



00:07

A Terceira Dimensão

00:02

00:03

00:04

00:05

00:06

COMPUTAÇÃO GRÁFICA TRIDIMENSIONAL

Introdução

A discussão de modelagem feita aqui começa com a apresentação de formatos para arquivos geométricos tridimensionais. São estudados os modelos poligonais de superfícies, que são de longe os mais usados em animação tridimensional. Apresenta-se também informação a respeito de modelos utilizados em algumas aplicações específicas, como modelos baseados em superfícies curvas e outras representações avançadas. Discute-se finalmente a modelagem das câmeras virtuais, que determina os resultados das operações de visualização aplicadas à geometria.

Tratamentos mais avançados podem ser encontrados em livros de computação gráfica, como [Glassner90], [Arvo91], [Foley+96], [Watt99] e [Watt+92].

Formatos Tridimensionais

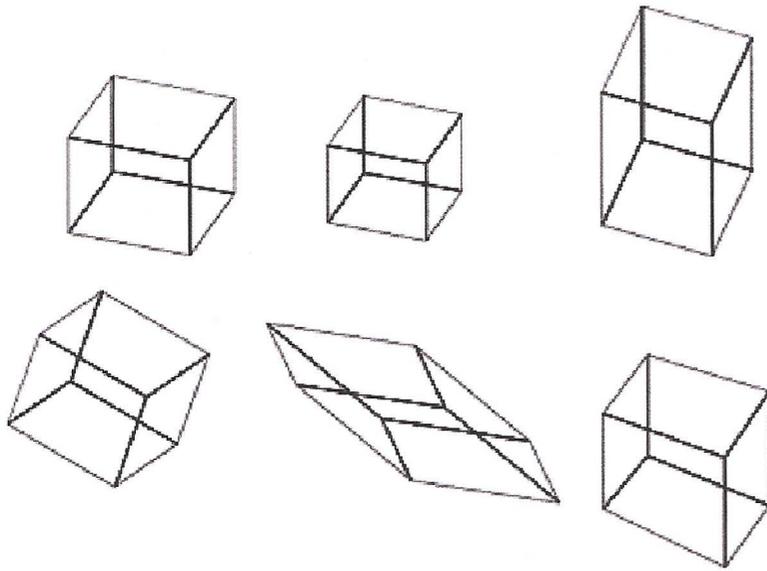
A modelagem consiste na construção de uma base de dados que contém a descrição geométrica da cena a ser usada na animação. Uma base de dados pode estar contida em metarquivos tridimensionais, que geralmente utilizam formatos particulares dos editores tridimensionais que os processam. São exemplos de formatos de metarquivos tridimensionais de larga difusão:

- **DXF**, padrão tridimensional usado pelo AutoCAD;
- **IGES**, padrão tridimensional de CAD, independentemente de fabricante;
- **3DS**, formato binário utilizado pelo Autodesk 3ds Max (antigo Autodesk 3D Studio);
- **VRML**, formato usado inicialmente para distribuição de modelos de realidade virtual, na Internet;
- **X3D**, formato padronizado pela ISO, baseado em XML, como sucessor de VRML;
- **3DMLW**, uma linguagem de marcação para embutir elementos gráficos 2D e 3D em HTML;
- **U3D**, um formato comprimido para dados gráficos tridimensionais, que podem ser embutidos em PDF, padronizado pela ECMA;
- **BLEND**, formato usado pela ferramenta Blender.

Os formatos DXF e IGES contêm basicamente dados geométricos, o que corresponde à sua origem como formatos de intercâmbio de dados para programas de CAD. O formato 3DS contém também dados necessários para produzir imagens fotorrealistas, como cor verdadeira e especificações de elaboração e coreografia. O formato VRML é legível por humanos, e o mesmo acontece com X3D e 3DMLW, por serem baseados em XML.

A descrição de cenas tridimensionais é, naturalmente, bem mais complexa que a de figuras bidimensionais. A escolha do método mais adequado para representação de objetos tridimensionais depende muito da aplicação que se faz. Disso resulta a existência de vários métodos de representação, em lugar de um conjunto limitado de primitivas gráficas. Cenas complexas podem requerer a combinação dos vários tipos de representação.

Cenas tridimensionais podem usar os mesmos conceitos de símbolos e hierarquias das figuras bidimensionais, o que implica a utilização de transformações lineares tridimensionais. Estas incluem, tal como no caso bidimensional, a translação, a rotação, a mudança de escala e o cisalhamento. A rotação passa a ter como referência uma reta que serve de eixo, em lugar de um ponto. A Figura 7.1 mostra alguns exemplos de transformações tridimensionais aplicadas a um cubo.



◀ Figura 7.1 Transformações tridimensionais.

Editores Tridimensionais

A Figura 7.2 apresenta uma tela do **Blender**, um editor gráfico tridimensional de software livre, disponível para vários sistemas operacionais, inclusive o Windows. A cena em construção é mostrada na área central, em três visões: a divisão da esquerda, que ocupa a maior parte, mostra a cena em perspectiva, com texturas aplicadas e pré-elaborada (uma elaboração de qualidade inferior, para uso do animador); as duas partes da direita mostram uma visão superior e uma visão lateral da cena, em projeções paralelas, com representação de fio de grade para mostrar a estrutura dos objetos gráficos. A cena provém de um arquivo VRML, distribuído como exemplo no sítio da Blender Foundation, mantenedora da ferramenta.

Outros editores gráficos tridimensionais muito usados na área de animação incluem três editores atualmente distribuídos pela Autodesk:

- **3ds Max**, o editor artístico original da Autodesk, para ambientes Windows, muito usado em jogos e visualização arquitetônica;
- **Maya**, desenvolvido inicialmente Alias/Wavefront e adquirido pela Autodesk, disponível atualmente para ambientes Windows, Linux e MacOS, muito usado em cinema e televisão;
- **Softimage**, desenvolvido inicialmente pela empresa de mesmo nome, disponível atualmente para ambientes Windows e Linux, também usado em cinema, televisão e jogos.

Muitas outras ferramentas de modelagem tridimensional são disponíveis, tanto para a criação de animações e jogos quanto para a utilização em aplicações técnicas, como CAD, desenho industrial e visualização científica.

