_{\text{total}} = [0,0,2,0] + \left[\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{\sqrt{2}}{4}, 0 \right] + 0$$

$$I_{\text{total}} = \left[\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{4 + 5\sqrt{2}}{20}, 0 \right]$$

$$I(R, G, B)_{\text{total}} = [0.3535, 0.5535, 0]$$

1.6.20 Dado que o modelo de Phong tem um termo responsável pela contribuição da iluminação ambiente, pode-se considerar que é um modelo de iluminação global? Justifique.

Resposta:

Não. O fato de possuir um termos que simula o efeito da iluminação proveniente do resto da cena, é ele próprio prova que o modelo não é global. Se o fosse, o modelo teria de providenciar a forma para calcular essa contribuição, em vez de a estimar e distribuir uniformemente.

1.6.21 Para que seja possível aplicar os algoritmos de sombreado de **Phong** e de **Gouraud** a uma malha poligonal é necessário calcular a normal em cada vértice da malha.

Resposta:

- a) Indique a expressão para calcular a normal N correspondente ao plano definido pelos pontos P_0 , P_1 e P_2 , conforme a figura junta. (Nota: tenha especial atenção à direção da normal)

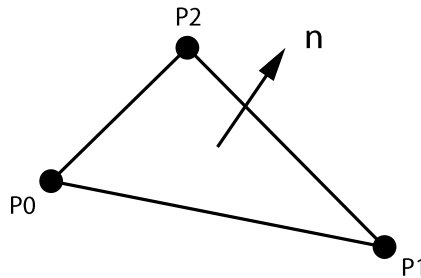


Figura 46: normal ao plano formado por três pontos distintos

$$n = \frac{(P_1 - P_0) \times (P_2 - P_0)}{|(P_1 - P_0) \times (P_2 - P_0)|}$$

- b) Indique um método simples para determinar a normal a um vértice de uma malha poligonal a partir das normais dos polígonos que partilham esse vértice.

A normal em cada vértice é igual a média das normais de todos os polígonos que lhe são adjacentes.

$$n = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6}{|n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6|}$$

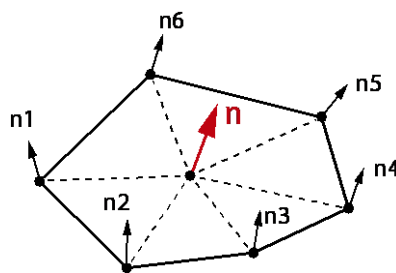


Figura 47: normal em um vértice de uma malha poligonal

1.6.22 Qual é a diferença entre os métodos de sombreamento de Gouraud e Phong?

Resposta:

Os dois métodos de sombreado determinam a cor no interior dos polígonos de uma malha poligonal com base nas normais em cada vértice da malha. No sombreado de **Gouraud**, o modelo de iluminação é aplicado a cada vértice para calcular uma cor, sendo as cores dos pixels restantes, do interior do polígono obtidas através da interpolação linear das cores dos vértices do polígono. O método de **Phong** interpola as normais nos vértices de cada polígono para obter a normal em cada pixel interior ao polígono e, com esta informação, aplica então o modelo de iluminação de **Phong** individualmente a cada quadrícula.

1.6.23 Considere a cena da figura 48, que compreende uma superfície iluminada por uma luz pontual, onde a componente especular da luz é branca, a componente especular do material da superfície é vermelha e o coeficiente de brilho da superfície é 2. Na figura, i representa o raio de luz incidente no ponto P , a normal à superfície neste ponto é n e o vetor V indica a direção ao observador. Os vetores I, N e V existem no mesmo plano. Calcule a intensidade da reflexão especular no ponto P da superfície usando o Modelo de Iluminação de **Phong**. (Sugestão: comece por desenhar o vetor R , correspondente à reflexão do raio de luz incidente, e calcule o ângulo entre R e V).

