

# 1 Iluminação e Sombreamento

## 1.1 Introdução

Para ser possível obter a imagem de uma cena esta terá que ser **iluminada** por uma ou mais fontes de luz e têm que ser definidas as propriedades de interacção entre os objectos que existem na cena e a energia luminosa que incide em cada um deles.

O cálculo da imagem corresponde ao cálculo da intensidade da energia luminosa, percepção como cor, que chega a cada ponto da superfície de visualização proveniente directamente das fontes de luz ou indirectamente por fenómenos de reflexão e refracção.

O processo de **sombreamento**, consiste no cálculo da cor de cada uma das quadrículas que foram identificadas no processo de rasterização dos elementos da cena.

Em Computação Gráfica existem duas abordagens ao cálculo de uma imagem. Quando se consideram unicamente as contribuições da energia que é emitida pelas fontes de luz e reflectida por uma única superfície designa-se por **Modelos de Iluminação Local**. Estes modelos empíricos, apesar de requererem um esforço computacional baixo, conduzem a imagens com uma qualidade aceitável para muitas aplicações.

Nos **Modelos de Iluminação Global** é considerada também a iluminação que é reflectida ou refractada por outras superfícies. Estes modelos são fisicamente mais correctos e produzem imagens com maior grau de realismo, mas requerem um esforço computacional elevado. Os modelos de iluminação global são usados por vários métodos de cálculo de imagens entre os quais se destacam os métodos de Ray Tracing e da Radiosidade, os quais serão tratados em posteriores capítulos.

Como os Modelos de Iluminação Local não contemplam a interacção energética entre diferentes superfícies, fenómenos como o cálculo de sombras, a reflexão da energia noutras objectos, a refracção e as interacções da energia luminosa com os meios em que é transmitida (água, ar, etc.) não são suportados.

Neste capítulo será descrito o **modelo de iluminação local de Phong** e serão descritos vários métodos que permitem que, à medida que é realizado o processo de rasterização, seja também realizado o processo de **sombreamento**. Os métodos de sombreamento que serão apresentados neste capítulo são o método de sombreamento **Constante**, o método de **Gouraud** e o método de **Phong**.

## Objectivos

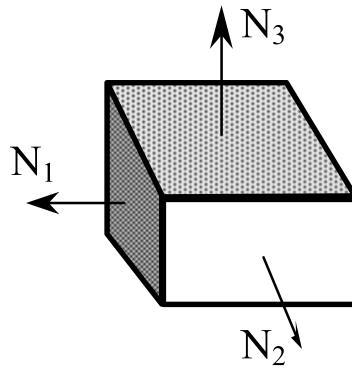
- Conhecer os conceitos de iluminação e sombreamento.
- Identificar e saber usar os parâmetros do modelo de iluminação de Phong.
- Identificar as características de cada método de sombreamento, Constante, Gouraud e Phong.

## 1.2 Modelo de Iluminação Local de Phong

Os modelos de iluminação local, também designados por modelos de reflexão local, uma vez que só contemplam esse tipo de interacção, permitem o cálculo da intensidade de energia luminosa que é reflectida por cada elemento da superfície de um objecto.

No pipeline de visualização assume-se que já foi efectuada a rasterização da superfície pelo que os elementos referidos são as quadrículas que vão ser ocupadas pela imagem do objecto.

Assume-se que cada objecto é modelado através de um conjunto de superfícies. Se as superfícies forem planares, isto é, se forem facetas, existirá uma normal para cada superfície, como pode observar-se na figura 1.1.

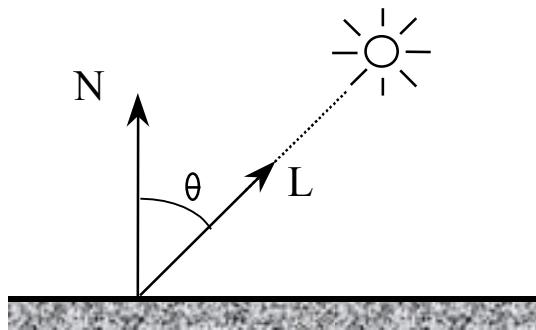


**Figura 1.1 - Normais às superfícies de um objecto.**

Se as superfícies não forem planares é necessário calcular a normal em cada ponto da superfície.

O Modelo de Iluminação de Phong, introduzido em 1975, permite calcular o valor da intensidade de um raio reflectido por uma superfície em função da orientação da superfície, da posição da câmara, da posição da fonte de luz e das propriedades da superfície. A figura 1.2 mostra a relação entre a orientação de uma faceta e a posição de uma fonte de luz pontual

O modelo de iluminação de Phong considera que os materiais, quanto ao modo como reflectem a energia luminosa, são uma combinação linear de um material que reflecte toda a energia numa única direcção, **reflexão especular** e de um material que reflecte toda a energia luminosa de igual modo em todas as direcções, **reflexão difusa** ou Lambertiana.



**Figura 1.2 - Orientação de uma superfície (N) e posição de uma fonte de luz (L).**

O modelo considera ainda a existência de uma componente de Luz Ambiente a qual simula a existência de iluminação global, isto é, de energia luminosa que é reflectida por todas as restantes superfícies presentes numa cena e que ilumina a superfície.

Esta componente é necessária uma vez que podem existir superfícies que são visíveis mas que não são directamente iluminadas por uma fonte de luz, as quais, caso a componente de Luz Ambiente não existisse, não seriam desenhadas.

Assim o Modelo Phong considera que a reflexão da energia luminosa por uma superfície corresponde à combinação linear de três componentes:

- Luz Ambiente
- Reflexão Especular
- Reflexão Difusa

O modelo de Phong é um modelo empírico cuja simplicidade computacional e a qualidade dos resultados a que conduz tem estado na origem da sua popularidade, em particular nas aplicações que impõem tempos de cálculo muito pequenos, como acontece com os jogos de computador.

### 1.2.1 Luz Ambiente

O modelo de Phong assume que as únicas superfícies que vão estar visíveis são aquelas que são directamente iluminadas por fontes de luz. Por esse facto se uma superfície, mesmo que visível, não estiver directamente iluminada por um raio de luz, não será desenhada.

Para resolver esse problema modelo assume que todas as superfícies da cena vão ser iluminadas por uma fonte de luz ambiente, com intensidade,  $I_a$ , de valor constante, a qual resulta de múltiplas reflexões da luz nas superfícies da cena.