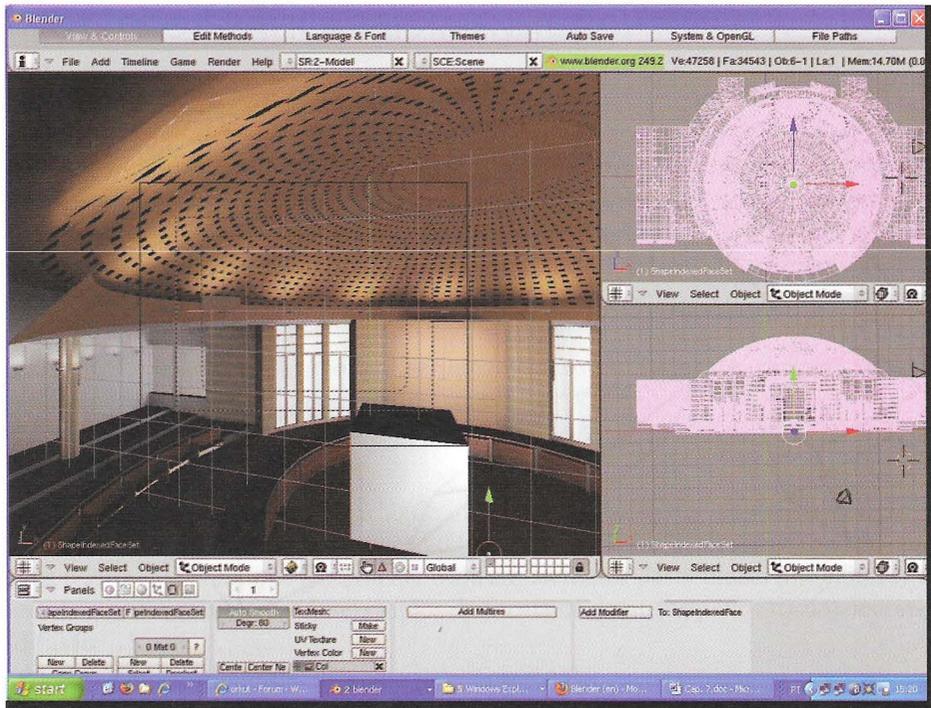


Figura 7.2 Tela de editor tridimensional.

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

Superfícies Poligonais

Os modelos tridimensionais mais utilizados são baseados nas **malhas poligonais**. Essas malhas são coleções de polígonos adjacentes contendo os seguintes elementos:

- **vértices**, que são pontos no espaço tridimensional;
- **arestas**, que são segmentos de reta que unem vértices;
- **faces**, que são polígonos delimitados por arestas;
- **normais**, que são direções perpendiculares às faces.

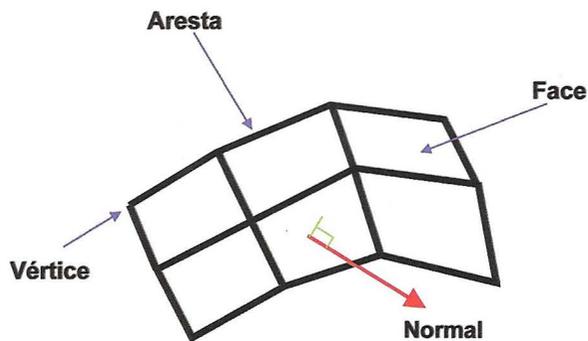


Figura 7.3 Malha poliédrica.

Esses elementos são mostrados na Figura 7.3. Pode-se mostrar que a normal a uma face é definida pelos coeficientes da equação do plano dessa face. A Figura 7.4 mostra uma visualização tridimensional de algumas das normais às faces de um poliedro.

As normais desempenham um papel muito importante na síntese tridimensional, já que entram nos cálculos dos principais modelos de iluminação. Frequentemente, malhas poligonais são usadas como aproximações de superfícies curvas. Nesse caso, faz sentido falar em normais a arestas e vértices.

A normal a uma aresta é a média das normais aos planos que partilham essa aresta. Da mesma forma, a normal a um vértice é a média¹ das normais aos planos que partilham esse vértice, e é usada como aproximação da normal ao plano tangente à curva nesse ponto. Isso é mostrado na Figura 7.5.

O modelo de malhas poligonais é a forma principal de representação usada nos arquivos gráficos tridimensionais. Em editores mais simples, o modelo poligonal é a base de representação dos objetos gráficos. A quantidade de polígonos presente em uma cena mede a complexidade dessa cena e, portanto, seu tempo de elaboração. Para a criação de cenas completas, boa parte do trabalho dos modeladores consiste em minimizar o número de polígonos, através da escolha de opções adequadas, na modelagem dos objetos. O número de polígonos elaborados por segundo é uma das figuras de mérito mais importantes para medir o desempenho de sistemas gráficos.

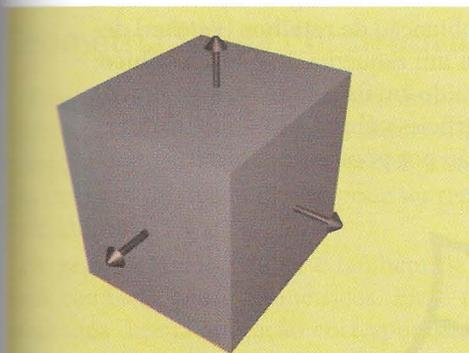
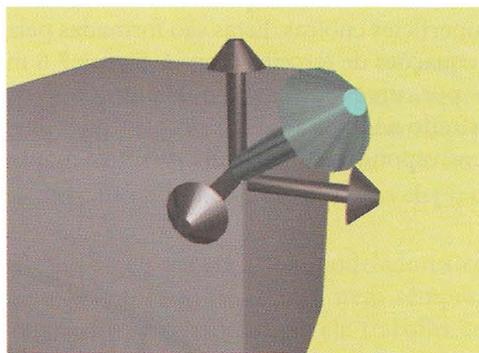


Figura 7.4 Normais às faces de um cubo. >



< Figura 7.5 Normal a um vértice.

Superfícies Curvas

Em muitos casos, pode-se conseguir melhor fidelidade ou maior eficiência na síntese usando-se diretamente representações matemáticas de curvas e superfícies curvas. Os cálculos efetuados sobre curvas são bem mais complexos que os efetuados sobre planos, mas em muitos casos a representação por superfícies curvas é preferida, pelos seguintes aspectos:

- A conversão para polígonos só é feita no instante de elaboração, o que permite adaptar a resolução poligonal à resolução da tela. Assim, superfícies que cobrirão pequenas áreas da imagem podem ser convertidas em malhas poligonais mais grosseiras.

¹Média vetorial, no espaço tridimensional.

- Em aplicações de CAD, a representação por superfícies curvas preserva a geometria exata dos objetos, o que é importante para gerar dados para a fabricação.
- Por ser mais compacta, pode também ser de processamento mais eficiente, no caso de figuras que teriam que ser representadas por modelos poligonais muito grandes.

Superfícies cônicas

Essas superfícies são descritas por equações do segundo grau, o que inclui esferas, elipsoides, cilindros, cones, paraboloides, hiperboloides e retalhos formados por pedaços dessas superfícies. Uma esfera pode ser descrita apenas pelo raio e pelas coordenadas do centro, enquanto uma malha poligonal que aproxime satisfatoriamente uma esfera necessitará de muito mais dados para representação.

As superfícies cônicas são particularmente adequadas para algoritmos como o rastreamento de raios, descritos adiante, em que o principal volume de computações para a síntese é representado pelo cálculo de interseções das superfícies com raios² lançados da posição do observador. As esferas são também a base de uma técnica de modelagem conhecida como **metabolos**. Por outro lado, as cônicas não são suficientemente flexíveis para modelar superfícies curvas de formas complexas.