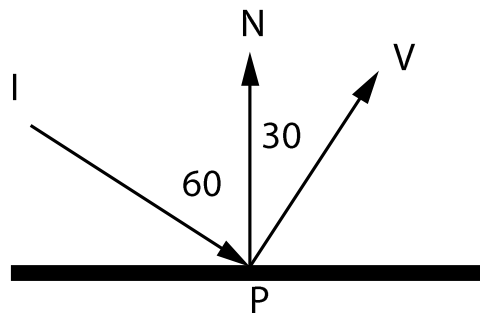


Figura 48: raio de incidência e direção de observação

Resposta:

Se I, n e V existem no mesmo plano, o vetor R de reflexão da luz incidente existirá também no mesmo plano e fará 60° com a normal e, portanto, um ângulo de 30° com V . Por seu lado a luz especular incidente será $L(1; 1; 1)$ e o coeficiente de reflexão especular $R(1; 0; 0)$. A luz especularmente refletida aplicando o modelo de iluminação de PHONG será:

$$LR(V.R)^n = (1; 1; 1)(1; 0; 0)(\cos 30^\circ)^2 = (1; 0; 0) \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 = \left(\frac{3}{4}; 0; 0 \right)$$

1.6.24 Calcule a cor do ponto [6,3] no interior do polígono (figura 49) por meio do método de sombreamento de **Gouraud**. Utilize as seguintes cores para os vértices P1:RGB(1.0; 0.0; 0.8), P2:RGB(0.6; 0.4; 0.8) e P3: RGB(0.2; 0.8; 0.0).

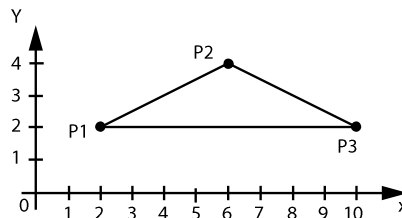


Figura 49: polígono para cálculo de sombreamento

Resposta:

Vamos calcular inicialmente a interpolação entre P1P2 e P3P2:

Entre P1 P2 temos RGB:

$$R_{P1P2} = \frac{(1.0 + 0.6)}{2} = 0.8$$

$$G_{P1P2} = \frac{(0.0 + 0.4)}{2} = 0.2$$

$$B_{P1P2} = \frac{(0.8 + 0.8)}{2} = 0.8$$

Entre P3 P2 temos RGB:

$$R_{P3P2} = \frac{(0.6 + 0.2)}{2} = 0.4$$

$$G_{P3P2} = \frac{(0.4 + 0.8)}{2} = 0.6$$

$$B_{P3P2} = \frac{(0.8 + 0.0)}{2} = 0.4$$

Entre P1P2 e P3P2

$$R_{P1P2-P3P2} = \frac{(0.8 + 0.4)}{2} = 0.6$$

$$G_{P1P2-P3P2} = \frac{(0.2 + 0.6)}{2} = 0.4$$

$$B_{P1P2-P3P2} = \frac{(0.4 + 0.8)}{2} = 0.6$$

Assim, a iluminação no ponto [6,3] corresponde a seguinte cor no sistema RGB (0.6,0.4,0.6).

1.6.25 U mesmo losango encontra-se representado na figura seguinte em duas posições (posição 1 e Posição 2) que diferem entre si por uma rotação de 90°. Os cálculos de iluminação nos vértices (numerados de 1 a 4) produziram as intensidades RGB constantes na tabela abaixo.

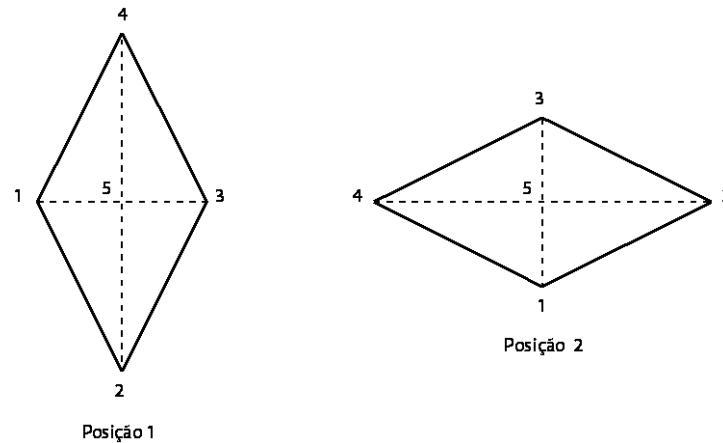


Figura 50: polígono com desenhado em duas direções

Vértices	Intensidade RGB
1	[0.0, 0.4, 0.4]
2	[0.0, 0.2, 0.2]
3	[0.2, 0.6, 0.6]
4	[0.4, 0.4, 0.0]

Qual a cor do ponto 5 em cada um dos losangos quando se emprega o sombreamento constante (flat shading) tendo em conta todos os vértices?