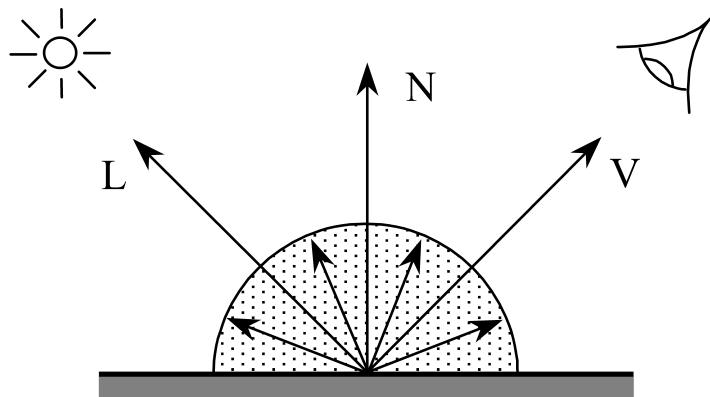
O modo como cada superfície reflecte a luz ambiente depende do valor do coeficiente de reflexão ambiente  $k_a$  do material o qual pode ter valores entre 0 e 1.

$$I = k_a I_a \quad (1-1)$$

## 1.2.2 Reflexão Difusa

Quando a superfície do material apresenta uma estrutura muito irregular, o que acontece, por exemplo, com os materiais plásticos, a energia é reflectida em todas as direcções de igual modo.

Na reflexão difusa a energia luminosa é reflectida com igual intensidade em todas as direcções, segundo uma semiesfera, e o seu valor depende unicamente do ângulo de entre o raio incidente e a normal à superfície do objecto (ver figura 1.3).



**Figura 1.3 - Superfície reflectora difusa.**

A componente difusa tem a seguinte expressão

$$I_d = k_d I_i \cos \theta \quad (1-2)$$

em que  $I_i$  é a intensidade do raio incidente, proveniente da fonte de luz e  $\theta$  é o ângulo entre o vector unitário normal à superfície,  $N$ , no ponto de incidência, e o vector unitário da Fonte de Luz,  $L$ .

O modo como cada superfície reflecte a luz difusa depende do valor do coeficiente de reflexão difusa  $k_d$  do material, o qual pode ter valores entre 0 e 1.

Utilizando a notação vectorial, teremos:

$$I_d = k_d I_i (N \cdot L) \quad (1-3)$$

Como pode concluir-se a intensidade da energia luminosa reflectida não depende da posição do observador.

### 1.2.3 Fontes de Luz e Materiais Cromáticos

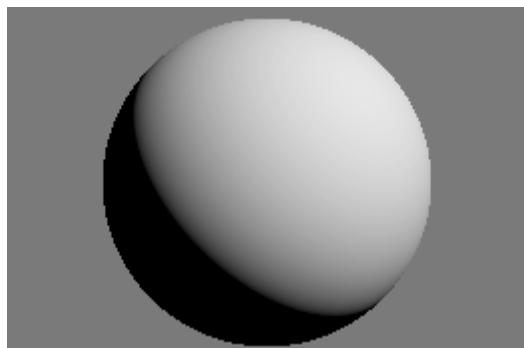
Até agora não foram tidas em conta as características da fonte de luz em função do comprimento de onda.

Ora em modelos de cor, como o modelo RGB, o modelo de cor mais comumente empregue em Computação Gráfica, há que considerar três componentes cromáticas. Assim seja  $O_{dR}$ ,  $O_{dG}$ ,  $O_{dB}$  o modo como um material reflecte a componente difusa, isto é a cor do material.

Assim, obtemos as seguintes expressões em função dos valores das componentes R, G e B da luz

$$\begin{aligned} I_R &= k_a O_{dR} I_{aR} + k_d O_{dR} I_{iR} (N \bullet L) \\ I_G &= k_a O_{dG} I_{aG} + k_d O_{dG} I_{iG} (N \bullet L) \\ I_B &= k_a O_{dB} I_{aB} + k_d O_{dB} I_{iB} (N \bullet L) \end{aligned} \quad (1-4)$$

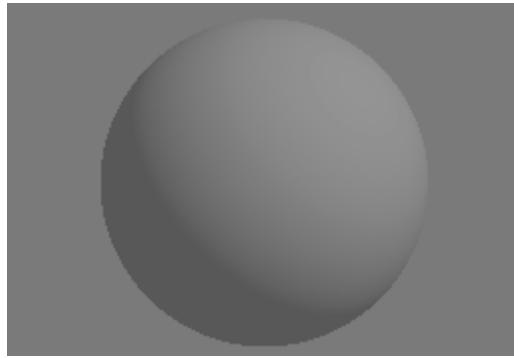
Notar que é utilizada um único coeficiente difuso para as 3 componentes de cor do material. Assim assume-se que  $k_d O_{dR}$  caracteriza completamente o modo como o material reflecte, de modo difuso, a cor vermelha.



**Figura 1.4 - Superfície reflectora difusa ( $k_d O_d = 0.8$ )**



**Figura 1.5 - Superfície reflectora difusa ( $k_d O_d = 0.2$ )**



**Figura 1.6 - Superfície reflectora difusa ( $k_dO_d=0.2$ ) com luz ambiente ( $k_dO_d=0.5$ )**

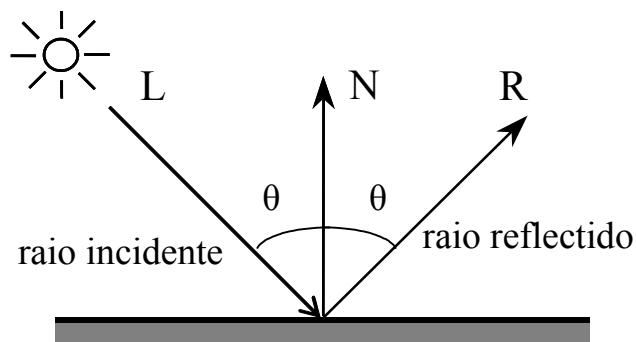
#### 1.2.4 Reflexão Especular

Na natureza existem materiais cujas superfícies são lisas, como cristais e metais nobres, que apresentam um comportamento especular quase perfeito quando interagem com a energia luminosa.

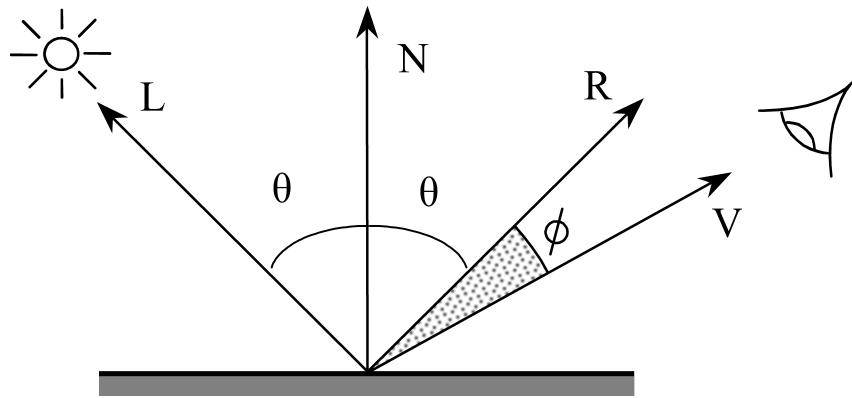
Na **reflexão especular**, observável nesse tipo de materiais e ilustrada na figura 1.7, as propriedades do material são tais que toda a energia que incide num ponto segundo uma dada direcção fazendo um ângulo com a normal à superfície, é reflectida segundo o mesmo ângulo. Sendo  $\theta$  o ângulo entre o vector unitário normal à superfície, N, no ponto de incidência e o vector unitário da Fonte de Luz, L.