Superfícies cúbicas

Modelos mais flexíveis de superfícies de formato arbitrário são conseguidos, entretanto, através de superfícies cúbicas. Estas são formadas pela combinação de **retalhos** (*patches*) definidos por equações de terceiro grau. A Figura 7.6 mostra um esquema de **retalho cúbico**; ele é “tecido” por curvas cúbicas. Um retalho cúbico construído em um modelador tridimensional é mostrado na Figura 7.7. As propriedades das superfícies cúbicas são semelhantes às das curvas correspondentes, inclusive quanto à manipulação por pontos de controle.

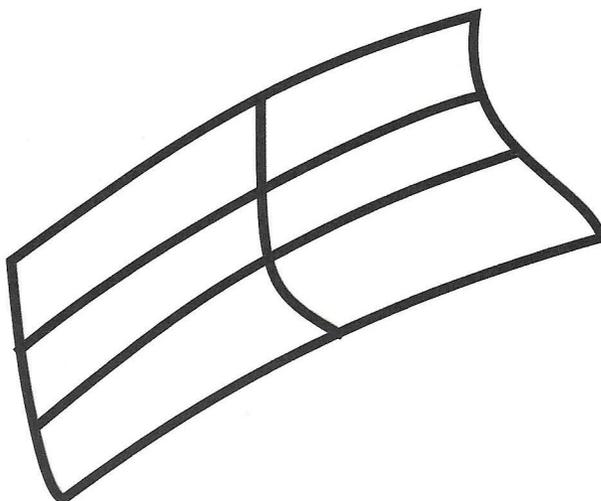


Figura 7.6 Retalho cúbico.

² Retas semi-infinitas, com início mas sem fim.

As superfícies cúbicas são amplamente utilizadas em sistemas avançados de CAD e em sistemas de animação tridimensional de topo de linha. Suas propriedades matemáticas permitem que elas sejam manipuladas de forma mais fácil pelos modeladores, como se superfícies curvas de formas complexas fossem esculpidas. Uma generalização importante das curvas cúbicas é fornecida pelas NURBS (*Non-uniform rational basis splines*), que oferecem grande flexibilidade e precisão para modelagem tanto técnica quanto artística.



Figura 7.7 Superfície cúbica.

Geometria Sólida Construtiva

Essa técnica parte de sólidos elementares, como prismas, pirâmides, elipsoides, cones e cilindros. Esses sólidos podem ser deformados por transformações lineares e combinados por operações semelhantes às da teoria dos conjuntos: união, interseção e diferença. Por exemplo, um paralelepípedo furado pode ser representado pela diferença entre um paralelepípedo e um cilindro (Figura 7.8).

A geometria construtiva é também de uso fácil, principalmente por modeladores com bons conhecimentos geométricos. Ela é um recurso avançado de edição; nem sempre os resultados de sua aplicação correspondem ao esperado, pelo fato de que ela trabalha com sólidos, enquanto os modelos poligonais e curvos trabalham com superfícies.

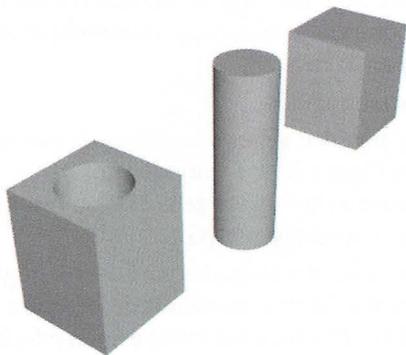


Figura 7.8 Operação de geometria sólida construtiva.

Representações de Varredura

Superfícies complexas podem ser obtidas por meio de um movimento de varredura do espaço, por parte de uma primitiva simples. Movimentos de varredura podem ser, por exemplo, a revolução em torno de um eixo, a translação em uma trajetória reta ou curva e a extrusão ao longo de uma linha. A Figura 7.9 mostra como uma letra tridimensional pode ser construída por extrusão de sua forma bidimensional.

As representações de varredura permitem a criação de superfícies tridimensionais a partir de formas bidimensionais. Essas formas são criadas em um editor 2D interno ao modelador tridimensional, ou importadas de um editor externo. O caminho da varredura é definido também por uma forma bidimensional. As várias opções permitem realizar revoluções, extrusões e tipos mais complexos de varredura, que percorrem caminhos arbitrários. A Figura 7.10 mostra uma lâmpada de neônio, criada varrendo-se com um círculo uma trajetória em forma da letra A.

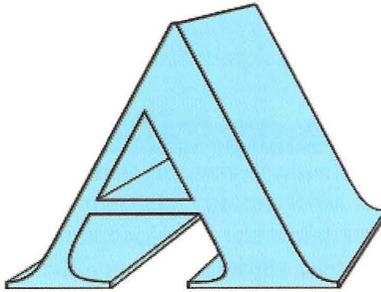


Figura 7.9 Exemplo de extrusão.

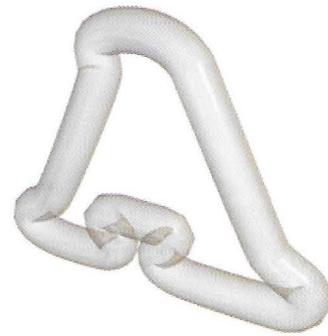


Figura 7.10 Figura criada por varredura.

Representações Procedimentais

Na representação procedimental, a superfície é definida pelos parâmetros de um algoritmo, em lugar de uma estrutura de dados passiva. No caso de formas muito complexas, com detalhes minúsculos, a representação procedimental evita a construção de modelos com enorme quantidade de polígonos. Além disso, a representação procedimental também pode ser adaptativa em relação à resolução das imagens, permitindo enxergar detalhes arbitrariamente pequenos. Além de recursos embutidos nos principais editores tridimensionais, muitos aplicativos são atualmente disponíveis para geração dessas representações e podem ser facilmente localizados por pesquisa na Web.

São exemplos de representações procedimentais:

- **fractais**, usados para representar linhas e superfícies rugosas, como as presentes em figuras geográficas (Figura 7.11 e Figura 7.12³) e organismos vivos, com tratamentos clássicos em [Mandelbrot83], [Peitgen+86] e [Peitgen+88], ou resultantes de fenômenos caóticos, tratados em nível de divulgação por [Gleick88];
- **graftais**, gerados por gramáticas semelhantes às usadas para definir linguagens de programação, que são usados para representar figuras complexas de estrutura regular, tais como muitos tipos de plantas (Figura 7.13), [Prusinkiewicz+96] é uma referência clássica;

³ Da animação de curta-metragem *Pescaria*, de Marco Antônio Anacleto, orientado pelo autor.

- **sistemas de partículas**, introduzidos em [Reeves83], usados para representar agregados como nuvens, neblina ou fogo (Figura 7.14).