	Posição 1	Posição 2
A	[0.2, 0.3, 0.1]	[0.15, 0.4, 0.3]
B	[0.2, 0.3, 0.1]	[0.1, 0.5, 0.5]
C	[0.1, 0.5, 0.5]	[0.2, 0.3, 0.1]
D	[0.0, 0.4, 0.4]	[0.0, 0.4, 0.4]
E	[0.15, 0.4, 0.3]	[0.15, 0.4, 0.3]

Resposta: E

A cor do ponto 5 será a cor uniforme atribuída ao losango, a média aritmética das intensidades RGB nos vértices e será a mesma nos dois losangos porque possui vértices idênticos, ainda que diferentemente posicionados.

$$I_s = \frac{[0.0; 0.4; 0.4] + [0.0; 0.2; 0.2] + [0.2; 0.6; 0.6] + [0.4; 0.4; 0.0]}{4}$$

$$I_s = [0.15, 0.4, 0.3]$$

Qual a cor do ponto 5 em cada um dos losangos quando se emprega o sombreamento Gouraud:

	Posição 1	Posição 2
A	[0.2, 0.3, 0.1]	[0.15, 0.4, 0.3]
B	[0.2, 0.3, 0.1]	[0.1, 0.5, 0.5]
C	[0.1, 0.5, 0.5]	[0.2, 0.3, 0.1]
D	[0.0, 0.4, 0.4]	[0.0, 0.4, 0.4]
E	[0.15, 0.4, 0.3]	[0.15, 0.4, 0.3]

Resposta C

Basta calcular a média do **scanline**. Para o losango na posição 1, temos:

$$I_s = \frac{I_1 + I_3}{2}$$

$$I_s = \frac{[0.0, 0.4, 0.4] + [0.2, 0.6, 0.6]}{2}$$

$$I_s = [0.1, 0.5, 0.5]$$

Para o losango na posição 2 temos:

$$I_s = \frac{I_4 + I_2}{2}$$

$$I_s = \frac{[0.4, 0.4, 0.0] + [0.0, 0.2, 0.2]}{2}$$

$$I_s = [0.2, 0.3, 0.1]$$

Para que o ponto 5 apresente a intensidade [0.6; 0.8; 0.8] no losango a esquerda é necessário calcular a sua cor:

A : empregando o sombreamento **Gouraud**.

B: empregando o modelo de iluminação de **Phong**.

C: empregando o modelo de sombreamento de **Phong**.

D: o ponto 5 nunca poderá ter esta cor.

E: empregando o modelo de iluminação de **Gouraud**.

Resposta C

1.6.26 Explique porque a energia irradiada por uma fonte de luz sofre uma atenuação a medida que se afasta de seu ponto de origem.

Atenuação atmosférica reduz a energia luminosa a medida que se afasta da fonte numa proporção inversa do quadrado da distância da fonte luminosa $\frac{1}{d^2}$. Esta proporção é utilizada nos modelos de iluminação na computação gráfica ? Explique.

Resposta:

Para produzir efeitos mais realísticos com fontes pontuais usamos:

$$f_{\text{atenuação}} = \frac{1}{a_0 + a_1 d_l + a_2 d_l^2}$$

Este modelo pode ser usado quando a fonte de luz está no infinito?

Como resolver este problema?

Resposta:

$$f_{\text{atenuação}} = \begin{cases} 1 & \text{se a fonte estiver no infinito} \\ \frac{1}{a_0 + a_1 d_l + a_2 d_l^2} & \end{cases}$$

1.6.27 Qual a diferença de um modelo de iluminação em relação a um modelo de sombreamento no contexto da computação gráfica?

Resposta:

Os modelos de iluminação calculam a intensidade de energia luminosa que chega a um determinado ponto de uma dada superfície. Os modelos de sombreamento calculam a intensidade de energia luminosa em toda a superfície especificada.