No entanto, a existência de superfícies especulares perfeitas é uma aproximação muito limitativa da realidade. Se fosse unicamente usado este tipo de comportamento, só seria possível visualizar a superfície se o raio reflectido coincidisse com a direcção de visão (que une o ponto de incidência com o ponto de vista).

Para ultrapassar este problema considera-se a existência de superfícies reflectoras especulares imperfeitas, onde a reflexão se verifica dentro de um ângulo sólido em torno de raio reflectido. Deste modo, é possível obter o que se designa por brilho quando se observa o objecto segundo um ponto de vista próximo do raio reflectido.



**Figura 1.7 - Superfície reflectora especular perfeita.**



**Figura 1.8 - Superfície reflectora especular imperfeita.**

A fórmula que permite contabilizar a existência de superfícies reflectoras especulares imperfeitas, será:

$$I_s = I_i k_s O_s \cos^n \phi \quad (1-5)$$

Em que, como pode observar-se na figura 1.8,

- $\phi$  é o ângulo entre o vector unitário do observador,  $V$ , e o vector unitário de reflexão perfeita,  $R$ .
- $n$  é o índice de brilho que simula a existência de superfícies especulares imperfeitas.
- $k_s O_s$  define o modo como o material reflecte, de modo especular, a energia luminosa.

O valor de  $n$  varia de 1, em que se obtém uma transição suave na área de brilho, e algumas centenas. Quando  $n \rightarrow \infty$ , teremos uma superfície especular perfeita.

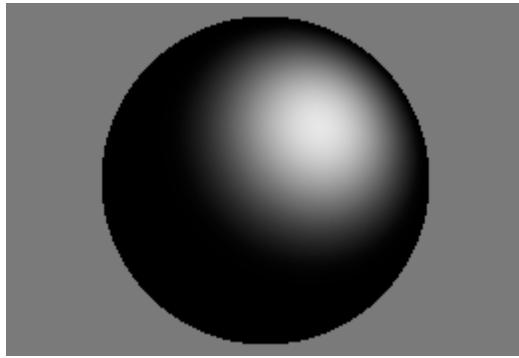
Como os vectores  $V$  e  $R$  são unitários teremos então:

$$\cos \phi = R \cdot V \quad (1-6)$$

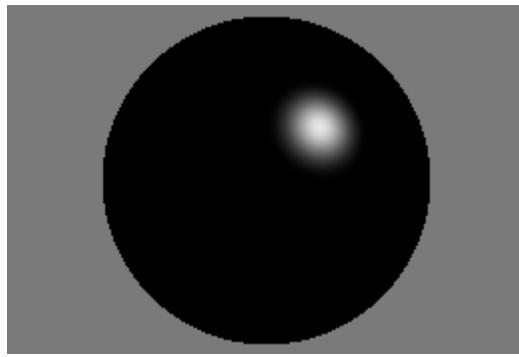
Usando novamente uma notação vectorial, teremos

$$I_s = I_i k_s O_s (R \cdot V)^n \quad (1-7)$$

Na figura seguinte, uma vez que o coeficiente de brilho é baixo a área de brilho é grande. A área diminui à medida que o valor do coeficiente aumenta.



**Figura 1.9 - Superfície reflectora especular ( $k_s O_s=0.8$ ) e brilho=1.2**



**Figura 1.10 - Superfície reflectora especular ( $k_s O_s=0.8$ ) e brilho=128**

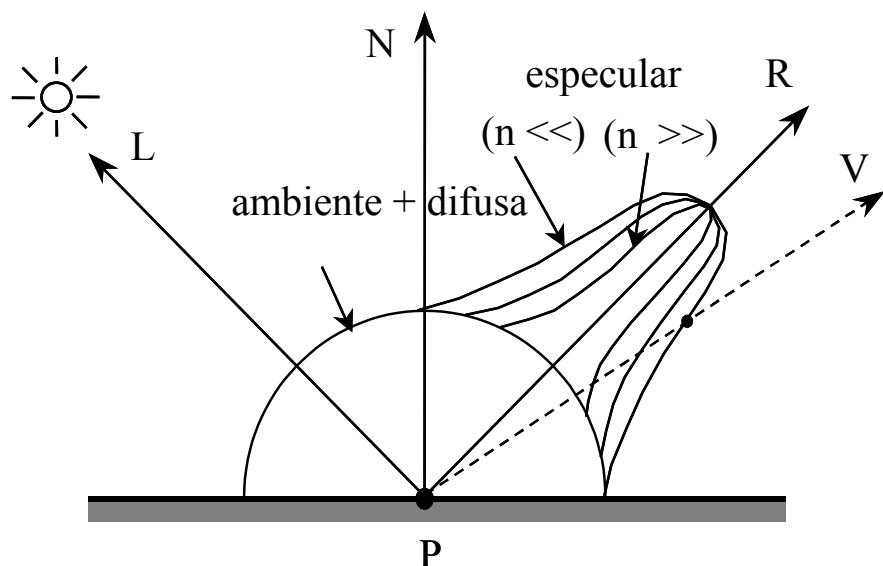
Assumindo que a esfera foi modelada através de uma malha de facetas, designam-se por facetas de brilho aquelas em que se observa a reflexão especular, como pode observar-se na figura anterior.

### 1.2.5 Expressão Global

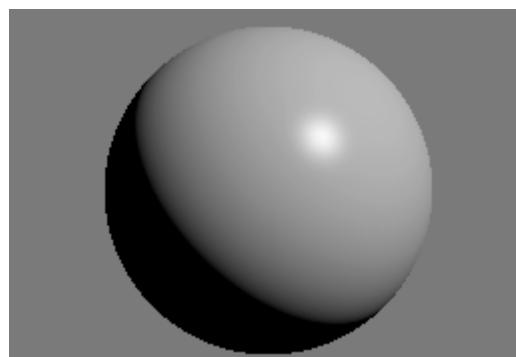
Combinando todas as componentes descritas obtém-se a expressão global do modelo de reflexão de Phong:

$$I = I_a k_a O_d + I_i [k_d O_d (N \bullet L) + k_s O_s (R \bullet V)^n] \quad (1-8)$$

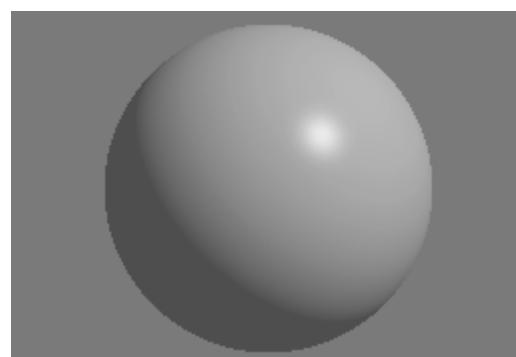
Na figura 1.11 apresenta-se um exemplo do modo como uma superfície plana reflecte a energia luminosa que incide num ponto P.