Figura 7.11 Montanha fractal.

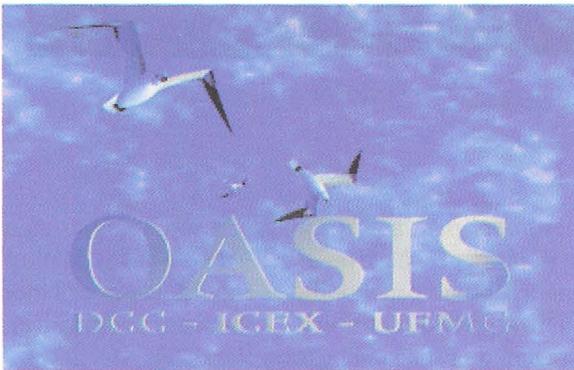


Figura 7.12 Quadro de animação com fundo de nuvens fractais.



Figura 7.13 Graftal em forma de samambaia.

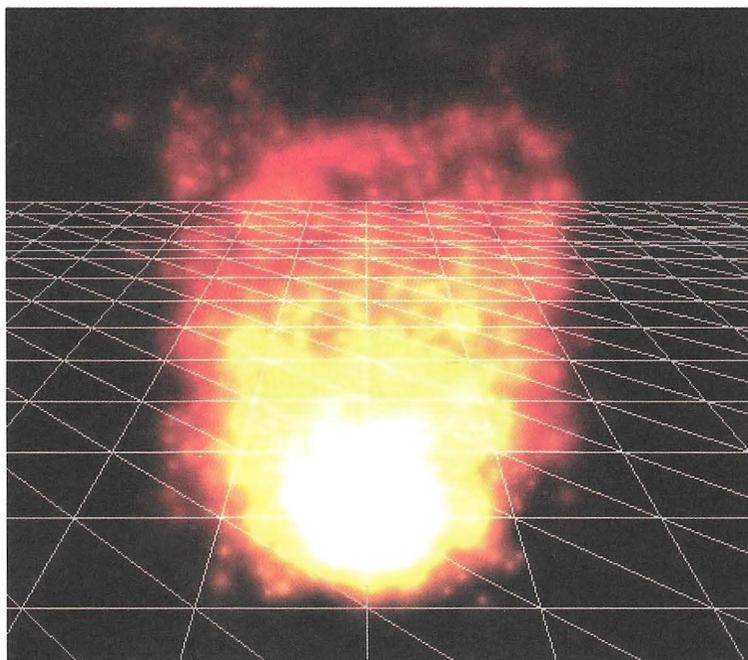


Figura 7.14 Fogo criado com sistema de partículas.

Câmeras Virtuais

A passagem da cena tridimensional para a figura bidimensional requer algum tipo de projeção. A relação entre a cena descrita pela base de dados criada através da modelagem e a figura que é efetivamente vista na tela ou no papel pode ser entendida por um modelo de **câmera virtual**. O modelo de visualização tridimensional é complexo, por envolver operações de **projeção** que realizam a passagem do espaço 3D para o plano 2D.

A projeção é obtida através de retas, os **projetores**, que passam por cada ponto da cena. A interseção de cada projetor com o **plano de visualização** (isto é, o filme da câmera virtual) determina a **projeção** do respectivo ponto. Vale para as retas a propriedade de que a projeção de uma reta é a reta que une as projeções de seus vértices. Portanto, objetos descritos ou aproximados por malhas poligonais podem ser projetados simplesmente calculando-se as projeções de seus vértices.

Dois tipos principais de projeções são usados:

Nas **projeções paralelas**, os projetores são retas paralelas a uma dada direção, chamada a **direção de visualização**. A projeção será **ortogonal** se os projetores forem perpendiculares ao plano de visualização, e **oblíqua** em caso contrário. As projeções paralelas são mais aplicadas em desenho técnico, por permitirem visualizar mais fielmente as dimensões e ângulos do objeto original (Figura 7.15).

Nas **projeções em perspectiva**, os projetores são retas que emanam de um único ponto, o **centro de projeção**, que corresponde à localização da câmera virtual. As projeções em perspectiva correspondem melhor ao funcionamento do olho humano e das câmeras, e por isso são usadas quando o objetivo principal é o realismo (Figura 7.16).

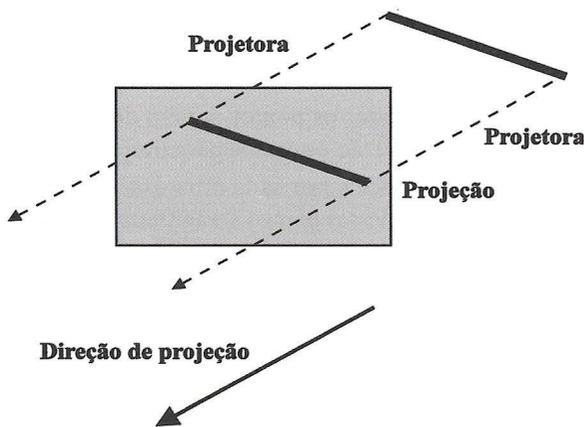


Figura 7.15 Projeção paralela.

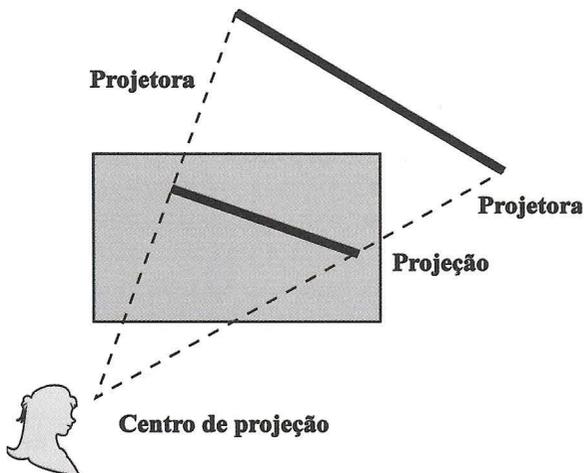


Figura 7.16 Projeção em perspectiva.

A projeção paralela pode ser inteiramente realizada por meio de transformações lineares. A projeção em perspectiva é uma operação não linear, porque envolve a divisão das larguras e alturas pelas profundidades: objetos mais distantes serão projetados como figuras menores. Entretanto, existem artifícios matemáticos que permitem que, em um espaço de quatro dimensões, a perspectiva seja realizada como transformação linear. Isso permite que todos os tipos de transformações sejam combinados em operações de multiplicação matricial, o que tem importantes consequências do ponto de vista de programação e é aproveitado também em arquiteturas para estações gráficas de alto desempenho.