1.6.28 Qual o efeito da reflexão difusa em superfícies irregulares?

Resposta:

Superfícies irregulares tendem a refletir a luz em todas as direções parecendo igualmente brilhantes a partir de qualquer ponto de vista.

1.6.29 Qual a influência da reflexão difusa nas cores dos objetos quando a luz é branca?

Resposta:

A cor de um objeto é a cor da reflexão difusa com uma iluminação de luz branca. Objetos azuis refletem a componente azul da luz branca. Um objeto azul sobre luz vermelha ficará preto, pois toda luz é absorvida.

1.6.30 Qual o efeito da luz sobre materiais polidos considerados brilhantes.

Resposta:

Alguma parte da luz refletida é concentrada em uma região mais brilhante. O efeito de realce é mais pronunciado em superfícies de materiais brilhantes

1.6.31 Considere a figura 52. Calcule utilizando o método de iluminação de PHONG a energia luminosa refletida. Considere a posição da fonte da luz pontual amarela com coordenadas de (-50,30), o Ponto P(0,0) e os seguintes coeficientes de reflexão da superfície do material: $k_a = 0.4$, $k_d = 0.5$, $k_s = 0.3$, $n = 3$. Considere a direção de observação $V = 3\vec{i} + 2\vec{j}$.

Resposta:

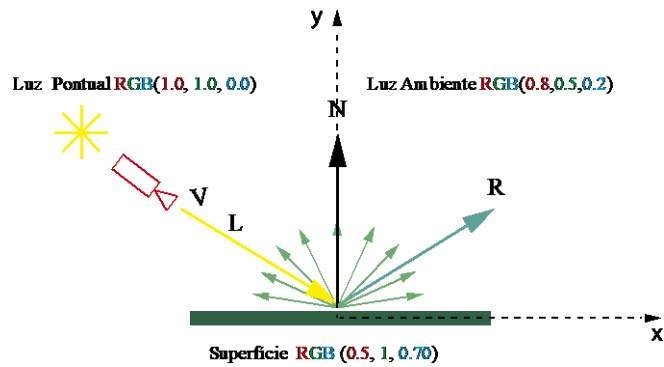


Figura 52: esquema ilustrativo para o problema 1.6.31

Dados da luz pontual:

Posição: $P_L(-50,30)$

Cor:

$$I_{iR} = 1.0$$

$$I_{iG} = 1.0$$

$$I_{iB} = 0.0$$

Dados da luz ambiente:

$$I_{aR} = 0.8$$

$$I_{aG} = 0.5$$

$$I_{aB} = 0.2$$

Dados do objeto:

Cor:

$$O_{dR} = 0.5$$

$$O_{dG} = 1.0$$

$$O_{dB} = 0.7$$

Ponto de incidência:

$$P(0,0)$$

Coefficientes de reflexão:

$$k_a = 0.40$$

$$k_d = 0.50$$

$$k_s = 0.30$$

Índice de brilho:

$$n = 3$$

Normal à superfície:

$$N = \vec{j}$$

Dados do observador:

$$\text{Direção de observação: } V = 3.0 \vec{i} + 2.0 \vec{j}$$

$$\text{Posição do observador: } \infty$$

Aplicando a equação de PHONG:

Cálculo do produto interno $N.L$:

$$N = \vec{j}$$

$$\frac{N}{|N|} = \frac{\vec{j}}{\sqrt{1^2}} = \vec{j}$$

$$\frac{N}{|N|} = \vec{j}$$

$$L = -50\vec{i} + 30\vec{j}$$

$$L = -5\vec{i} + 3\vec{j}$$

$$|L| = \sqrt{-5^2 + 3^2} = 5.8309$$

$$\frac{L}{|L|} = \frac{-5\vec{i} + 3\vec{j}}{\sqrt{-5^2 + 3^2}} = -0.8575 \vec{i} + 0.5145 \vec{j}$$

$$\frac{L}{|L|} = -0.8575 \vec{i} + 0.5145 \vec{j}$$

$$N.L = 0.5145$$

A reflexão especular ideal é dada por:

$$\begin{aligned}R &= 2(N.L)N - L \\R &= 2(0.5145)\vec{j} - (-0.8575\vec{i} + 0.5145\vec{j}) \\R &= 0.8575\vec{i} + 0.514\vec{j}\end{aligned}$$