**Figura 1.11 – Modelo de reflexão de Phong: reflexão difusa e reflexão especular imperfeita.**



**Figura 1.12 - Superfície reflectora especular ( $k_s O_s=0.5$ , brilho=128) e difusa ( $k_d O_s=0.5$ )**



**Figura 1.13 - Superfície reflectora especular ( $k_s O_s=0.4$ , brilho=128), difusa ( $k_d O_s=0.4$ ) e ambiente ( $k_a O_a=0.2$ )**

A expressão global tem vindo a ser melhorada quer de modo a permitir um aumento do desempenho da sua utilização quer uma melhoria da qualidade da imagem. A título ilustrativo, optou-se por escolher um exemplo de cada uma dessas melhorias, respectivamente a aproximação de Blinn que permite aumentar o desempenho e a introdução de atenuação atmosférica.

### Aproximação de Blinn

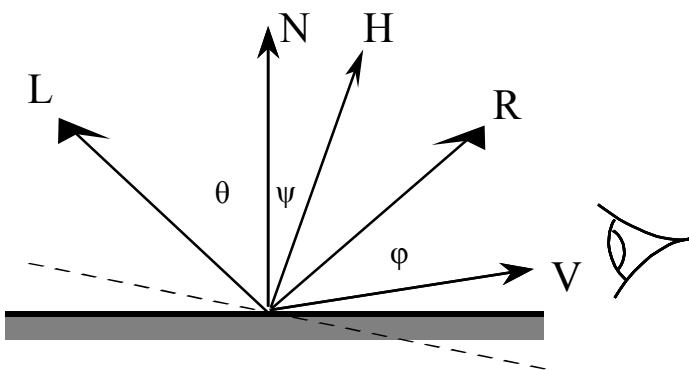
Quando se calcula a reflexão especular é necessário calcular o vector  $R$ , para todos os pontos de uma superfície. Para evitar esses cálculos pode efectuar-se a aproximação de Blinn ou do *Halfway Vector*, a qual corresponde ao cálculo do vector intermédio entre o vector unitário da Fonte de Luz,  $L$  e o vector do Observador,  $V$ , isto é:

$$H = \frac{L + V}{|L + V|} \quad (1-9)$$

Como o cálculo do vector  $R$  tem um custo elevado considera-se um segundo vector unitário,  $H$ , que corresponde à normal no mesmo ponto de uma superfície orientada segundo a bissectriz dos vectores  $L$  e  $V$ , isto é (veja-se a figura 1-12)

$$H = (L + V)/2 \quad (1-10)$$

Como pode observar-se na figura seguinte.



**Figura 1.14 - Aproximação de Blinn**

A substituição de  $(R \cdot V)$  por  $(N \cdot H)$  significa que a superfície é rodada de modo a ser perpendicular ao vector  $H$ .

Como todos os vectores se encontram no mesmo plano verifica-se que o ângulo  $\theta = 2\psi$ .

Se usarmos o mesmo expoente  $n$  em  $(N \bullet H)^n$  que foi usado em  $(R \bullet V)^n$  então a área de brilho será mais pequena. Este problema pode ser minorado através da utilização de um valor de  $n'$  tal que os dois resultados sejam aproximados.

Com estas aproximações o Modelo de Reflexão de Phong terá a seguinte expressão

$$I_s = I_i k_s (N \bullet H)^{n'} \quad (1-11)$$

resultando que  $I$  passa a depender só de  $N$ .

### Atenuação Atmosférica

Para melhorar o realismo da imagem devia ser possível considerar a absorção da energia luminosa pelo meio de transmissão que é usado no percurso entre efectuado entre o objecto e o ponto de vista. Este efeito, designado por *Depth Cueing*, permite representar com menor intensidade luminosa os objectos que se encontram mais afastados do ponto de vista.

No modelo de reflexão de Phong tal efeito de atenuação é obtido através da dependência da distância entre o objecto e o ponto de vista do seguinte modo

$$I = I_a k_a O_d + \frac{I_i [k_d O_d (N \bullet L) + k_s O_s (R \bullet V)^n]}{r + K} \quad (1-12)$$

em que:

- $r$  é a distância entre o objecto e o ponto de vista;
- $K$  é uma constante.

#### 1.2.6 Resumo das Características do Modelo

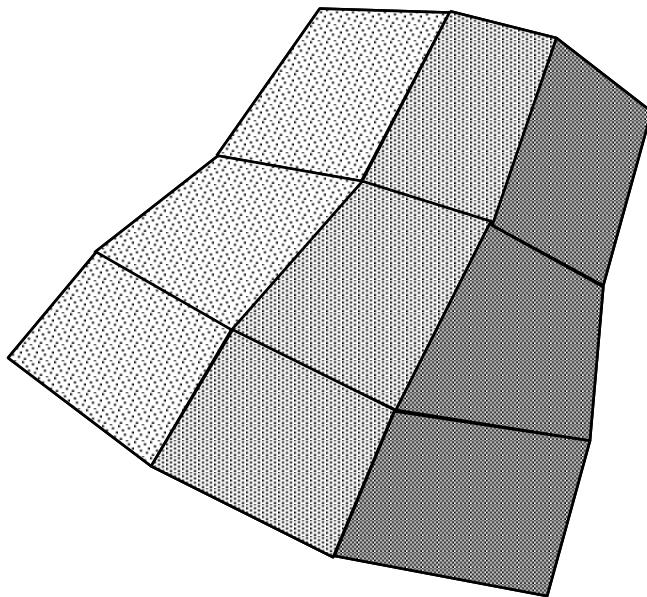
O modelo de reflexão de Phong assume um conjunto de aproximações:

- As **fontes de luz** são consideradas **pontuais** e localizadas no **infinito**. Só existindo uma direcção para a fonte de luz e sendo todos os raios paralelos é utilizando sempre o mesmo vector unitário  $L$ , para cada fonte de luz.
- O **ponto de vista** está no **infinito**. Pelo que também só é usado um vector unitário  $V$ .
- O **vector normal** às superfícies dos objectos é o único parâmetro **geométrico**.
- A **atenuação especular** em torno da direcção de reflexão ideal é definida de modo **empírico**.