A região do espaço visível à câmera é chamada de **volume de visualização**. Para a projeção perspectiva, o volume de visualização será um tronco de pirâmide formada da seguinte maneira:

- o vértice é o centro de projeção;

- o retângulo formado pela interseção do plano de visualização com o tronco de pirâmide será o **retângulo de visualização**;⁴
- o plano da base será o **plano distante**; todos os pontos além desse plano correspondem a objetos distantes cuja projeção será pequena demais;
- o plano de topo será o **plano próximo**; todos os pontos aquém desse plano são considerados próximos demais, de forma que serão omitidos para limpar a projeção;
- os **planos laterais** são definidos pelo vértice e por cada uma das arestas da janela. Todos os pontos que caem do lado externo desses planos serão também invisíveis.

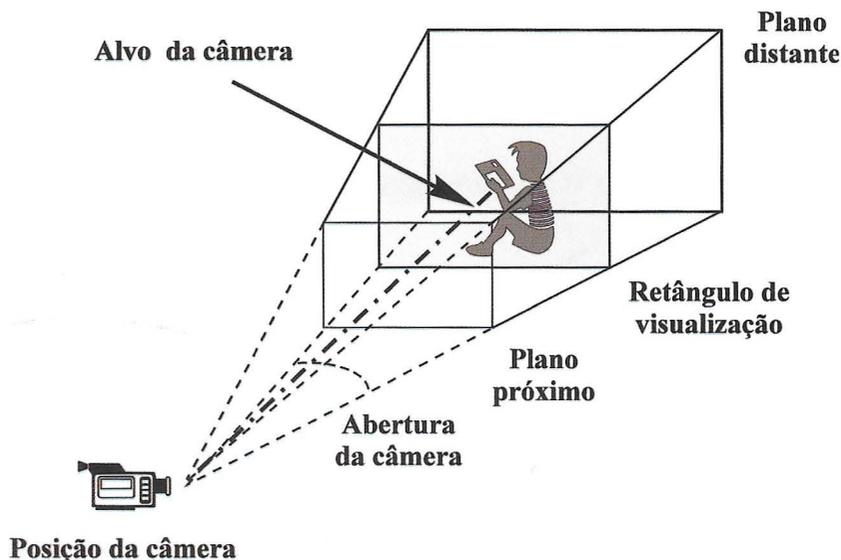


Figura 7.17 O modelo da câmera virtual.

Em editores gráficos tridimensionais, para maior conforto dos usuários, as técnicas de projeção e os movimentos das câmeras são normalmente traduzidos em operações análogas, realizadas com câmeras físicas. Assim, o centro de projeção é normalmente considerado posição da câmera; o centro do retângulo de visualização corresponde ao alvo da câmera; e o ângulo subtendido pela pirâmide corresponde ao campo de visão da câmera, que pode ser expresso na forma de distância focal de uma lente, para conveniência dos usuários habituados com fotografia (Figura 7.17).

A combinação de transformações lineares das câmeras e de variações do volume de visualização permite realizar operações de câmera. A Figura 7.18 mostra uma imagem obtida a partir de uma configuração inicial de câmera. A Figura 7.19 mostra o resultado de um movimento de translação da câmera. Na Figura 7.20, a câmera aproximou-se do objeto, aumentando seu tamanho aparente. Na Figura 7.21, o aumento de tamanho é conseguido por meio de uma mudança de abertura do ângulo de visão da câmera. Na Figura 7.22, a câmera foi girada em torno de seu próprio eixo.

⁴ Na maioria dos textos de computação gráfica, esse retângulo é chamado de janela. Não usaremos esse termo para evitar confusão com as janelas dos ambientes gráficos.



Figura 7.18 Imagem original. >



< Figura 7.19 Translação da câmera.



Figura 7.20 Aproximação da câmera. >



< Figura 7.21 Mudança de abertura da lente.



Figura 7.22 Rotação da câmera. >

ELABORAÇÃO DE IMAGENS TRIDIMENSIONAIS

Modalidades de Elaboração

Visão geral

Obtido o modelo, a geração da imagem ou imagens representativas da cena, dadas as configurações das câmeras e da iluminação, além de outros parâmetros, constitui o processo que chamaremos de elaboração. A Figura 7.22 mostra uma imagem gerada por elaboração da cena mostrada na Figura 7.2. No caso, a elaboração é feita pelo Octaga Player, um visualizador de modelos VRML e X3D disponível em versão gratuita.

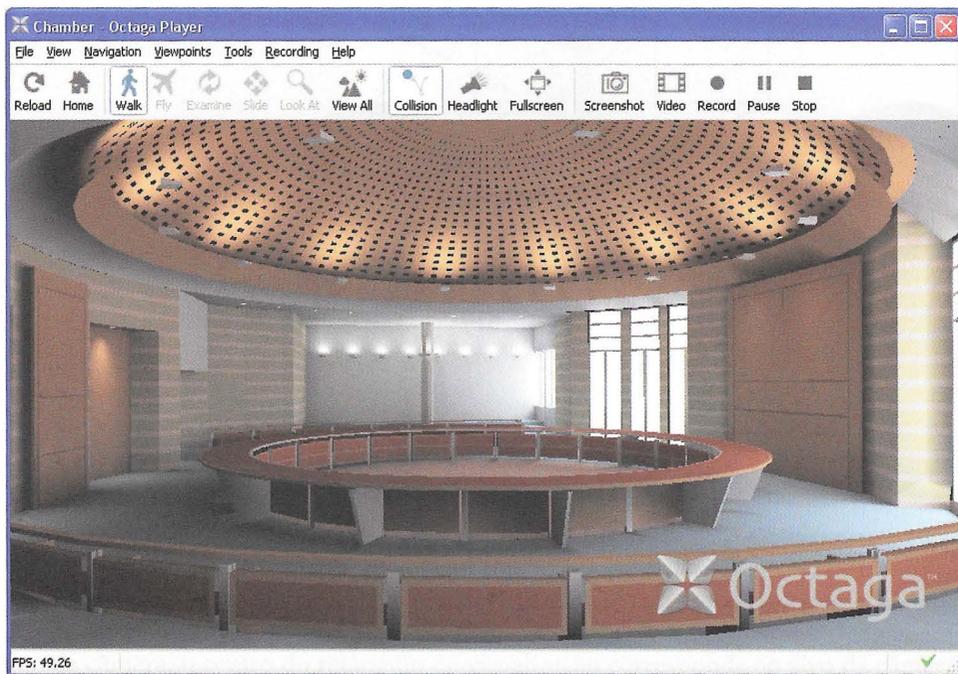


Figura 7.23 Elaboração de cena.

A entrada da elaboração é o modelo que descreve uma cena; a saída é um mapa de pixels, que corresponde a um quadro. Esse mapa normalmente descreve a cor de cada pixel em termos dos valores de seus componentes, designados segundo um dos modelos de cor (veja Capítulo 5 – As Imagens). Esses componentes de uma imagem são chamados de canais de cor.