Cálculo de $R.V$:

$$|V| = \sqrt{3^2 + 2^2} = 3.605$$

$$\frac{V}{|V|} = \frac{3\vec{i} + 2\vec{j}}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = 0.832\vec{i} + 0.555\vec{j}$$

$$V.R = 0.99887$$

Cálculo de d (distancia entre P_L e P :

$$d = \sqrt{(-50 - 0)^2 + (30 - 0)^2} = 58.30851$$

Cálculo das cores:

$$\begin{aligned}I_R &= I_{aR}k_aO_{dR} + \frac{I_{iR}}{d+k} [k_dO_{dR}(N.L) + k_sO_{sR}(V.R)^n] \\I_R &= 0.8 * 0.4 * 0.5 + \frac{1.0}{(58.31 + 1)} [0.5 * 0.5 * 0.514 + 0.3 * 0.5 * 0.99887^3] \\I_R &= 0.16469\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_G &= I_{aG}k_aO_{dG} + \frac{I_{iG}}{d+k} [k_dO_{dG}(N.L) + k_sO_{sG}(V.R)^n] \\I_G &= 0.5 * 0.4 * 1 + \frac{1.0}{(58.31 + 1)} [0.5 * 1 * 0.514 + 0.3 * 1 * 0.99887^3] \\I_G &= 0.20938\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}I_B &= I_{aB}k_aO_{dB} + \frac{I_{iB}}{d+k} [k_dO_{dB}(N.L) + k_sO_{sB}(V.R)^n] \\I_B &= 0.2 * 0.4 * 0.7 + \frac{0.0}{(58.31 + 1)} [0.5 * 0.7 * 0.514 + 0.30 * 0.7 * 0.99887^3] \\I_B &= 0.056\end{aligned}$$

Cor final **Phong**:

$$(I_R = 0.16469, I_G = 0.20938, I_B = 0.056)$$

Ou

$$RGB_{256} = (42, 53, 14)$$

1.6.32 O que pode acontecer a energia luminosa quando incide sobre uma determinada superfície de um objeto?

Resposta

A energia luminosa quando incide sobre a superfície de um objeto pode se:

- Refletida difusamente ou especularmente;
- Refletida difusa e especulamente;
- Absorvida
- Transmitida de forma translúcida ou transparente
- Combinação de reflexão, absorção e transmissão.

1.6.33 Do que depende a aparência dos objetos no contexto dos modelos de iluminação?

Resposta

- propriedades da fonte de luz:
 - cor, distância entre a fonte de luz e o objeto;
 - direção definida pela fonte de luz e pelo objeto;
 - intensidade da fonte de luz;
- características da superfície do objeto:
 - cor;
 - propriedades de reflexão;
- localização do observador.

1.6.34 Quais os fenômenos ópticos considerados nos modelos de Iluminação local e Global?

Resposta

- Iluminação Direta ou Local
 - Tipos de luz
 - Fontes de luz (emissão)
 - Materiais da superfície dos objetos (reflexão)

- Iluminação Indireta ou Global
 - Sombras
 - Refrações
 - Reflexões entre Objetos

1.6.35 Quais os tipos de luz contemplados nos modelos de iluminação local?

Resposta

- **Luz ambiente:**
 - vem de todas as direções; quando atinge a superfície, espalha-se igualmente em todas as direções;
 - Consequencia do espalhamento uniforme da Luz: não depende do ponto de vista do observador;
- **Luz difusa:**
 - vem de uma direção: quando atinge a superfície, espalha-se igualmente em todas as direções ;
 - Consequência do espalhamento da luz: não depende do ponto de vista do observador;
- **Luz especular:**
 - vem de uma direção: tende a refletir na superfície numa direção preferencial;
 - Consequencia do espalhamento da luz: depnde do ponto de vista do observador.