### 1.3 Métodos de Sombreamento

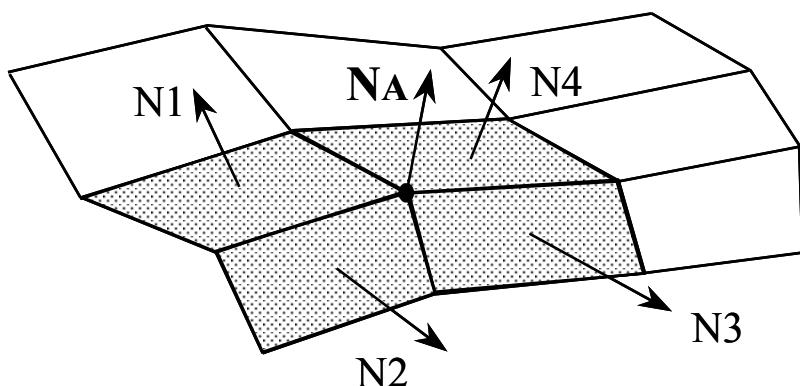
Depois de termos descrito o modelo de iluminação de Phong, que permite calcular a intensidade da energia luminosa reflectida por um ponto da superfície de um objecto, é necessário descrever agora como aplicar esse cálculo ao desenho das superfícies, isto é, efectuar o **sombreamento** dessas superfícies.

Considere-se uma superfície modelada aproximadamente por uma malha de facetas, isto é de polígonos planares (veja-se a figura 1.15).



**Figura 1.15 – Aproximação de uma superfície por uma malha de facetas.**

Para aplicar um modelo de iluminação é necessário calcular a normal a cada faceta, tal como foi apresentado no capítulo da Modelação.



**Figura 1.16 - Normais a facetas e normais nos vértices.**

Como se vai utilizar o modelo de iluminação de Phong a normal é a única entidade que representa a geometria da faceta pelo que terá sempre que ser calculada.

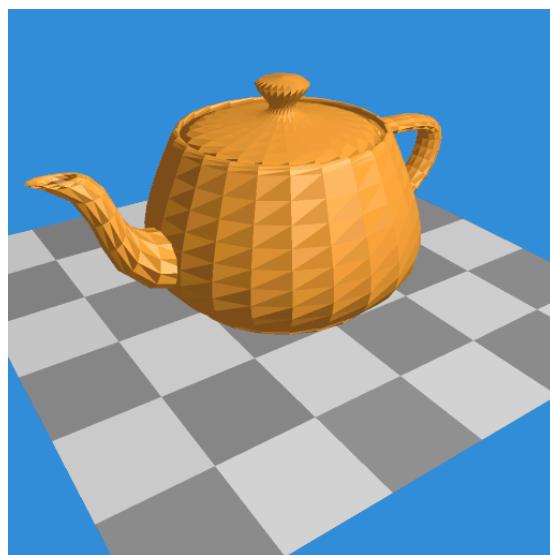
Os métodos de sombreamento mais usados e que são apresentados seguidamente diferem entre si no modo como é aplicado o modelo de iluminação de Phong e no modo como se faz o cálculo da cor de cada quadrícula da imagem de cada faceta.

### 1.3.1 Sombreamento Constante

No modelo de sombreamento constante é utilizada a normal à faceta para calcular uma cor a qual é usada para sombrear todo a faceta. Este método designa-se por sombreamento constante.

Assim, sabendo a posição da fonte de luz, a normal à faceta e as propriedades do material, é possível aplicar o modelo de reflexão de Phong e obter uma intensidade da energia luminosa reflectida a qual pode ser aplicada no sombreamento das quadrículas que vão ser ocupadas pela imagem da faceta.

Os resultados que se obtêm com este método de sombreamento são de baixa qualidade uma vez que ficam visíveis as diferenças de cor nas fronteiras entre facetas, produzindo imagens muito pouco realistas, tal como pode observar-se na figura 1.17.



**Figura 1.17 – Imagem produzida pelo método de sombreamento constante.**

### 1.3.2 Sombreamento de Gouraud

Os fracos resultados do método de sombreamento anterior resultam de estarmos a aplicar um modelo de iluminação local a cada faceta, não tendo em consideração que as facetas são partes de um único objecto. No método de sombreamento de Gouraud a influência de facetas adjacentes é contemplada através do cálculo de normais em cada vértice da malha de facetas. Estas normais são obtidas por interpolação das normais

de todas as facetas que partilham um mesmo vértice. Para o caso apresentado na figura 1.16 em que o vértice A é partilhado por 4 vértices, o cálculo da normal nesse vértice obtém-se do seguinte modo:

$$N_A = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4}{|N_1 + N_2 + N_3 + N_4|} \quad (1-13)$$

Uma vez calculada a normal  $N_A$ , esta é empregue na aplicação do modelo de iluminação de Phong ao cálculo da cor do vértice A.

Efectuando o cálculo das normais a todos os vértices de uma faceta e aplicando o modelo de iluminação de Phong obtém-se a cor de todos os vértices.

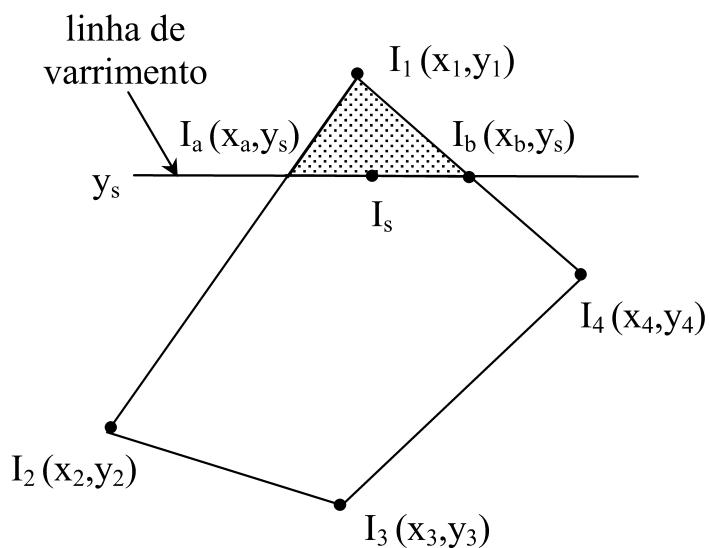
Seguidamente, efectua-se a interpolação das cores para todos os pontos pertencentes a uma mesma aresta, recorrendo às cores dos seus vértices.

Assumindo que o preenchimento do polígono é efectuado com o algoritmo de Linha de Varrimento, sempre que se passa de uma linha de varrimento para a seguinte teremos um incremento em Y de 1 pelo que a interpolação ao longo de uma aresta será.

$$\begin{aligned} I_{e,n} &= I_{e,n-1} + \Delta I_e \\ \Delta I_e &= \frac{1}{y_2 - y_1} (I_2 - I_1) \end{aligned} \quad (1-14)$$

Em que  $I_e$  é a cor ao longo da aresta que une o vértices  $v_1$  que tem cor  $I_1$  e menor valor de  $y_1$ , ao vértice  $v_2$ .