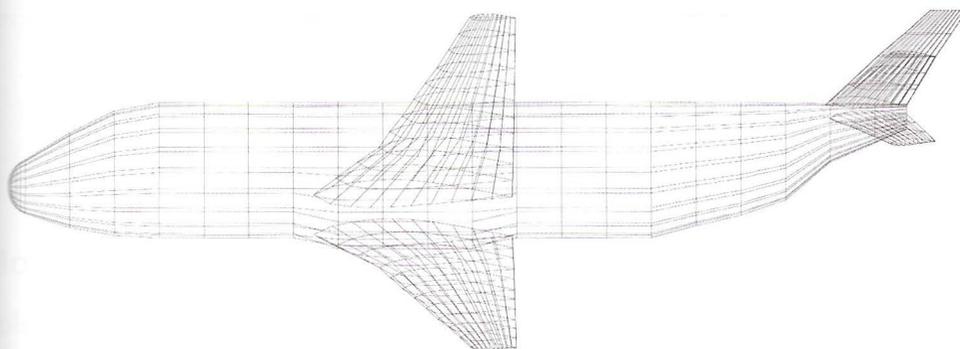
Para imagens realistas, cada canal de cor deve ter 8 bits de largura, o que dá um total de 16 M (224) cores. Isso é suportado pelos formatos TGA, TIFF e BMP. Os formatos GIF e FLI tratam de imagens de 256 cores. Nesse caso, deve ser usada uma codificação através de paleta, o que resulta em perda de qualidade em cenas com muitos detalhes ou com gradações sutis de cor.

Podem fazer parte da imagem também o canal alfa, que representa a transparência, e o canal z, que representa a profundidade na cena (distância até o observador). O canal alfa é utilizado para operações de composição de imagens, em geral durante a pós-produção. O ca-

mal z é usado durante a elaboração, para realizar a eliminação de superfícies ocultas. Durante a elaboração, pode-se imaginar que a cena é vista através de uma grade, onde cada quadrado representa um pixel. A coloração atribuída a cada pixel representará a coloração média da porção de cena vista através dele.

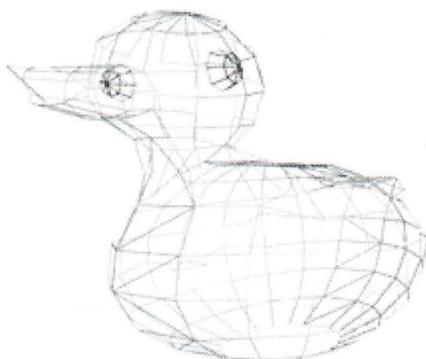
Elaboração em fio de arame

A forma mais simples e rápida de elaboração produz o modelo de fio de arame, no qual são visíveis todas as arestas poligonais existentes no volume de visualização. Objetos com modelos não poligonais são convertidos para esse formato, dentro de certo grau de aproximação. Os modelos de fio de arame são usados, no processo de produção de animações tridimensionais, para visualizações prévias rápidas. Na Figura 7.24, vê-se uma elaboração em fio de arame simples. A figura obtida pode ser representada por um conjunto de linhas. Esse tipo de elaboração é apropriado para a impressão por traçadores de gráficos (*plotters*), e é típico de editores de CAD.



◀ Figura 7.24 Elaboração em fio de arame.

Editores de animação usam as representações simples de fio de arame para a interação com o usuário modelador. A elaboração em fio de arame pode ser também um produto final. Na Figura 7.25, mostra-se uma combinação de fio de arame com antipseudonímia, que produz um efeito de desenho a lápis.



◀ Figura 7.25 Elaboração em fio de arame com antipseudonímia.

Elaboração com linhas ocultas

Subindo na escala de realismo, passa-se o modelo pelo processo de eliminação de linhas ocultas, que elimina da projeção as arestas ou partes de arestas que são escondidas por superfícies mais próximas do observador. Os algoritmos de eliminação de linhas ocultas são geralmente bastante trabalhosos. Por isso, esse tipo de elaboração, que pode ser importante em aplicações de CAD (Figura 7.26), não é normalmente usado em animação. Nos métodos de elaboração que se seguem, a eliminação de superfícies ocultas é obtida como subproduto do cálculo da iluminação.

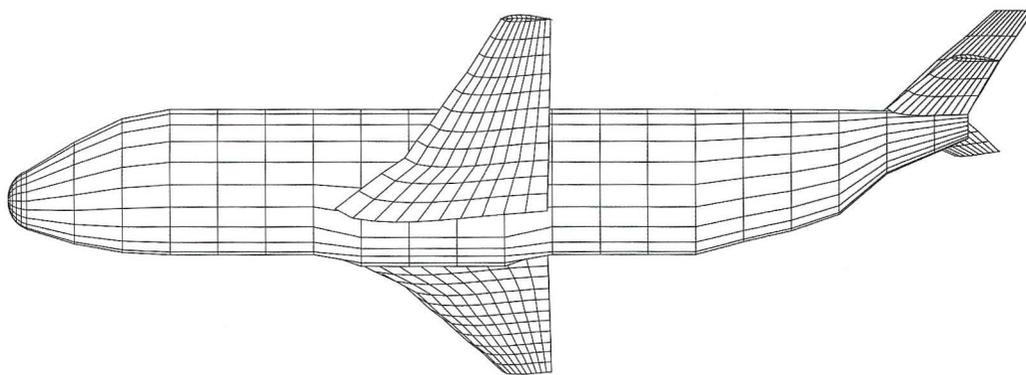


Figura 7.26 Visualização com linhas ocultas.

Elaboração poligonal

Essa técnica produz imagens de qualidade suficiente para a maioria das aplicações. O fotorrealismo é parcialmente sacrificado em favor da viabilidade computacional, e métodos empíricos comprovados são usados em lugar de modelos físicos.

A cena é encarada como uma coleção de polígonos que são recortados contra o volume de visualização, projetados e submetidos à conversão de varredura. Nessa última etapa, obtém-se um mapa de pixels que corresponde à melhor representação de cada polígono, dentro da resolução de imagem adotada. Em certos pixels ocorrerá superposição dos mapas gerados; nesse caso, o pixel deve ser colorido de acordo com o polígono mais próximo do observador.

Existem muitos algoritmos diferentes para eliminação de superfícies ocultas, mas a técnica mais usada é a da **memória de profundidade**. Esta é uma matriz em que cada elemento corresponde a um pixel da memória de imagem e contém inicialmente um valor correspondente à máxima profundidade representada no sistema.

No processo de elaboração, cada vez que é gerado um pixel de um polígono, a respectiva profundidade é calculada e comparada com o valor correspondente, já registrado na memória de profundidade. Se a profundidade for menor que a registrada, significa que se produziu um pixel correspondente a um ponto mais próximo ao observador que o ponto anterior. Nesse caso, o novo pixel substituirá o antigo na memória de imagem, e sua profundidade substituirá a profundidade registrada na memória de profundidade. O conteúdo da memória de profundidade constitui o canal **z**.