1.6.36 Como são especificados nos modelos de iluminação a fontes de luz e material?

Resposta:

- **Fontes de Luz:**
 - **Tipos:** ambiente, posicional, direcional e cônica;
 - **Cor:** a cor de luz emitida é dada pelas quantidades de luz vermelha, verde e azul;
 - **Número:** cada fonte de luz pode ser ligada ou desligada;
 - **Tipos de luz emitida:** ambiente, difusa e especular.

- **Material da superfície:**

- Especifica como a luz é refletida e absorvida:

- ✓ A cor do material é dada pela porcentagem das componentes vermelha, verde e azul que são refletidas em várias direções;
 - ✓ Superfícies diferentes têm propriedades diferentes; algumas são brilhantes, pelo que refletem preferencialmente a luz em certas direções, ao passo que outras espalham igualmente a luz em todas as direções. A maior parte das superfícies situa-se entre os dois extremos anteriores;

- Tipo de luz

- ✓ emitida;
 - ✓ refletida: ambiente difuso e especular

1.6.37 Quais componentes integram a modelação de uma fonte de luz?

Resposta:

Um modelo de fonte de luz $I_L(P, \vec{D}, \lambda)$:

- descreve a intensidade de energia I_L ,
- que sai da fonte de luz
- e que chega à posição $P(x, y, z)$
- vinda da direção D (vetor normalizado \vec{D})
- com comprimento de onda λ

1.6.38 Quais os tipos de fontes de luz?

Resposta:

- ambiente;
- pontual;
- direcional;
- cônica

1.6.39 Um objeto que não esteja diretamente iluminado por uma fonte de luz pode ainda ser visível? Explique como isto pode ocorrer em um modelos de iluminação local e num modelo de iluminação Global.

Resposta:

Sim, nos modelos de iluminação local pela adoção de uma luz ambiente que chega de forma constante e uniforme em todas as superfícies.

Em um modelo de iluminação global por causa da luz refletida a partir de outras superfícies.

1.6.40 Como pode ser modelada uma fonte de luz direcional?

Resposta:

Isto é possível considerando-se uma luz pontual no infinito. Por exemplo o sol. Esta luz pode ser definida em termos de componentes RGB e pela direção. A direção é importante porque permite calcular a luz reletida e a intensidade de luz que che a um determinado ponto P da superfície do objeto. $I_L = I(P, \vec{D}, \lambda)$:

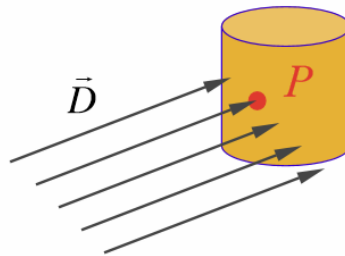


Figura 53: luz direcional

1.6.41 Como pode ser modelada uma fonte de luz pontual?

Resposta:

Isto pode ser feito considerando a luz emitida de forma radial a partir de um ponto, em todas as direções (fonte omni-direcional):

- Definida pelas intensidades de luz RGB emitidas de todos os tipos
- Pela posição $L(x, y, z)$, e

- Pelos fatores (k_c, k_l, k_a) de atenuação com a distância $P(x, y, z)$

$$I(P, L, k_c, k_l, k_q, I_L) = \frac{I_L}{k_c + k_l d + k_q d^2}$$

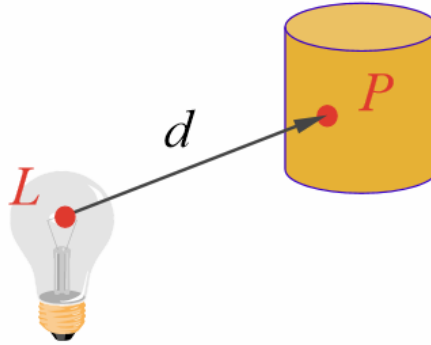


Figura 54: luz pontual

1.6.42 Como pode ser modelada uma fonte de luz cônica?

Resposta:

Luz emitida em um cone:

- Definida pelas intensidades de luz RGB emitidas de todos os tipos
- Pela posição $L(x, y, z)$, e direção \vec{D} ;
- Pelos fatores de atenuação constante, linear e quadrática (k_c, k_l, k_a)
- Intensidade de luz de holofote I_L que chega a $P(x, y, z)$

$$I(P, L, k_c, k_l, k_q, I_L) = \frac{I_L(\vec{D} \cdot \vec{L})}{k_c + k_l d + k_q d^2}$$