Em cada linha de varrimento será o valor de  $x$  que vai sendo incrementado de uma unidade pelo que obtém-se as cores de cada uma das quadrículas de cada linha de varrimento do modo como pode observar-se na figura 1.18.

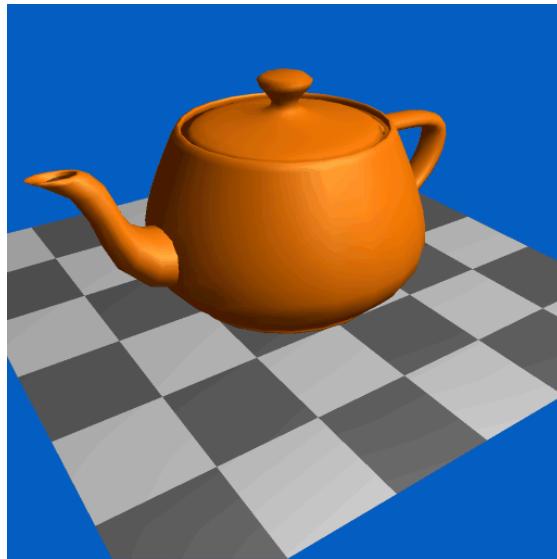


**Figura 1.18 – Sombreamento interpolado de Gouraud.**

O cálculo da cor numa mesma linha de varrimento,  $s$ , que une os pontos  $x_b$ , com cor  $I_b$  e ao ponto  $x_a$  com cor  $I_a$  será:

$$\begin{aligned} I_{s,n} &= I_{s,n-1} + \Delta I_s \\ \Delta I_s &= \frac{1}{x_b - x_a} (I_b - I_a) \end{aligned} \quad (1-15)$$

Na figura 1.19 é possível verificar o aumento de realismo que se obtém ao aplicar o método de sombreamento de Gouraud relativamente ao método de sombreamento constante.



**Figura 1.19 - Método de sombreamento de Gouraud.**

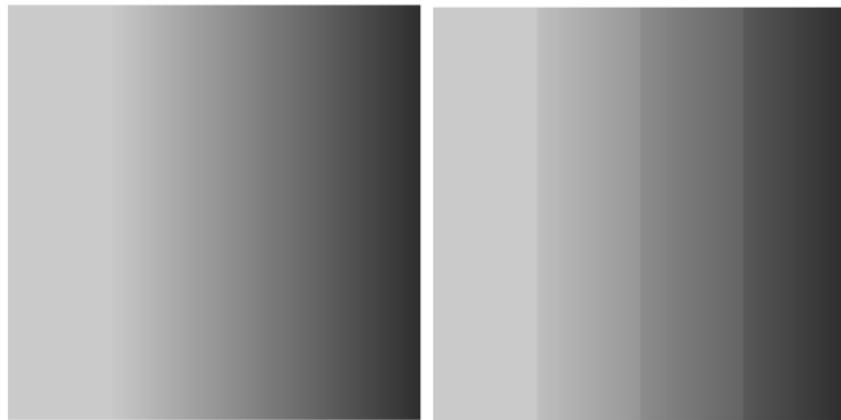
### 1.3.3 Limitações do Sombreamento de Gouraud

A maior limitação do método de sombreamento de Gouraud resulta do modo como é efectuada a interpolação. Considere-se a existência de duas facetas, uma pequena e uma grande, ambas iluminadas de igual modo e ambas tendo materiais que reflectem unicamente de modo especular. Se os vértices da faceta mais pequena pertencerem à área de brilho  $n$ , terão uma cor a qual será interpolada por toda a sua superfície. Considere-se agora que nenhum dos vértices da faceta maior está dentro da área de brilho. Nesse caso a cor que é calculada será preta pelo que todo a faceta será desenhada a preto, pelo que não será visível.

Devido ao problema descrito é normal que, no método de sombreamento de Gouraud, se aplique uma versão limitada do modelo de iluminação de Phong que não contempla a reflexão especular.

Um segundo problema dos resultados obtidos com este método de sombreamento têm a sua origem nas características do Ser Humano.

O aparelho visual humano tem uma grande sensibilidade a pequenas diferenças na intensidade da energia luminosa. Nas arestas comuns visualizam-se as intensidades mais baixas como sendo ainda menores e a intensidade mais elevada como ainda sendo maior. Este efeito visível nas arestas designa-se por *Mach Band*. Na figura seguinte, à esquerda representa-se o sombreamento de uma malha com quatro polígonos rectangulares. À direita apresenta-se o modo como o sombreamento é percepcionado pelo aparelho visual humano.



**Figura 1.20 – Efeito de *Mach Band***

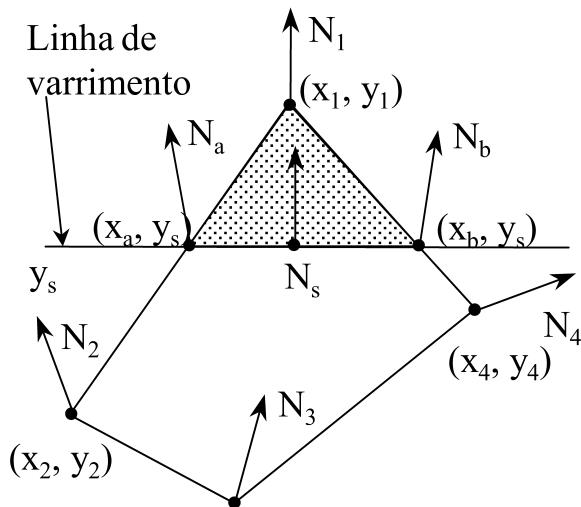
O primeiro problema descrito pode ser resolvido se for aplicado o modelo de iluminação de Phong não só aos vértices das facetas mas, pelo menos a todos os pontos das arestas. O segundo problema poderá ser minimizado se o modelo de iluminação de Phong for aplicado também aos pontos das linhas de varrimento, de modo a suavizar os gradientes de cor. É essa a solução que é adoptada pelo método de sombreamento de Phong que se descreve de seguida.

### 1.3.4 Sombreamento de Phong

No método de sombreamento de Phong, a partir das normais aos vértices, que são calculadas do mesmo modo que no sombreamento de Gouraud, é calculada a normal a cada quadrícula através da interpolação das normais. A normal calculada para cada quadrícula é então usada no modelo de iluminação de Phong para calcular a intensidade da energia luminosa reflectida.

A figura 1.21 ilustra como se procede à interpolação das normais no sombreamento de Phong.

A interpolação das normais é efectuada, em primeiro lugar ao longo da aresta, sempre que se passa de uma linha de varrimento para a seguinte ( $y$  tem variação unitária).