O processo de elaboração é, em princípio, realizado pelo editor, de forma que necessite de pouca ou nenhuma intervenção do usuário. O processamento da memória de profundidade, por exemplo, é normalmente transparente para o usuário. Graças a isso, é possível realizar processos de longas horas de elaboração durante a noite, ou em computadores ociosos de uma rede. Entretanto, para obter imagens de melhor qualidade, é necessário o controle fino de certos parâmetros dos algoritmos de elaboração.

A Figura 7.27 mostra uma imagem obtida por elaboração preliminar, usada para pré-visualização. A maioria dos parâmetros de elaboração é colocada no nível mais grosseiro, tendo como objetivo minimizar o tempo de elaboração para produzir uma imagem que será descartada posteriormente.



◀ Figura 7.27 Elaboração poligonal preliminar.

Modelos de Iluminação

Coloração

A elaboração produz para cada pixel uma especificação de cor, a que chamaremos **coloração** (*shading*). Nos modelos de iluminação usuais, o cálculo de cada canal de cor é independente, de modo que podemos tratar cada canal como um problema de coloração monocromática. O cálculo da coloração envolve dados de geometria, como a posição dos pontos, do observador e das fontes de luz; o material e a cor das superfícies; e a natureza e a cor das fontes de luz.

Fontes de luz

Os editores gráficos permitem ao projetista posicionar e determinar as características das fontes de luz, em geral usando metáforas baseadas na colocação de luzes, em um cenário real de filmagem. Fontes de luz podem ser dos seguintes tipos:

- **Pontuais**, consideradas pontos que emitem luz em todas as direções. São modelos adequados apenas para lâmpadas incandescentes, mas, por permitirem cálculos mais simples, são usadas como aproximações para outros tipos de fontes de luz.
- **Solares**, semelhantes às pontuais, mas que emitem raios paralelos, por estarem situadas a uma distância infinita, como ocorre com a luz solar.
- **Direcionais**, que emitem luz em determinadas direções preferenciais, como refletores, holofotes e lâmpadas de estúdio fotográfico.
- **Distribuídas**, que emitem luz a partir de uma área cujas dimensões não podem ser desprezadas, como as lâmpadas fluorescentes e as superfícies luminosas.

Na Figura 7.28, vê-se o resultado da elaboração de uma cena que utiliza uma luz pontual, refletida em alguns **pontos brilhantes** (*highlights*) do objeto. Na Figura 7.29, o nível de luminosidade da luz utilizada foi reduzido. O objeto fica mais escuro, embora a cor de seu material não tenha sido alterada. Na Figura 7.30, substituiu-se a luz pontual por uma luz direcional, do tipo refletor (*spotlight*). A parte do objeto situado dentro do cone do refletor recebe coloração mais clara.



Figura 7.28 Iluminação original.



Figura 7.29 Iluminação reduzida.



Figura 7.30 Iluminação de refletor.

O modelo de Phong

Cada ponto de uma cena pode receber luz de várias fontes, e a quantidade de luz refletida na direção do observador determinará sua coloração. Na elaboração poligonal, usa-se habitualmente o modelo de Phong, para cálculo da intensidade luminosa refletida. Esse modelo não é baseado em considerações físicas realistas e sim em fórmulas empíricas, que a prática tem mostrado ser um compromisso razoável entre custo de cálculo e qualidade da imagem. A intensidade da luz refletida é considerada a soma dos seguintes termos:

- **Iluminação ambiente**, que modela a contribuição das iluminações recíprocas de todos os objetos presentes. Tem valor constante para toda a cena. A ausência de iluminação ambiente torna as sombras completamente negras, como se não existisse atmosfera.
- **Iluminação difusa**, que modela a luz espalhada pelas minúsculas irregularidades presentes nas superfícies foscas. Depende do ângulo entre a normal à superfície e a direção da fonte de luz. A iluminação difusa é máxima para as superfícies perpendiculares à direção da luz e idealmente nula para as superfícies paralelas a essa direção.

- **Iluminação especular**, que modela a contribuição de superfícies brilhantes, que funcionam pelo menos parcialmente como espelhos. Depende do ângulo entre a normal à superfície e a direção da fonte de luz, tal como a reflexão difusa, mas também do ângulo entre a normal à superfície e a direção do observador. Como é conhecido da ótica física, a iluminação especular é máxima nos pontos em que a direção da fonte de luz e a direção do observador formam ângulos iguais com a normal à superfície nesse ponto.⁵

Cálculo da iluminação

Mesmo sendo uma aproximação, o modelo de Phong envolve o cálculo de funções transcendentes, que são computacionalmente pesadas. Além disso, em uma superfície curva, existiria o problema de calcular a normal em cada ponto, já que essa direção entra no cálculo dos termos difuso e especular. Os métodos práticos de iluminação procuram utilizar as propriedades da representação poligonal para minimizar o número de cálculos das equações de Phong, ao mesmo tempo que se produz a ilusão de curvatura, quando isso for desejado. O que distingue os vários métodos é a aproximação utilizada para o cálculo da normal.

Como vimos anteriormente, entendemos por normal de um polígono a direção perpendicular a seu plano (ou ao plano médio, no caso de um polígono não planar) e definimos a normal a um vértice como a resultante da composição das normais das faces adjacentes. Em ordem crescente de qualidade, usam-se os métodos descritos a seguir.

No método da **coloração chapada** (*flat*), a normal utilizada é a normal ao plano de cada polígono. Portanto, todos os pontos de cada face têm a mesma normal. As colorações variam bruscamente quando atravessamos arestas, e por isso esse método só é usado quando se quer destacar o caráter facetado de um objeto (Figura 7.31).

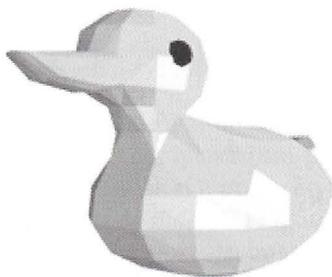


Figura 7.31 Coloração chapada.

Na **coloração de Gouraud**, as iluminações dos vértices são calculadas através de suas normais. As colorações dos demais pontos dos polígonos são determinadas por interpolação linear das colorações dos vértices. Esse é o método mais usado para a elaboração de superfícies curvas aproximadas por polígonos, pois a interpolação devolve a ilusão da curvatura. Por isso, estações de trabalho de alto desempenho costumam possuir, hoje em dia, algum tipo de acelerador em hardware para esse método. A Figura 7.32 ilustra esse método de cálculo, e a Figura 7.33 mostra uma imagem elaborada pelo método de Gouraud. Criou-se uma ilusão de curvatura, embora a silhueta do objeto denuncie sua origem poligonal.

⁵ O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

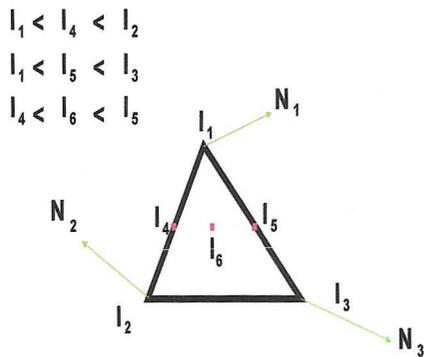


Figura 7.32 Cálculo da iluminação pelo método de Gouraud.