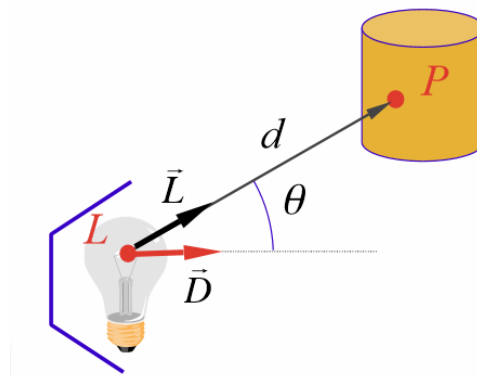


Figura 55: luz cônica

1.6.43 Comente a relação de dependência entre métodos de iluminação e as seguintes variáveis: normais, ângulo entre normal e superfície, vetor de direção da fonte de luz, fonte de luz e ponto de vista.

Resposta:

- Luz Ambiente: normais a superfície não são importantes;
- Lambert/Difusa: ângulo entre a normal à superfície e o vetor diretor da fonte de luz;
- Phong/Especular: normal a superfície, fonte de luz e ponto de vista (observador).

1.6.44 Quais as Vantagens e Desvantagens do métodos de sombreado direto?

Resposta:

- Impreciso
- Descontinuidades nas fronteiras dos polígonos

1.6.45 A coloração constante será realística para objetos facetados?

Resposta: NÃO

- Para fontes de luz pontuais, a direção á fonte de luz varia para cada ponto da faceta;
- No caso da reflexão espular a direção ao observador varia par cada ponto da faceta.

1.6.46 Descreva a influência do Mach Banding na percepção de objetos facetados.

Resposta:

O efeito Mach Banding traz as seguintes características a aparência de objetos facetados:

- Artificial nas discontinuidades da intensidade da luz;
- O efeito de mach banding descreve como a mente humana aumenta o contraste subconscientemente entre duas superfícies com luminâncias diferentes.
- A diferença entre duas cores é mais pronunciada quando elas estão lado-a-lado e a fronteira é suave.
- Isto realça as fronteiras entre cores, mesmo se a diferença de cor é pequena;
- Fronteiras grosseiras são ponderadas pelo nosso sistema de visão de forma a fornecer uma variação suave.



Figura 55: efeito de Mach Band

1.6.47 Indique possíveis problemas que ocorrem nos métodos interpolados de sombreamento.

Resposta:

- Silhuetas poligonais continuam presentes

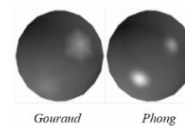


Figura 56: silhuetas poligonais

- Distorção em perspectiva

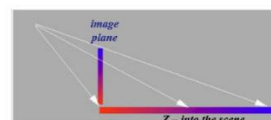


Figura 57: distorção

- Interpolação dependente da orientação de polígonos partilhados;

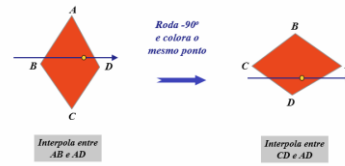


Figura 58: efeito da orientação na interpolação

- Problemas nos vértices partilhados

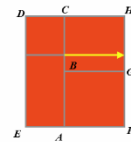


Figura 59: vértices partilhados

- Má média dos vértices.

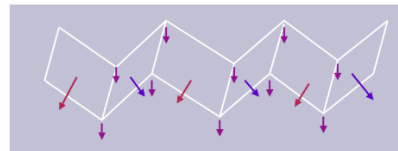


Figura 60: alisamento irreal da superfície

1.6.48 mostre porque a reflexão difusão é igual a intensidade de energia luminosa multiplicada pelo cosseno do ângulo formado pela direção da luz e o vetor normal (lei de Lambert).