**Figura 1.21 – Sombreamento de Phong: interpolação de normais ao longo das arestas e da linha de varrimento.**

Tal como acontecia no método de sombreamento de Gouraud, é possível, ao longo de uma linha de varrimento, realizar cálculos por interpolação das componentes das normais numa quadrícula ( $N_{sx}$ ,  $N_{sy}$  e  $N_{sz}$ ) a partir dos valores dessas componentes na quadrícula anterior

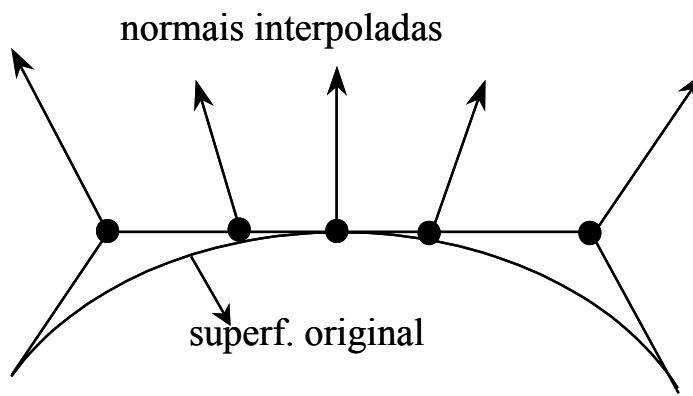
$$\begin{aligned} N_{sx,n} &= N_{sx,n-1} + \Delta N_{sx} \\ N_{sy,n} &= N_{sy,n-1} + \Delta N_{sy} \\ N_{sz,n} &= N_{sz,n-1} + \Delta N_{sz} \end{aligned} \quad (1-16)$$

empregando incrementos das normais ( $\Delta N_{sx}$ ,  $\Delta N_{sy}$  e  $\Delta N_{sz}$ ) ao longo da linha de varrimento tais que:

$$\begin{aligned} \Delta N_{sx} &= \frac{\Delta x}{x_b - x_a} (N_{bx} - N_{ax}) \\ \Delta N_{sy} &= \frac{\Delta y}{y_b - y_a} (N_{by} - N_{ay}) \\ \Delta N_{sz} &= \frac{\Delta z}{z_b - z_a} (N_{bz} - N_{az}) \end{aligned} \quad (1-17)$$

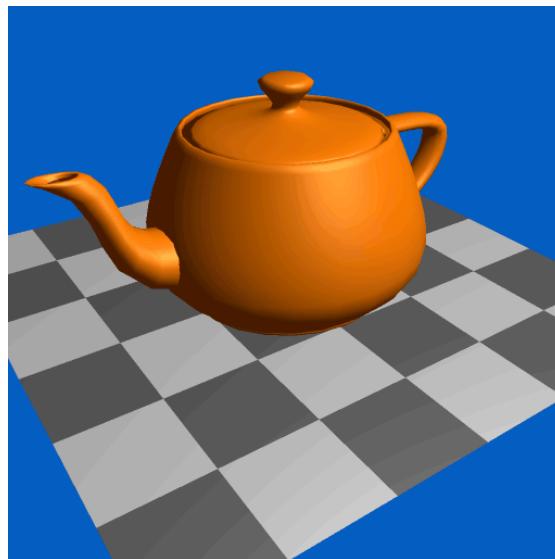
Numa mesma linha de varrimento teremos valores de  $y$  iguais e o valor de  $x$  a ser incrementado de modo unitário.

Considerando que os objectos são normalmente modelados através de superfícies aproximadas por malhas de facetas, podem verificar-se situações em que as normais interpoladas são uma aproximação bastante boa relativamente às normais da superfície original, tal como é ilustrado pela figura 1.22.



**Figura 1.22 - Superfície normal e sombreada.**

Na figura 1.23 pode observar-se a existência de brilho no corpo da chaleira representada na imagem.

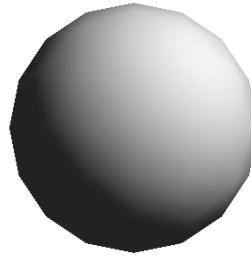


**Figura 1.23 - Método de sombreamento de Phong**

O método de sombreamento de Phong é computacionalmente mais pesado uma vez que é necessário calcular a cor, por aplicação do modelo de sombreamento de Phong a todos as quadrículas da faceta.

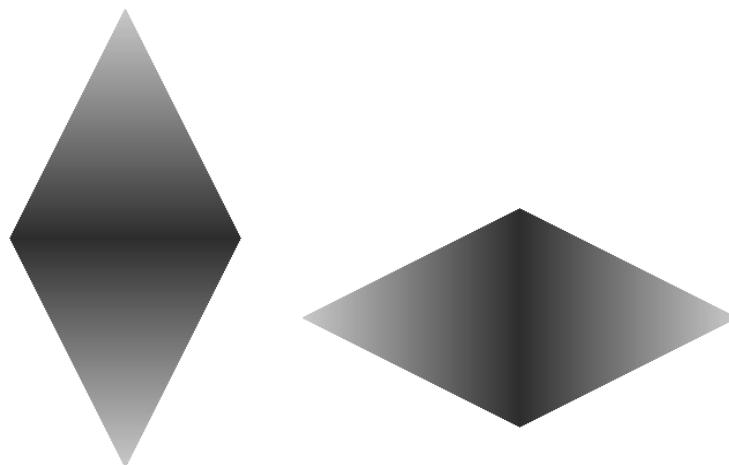
### 1.3.5 Limitações das Aproximações Interpoladas

A figura 1.23 apresenta uma limitação dos métodos de sombreamento de Gouraud e de Phong. Sendo a normal o único elemento geométrico utilizado no modelo de reflexão de Phong, a geometria da silhueta de qualquer objecto modelado através de malha de facetas aparecerá pouco realista como pode observar-se na figura seguinte.

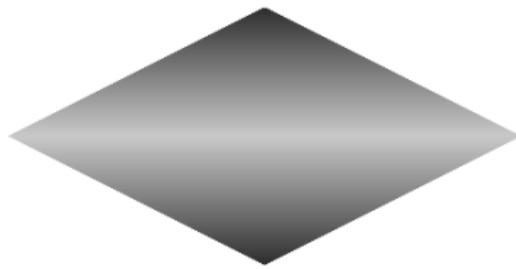


**Figura 1.24 – Silhueta do objecto**

Uma segunda limitação resulta do facto da interpolação de intensidades ser executada em coordenadas de ecrã, embora partindo de vectores normais calculados em coordenadas do mundo. Não tendo impacte negativo no cálculo da imagem de uma cena, poderá no entanto conduzir a perturbações perceptíveis em sequências animadas (com rotações, translações e movimentos de câmara), como pode observar-se nas figuras seguintes em que os resultados são significativamente diferentes.



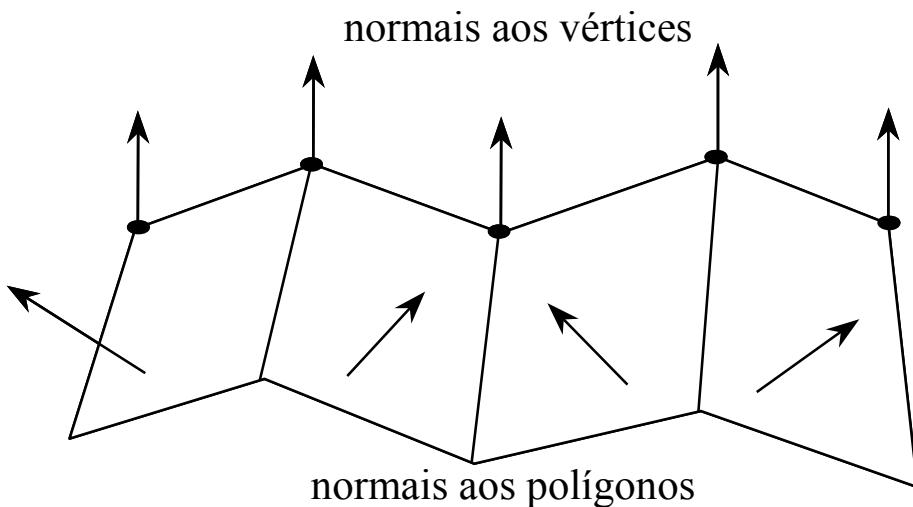
**Figura 1.25 – Sombreamento da faceta seguido de rotação de 90°**



**Figura 1.26 – Rotação de 90° seguido de sombreamento da faceta**

Um último problema está relacionado com o aparecimento de falsos alisamentos entre facetas adjacentes. Na figura 1.27, estão desenhados os vectores normais a cada uma de quatro facetas. Aplicando o modelo de sombreamento de Gouraud, interpolação dessas normais, nos vértices resulta num conjunto de normais paralelas entre si, pelo que a cor que vai ser obtida através da aplicação do modelo de iluminação de Phong será sempre igual pelo que as quatro facetas aparecem desenhadas todas com a mesma cor, o que está incorrecto.

Se aplicarmos o modelo de sombreamento de Phong o problema será igual uma vez que todos os pontos das 4 facetas terão normais também todas paralelas entre si pelo que a cor será sempre igual.



**Figura 1.27 - Falso alisamento de polígonos com normais diferentes.**

### 1.3.6 Método de Sombreamento Misto

Considerando as vantagens de cada um dos métodos de sombreamento, em particular a rapidez do método de Gouraud e a boa capacidade em tratar a componente especular do método de Phong, existe toda a conveniência em combinar a aplicação dos dois métodos na criação de imagens.

Em primeiro lugar, é necessário identificar o que se designa por facetas de brilho, facetas em que a componente de reflexão especular é significativa. Para esse cálculo utiliza-se a comparação entre o vector segundo a direcção do Ponto de Vista,  $V$  e o vector segundo a direcção de reflexão perfeita,  $R$ . Se o ângulo formado pelos dois vectores for pequeno então a faceta é etiquetada como sendo de brilho.

Seguidamente, aplica-se o método de sombreamento de Phong a todas as facetas de brilho e o método de sombreamento de Gouraud às restantes facetas. Como as diferenças obtidas entre a aplicação do método de sombreamento de Gouraud e do método de sombreamento de Phong com os coeficientes de reflexão especular a 0 não são visualmente perceptíveis, temos uma solução com a qualidade do método de sombreamento de Phong e um custo próximo do método de sombreamento de Gouraud.

É ainda possível aplicar outros métodos de optimização, usualmente com alguma perda na qualidade da imagem. Por exemplo, o método de sombreamento de Phong pode ser aplicado ao cálculo da intensidade da energia luminosa só em algumas quadrículas de uma linha de varrimento (uma em cada duas quadrículas, por exemplo) e calcular o sombreamento das restantes por interpolação da intensidade da energia luminosa (Gouraud).

## 1.4 Conclusões

Em aplicações que requerem tempos de cálculo de imagens muito baixos (jogos com cenas tridimensionais, por exemplo) a qualidade foto realista da imagem não é o factor mais importante, sendo comum a utilização de Modelos de Iluminação Locais.

Apesar da modelação baseada na descrição da fronteira dos objectos através de superfícies ser muito usada, nesse tipo de aplicações cada superfície é aproximada por uma malha de facetas, conduzindo a uma maior rapidez na execução do pipeline de visualização. Assim neste capítulo considerou-se unicamente o calculo de imagem de objectos modelados através de malhas de facetas.

Neste capítulo descreveu-se o modelo de iluminação local de Phong, o qual, apesar de ser um modelo empírico, permite o cálculo do modo com é efectuada a reflexão na energia luminosa que incide na superfície dos objectos da cena com algum realismo.

Teoricamente, o modelo de iluminação podia ser aplicado a cada uma das quadrículas que resulta do processo de discretização de um objecto bastando, para tal, calcular a normal respectiva, o que é facilitado por se tratarem de facetas.

No entanto, o que se pretende sombrear não é uma malha de facetas, situação em que o método de sombreamento constante seria suficiente, mas sim a superfície original, escondendo quanto possível o facto de ter sido aproximada através da referida malha de facetas.

O método de sombreamento de Gouraud esconde a existência da malha de polígonos, mas não trata correctamente a existência de brilho que, no mundo real, é visualizado na direcção em que um espelho reflecte a luz proveniente de uma fonte de luz. Para ultrapassar essa limitação, aplica-se o método de sombreamento de Phong.

## Exercícios

- 1-1 Segundo o Modelo de Phong a cor de cada quadrícula é uma combinação linear de 3 componentes. Quais são essas componentes e o que pretendem modelar?
- 1-2 Quais as simplificações geométricas que são assumidas pelo Modelo de Iluminação de Phong?
- 1-3 Considere os métodos de Sombreamento de Gouraud e de Phong. Por que são métodos interpolados? Descreva sucintamente os dois métodos e indique, justificando, qual o que apresenta melhor desempenho.
- 1-4 Escreva a fórmula do Modelo de Iluminação de Phong e descreva o significado de cada um dos componentes. Deve usar uma figura para ilustrar o significado de alguns dos componentes.
- 1-5 Apresente 2 exemplos de problemas das imagens de objectos obtidas através da aplicação de métodos de sombreamento interpolados. Se entender pode recorrer a desenhos para suportar a explicação do problema.
- 1-6 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?
- 1-7 Apresente 2 soluções alternativas que permitam optimizar o cálculo de um sombreamento recorrendo aos algoritmos de Phong e Gouraud.
- 1-8 O que se entende por Depth Cueing? Escreva a equação de iluminação de Phong contemplando o efeito do Depth Cueing.
- 1-9 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).
- 1-10 Considere a fórmula  $I = I_a \cdot K_a + I_d [ K_d (L \cdot N) + K_s (N \cdot H) n ] / (r + K)$ . Com o auxílio de um esquema e de texto descreva, justificando o significado de cada uma das variáveis. Qual o nome do investigador que introduziu essa fórmula?