Resposta:

- Na **reflexão difusa** considera-se que a luz incidente é espalhada com igual intensidade em todas as direções, independentemente da direção de visão;
- As superfícies com estas características chamam-se **refletores Lambertianos** ou **refletores difusos ideais**;
- Esta reflexão pode ser calculada pela **Lei de Lamber**:

$$Intensidade = \frac{\text{energia radiante por unidade de tempo}}{\text{área projetada}}$$

$$\propto = \frac{\cos(\phi_N)}{dA \cos(\phi) N} = \text{constante}$$

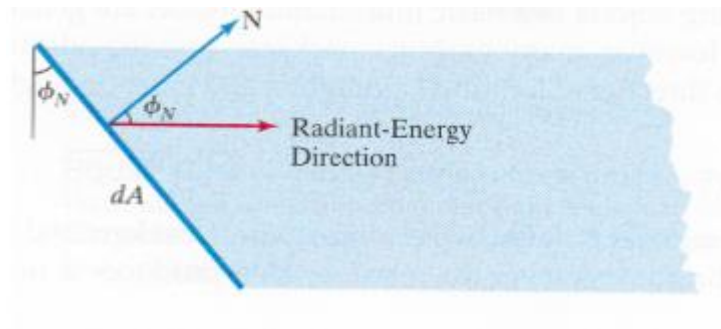


Figura 61: influência do ângulo de incidência na reflexão difusa

- Em geral inclui-se pelo menos **uma fonte de luz** (frequentemente no ponto de vista);

- Neste caso, a quantidade de luz incidente depende da **orientação da superfície** em relação a **direção da fonte luminosa**;

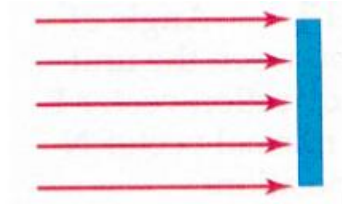


Figura 62: incidência perpendicular da luz

- Uma superfície que é perpendicular a direção da luz, é mais iluminada que uma superfície com igual área, porém oblíqua;

- Este efeito pode ser observado variando a orientação de uma folha de papel branco em relação a direção da luz.

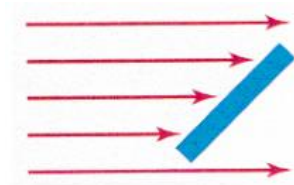


Figura 63: incidência oblíqua da luz

1.6.49 Qual a diferença entre modelos de reflexão e modelos de iluminação?

Resposta:

- **Modelo de reflexão:** descreve a forma como a luz interage com a superfície dos objetos, função das propriedades dessas superfícies e da natureza da luz incidente.
- **Modelo de iluminação:** descreve a natureza e a distribuição de intensidade da luz emanada pelas fontes luminosas presentes na cena que se pretende representar.
- Definidos estes modelos e conhecidas as posições e orientações relativas dos objetos e das fontes de luz, é possível proceder ao cálculo de sombreamento das superfícies desses objetos - **shading**.

1.6.50 O que é o efeito Mach Banding?

Resposta:

As bandas de Mach são ilusões de óptica observadas numa imagem com diferentes tons de cinza o olho humano percebe duas estreitas listras de diferente gradiente de luminosidade em cada fronteira, que não estão presentes na imagem verdadeira, e que aumentam o contraste entre as áreas. O nome desta ilusão faz referência a **Ernest Mach**



Figura 64: efeito Mach Bandi

1.6.51 o que ocorre com brilho em superfícies conhecidas com Lambertianas?

Resposta:

Superfícies Lambertianas apresentam brilho uniforme, sem reflexão especular, em todos os ângulos de observação de sua superfície. A variação de intensidade de luz refletida é proporcional ao co-seno do ângulo de incidência da luz na superfície.

Referências

FERGUSON, Robert S. **Practical algorithms for 3D computer graphics**. Natick, MA: A. K. Peters Ltd., 2001.

FOLEY, James D.; et al. **Computer Graphics: principles and practice**. Low Price Edition. Delhi: Pearson Education, 1996.

HEARN, Donald; KAKER, Pauline M. **Computer graphics: c version**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

McCONNELL, Jeffrey J. **Computer graphics: theory into practice**. Massachusetts: Jones and Bartlett Publishers, 2006.

ROGERS, David F., **Procedural elements for computer graphics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1985.

Watt, Alan. **3D computer graphics**. Rio de Janeiro: Addison Wesley, 1993.