Figura 7.33 Imagem elaborada pelo método de Gouraud.

Na **coloração de Phong**, as normais dos vértices são interpoladas para cada ponto, e então as equações de Phong são aplicadas. Trata-se de um método computacionalmente mais caro que o método de Gouraud, mas que apresenta melhores resultados, principalmente quando há reflexões especulares. Não confundir a coloração de Phong com as equações de Phong, que fornecem um modelo de reflexão por ponto que pode ser usado também na coloração chapada e na coloração de Gouraud. A Figura 7.34 ilustra o esquema de cálculo da coloração de Phong.

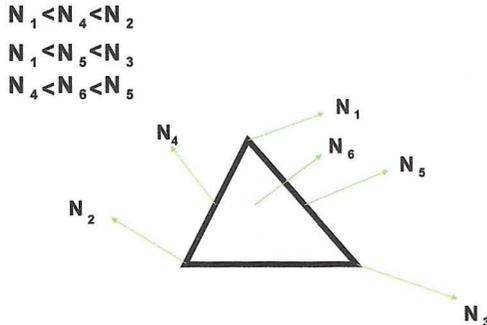


Figura 7.34 Cálculo da iluminação pelo método de Phong.



Figura 7.35 Imagem elaborada pelo método de Phong.

A Figura 7.35 mostra o resultado da elaboração de Phong. O grande ganho em relação ao método de Gouraud está na representação mais realista da reflexão especular. Note-se a diferença dos pontos brilhantes em relação à imagem anterior. A silhueta, entretanto, continua poligonal. Isso só pode ser resolvido pela criação de uma malha suficientemente fina, ou pela modelagem através de superfícies curvas.

Tabela 7.1 Comparação de técnicas de elaboração

Modelo	Qualidade	Aplicação
Chapado	Baixa	Pré-visualização, realce das facetas
Gouraud	Média	Uso normal
Phong	Alta	Melhor reprodução dos pontos brilhantes

Técnicas Fotorrealistas

Introdução

A elaboração poligonal pode ser completada por uma série de efeitos que visam a atingir um grau maior de fotorrealismo. Os métodos de realização dos efeitos mais usuais são em geral também aproximados, representando um compromisso entre custo computacional e realismo da imagem. Em alguns casos especiais, aplicam-se técnicas avançadas, que seguem mais de perto as regras da ótica física.

Texturas

As **texturas** são mapas de pixels bidimensionais que são aplicados a uma superfície para representar detalhes finos, projeções de imagens reais ou simplesmente decorações. Elas permitem efeitos muito atraentes, mas devem ser usadas com parcimônia, pois aumentam bastante o tempo de elaboração.

Na Figura 7.36, um mapa em forma de uma textura de bolas é aplicado sobre o objeto. Na Figura 7.37, é projetado um mapa formado pela imagem da Figura 7.12.



Figura 7.36 Aplicação de textura.



Figura 7.37 Aplicação de uma imagem.

A aplicação das texturas pode ser feita de acordo com diversos tipos de projeção. Na Figura 7.38, é projetada uma textura mais complexa (um padrão de folhas, retirado de um dos “papéis de parede” do Windows). Usa-se aí a **projeção planar**, que funciona como se a imagem fosse projetada por um projetor de *slides*. Na Figura 7.39, o mesmo mapa é aplicado por **projeção cilíndrica**: a projeção é feita como se a imagem fosse enrolada para formar um cilindro transparente, situado em torno do objeto.



Figura 7.38 Aplicação de textura planar.



Figura 7.39 Aplicação de textura cilíndrica.

Mapas de rugosidade

Nos **mapas de rugosidade** (*bump maps*), os “pixels” são usados para perturbar (adicionar pequenas variações) as normais à superfície, de modo a transmitir a sensação de rugosidade tridimensional. Na Figura 7.40, o quadro da Figura 7.12 é usado como mapa de rugosidade, para dar a sensação de um baixo-relevo. A silhueta, entretanto, denuncia que a tridimensionalidade simulada pelo mapa não é verdadeira (não corresponde à geometria do modelo).



Figura 7.40 Mapa de rugosidade.



Figura 7.41 Cena com dois objetos opacos.



Figura 7.42 Cena com efeito de transparência.

Transparências

Nas **transparências**, a coloração das superfícies mais próximas ao observador é misturada com a coloração de superfícies posteriores, para transmitir a sensação de superfícies feitas de materiais transparentes. A ilusão é apenas aproximada, pois não se imita o efeito de refração. Na Figura 7.41, mostra-se uma cena construída com dois objetos de superfícies opacas. Já na Figura 7.42, o material do pato adquiriu certo grau de transparência. Note-se que o cilindro não sofre distorção de refração.

Reflexos

Os reflexos entre objetos podem ser simulados por mapas de reflexão. Para obter-se esses mapas, a cena é projetada, usando-se uma das técnicas de coloração, na superfície de uma esfera ou cubo transparentes que envolvem o objeto refletor. As imagens resultantes dessas projeções são, por sua vez, aplicadas como texturas bidimensionais.

Sombras

A criação de sombras geralmente é aproximada por meio de **mapas de sombra**. Estes são mapas de profundidade (canal z) obtidos projetando-se a cena como se o observador estivesse na posição das fontes de luz. Pontos invisíveis a partir da posição de uma fonte de luz pontual estarão na sombra em relação a essa fonte, e não receberão a sua contribuição ao cálculo da iluminação.

Técnicas de base física

Os efeitos apresentados anteriormente representam aproximações satisfatórias na grande maioria das aplicações. Caso se necessite de alto grau de realismo na obtenção de reflexos, refrações e sombras, ainda que a custo computacional elevado, algumas técnicas mais avançadas de elaboração podem ser usadas.

Nos **modelos físicos de iluminação**, são consideradas as propriedades físicas das fontes de luz verdadeiras. As representações físicas da rugosidade das superfícies representam melhor a reflexão de luz que o modelo de Phong. A repartição das cores em maior número de canais produz efeitos mais realistas que a utilização do modelo RGB, que é uma simples aproximação do mecanismo perceptual humano, e não um atributo do mundo físico.

Os **modelos físicos das câmeras** levam em conta, ao contrário dos métodos mais simples de elaboração, as propriedades das câmeras reais. Enquanto as câmeras virtuais normais têm profundidade infinita de foco, pode-se simular o foco de câmeras reais através de efeitos da profundidade de campo da lente. A simulação do tempo finito de abertura do obturador introduz **borrões de movimento** (*motion blurs*), que contribuem para eliminar a pseudonímia de movimento.

O **rastreamento de raios** (*ray-tracing*) é uma técnica de elaboração em que os raios de luz são percorridos em sentido inverso, partindo do observador, caminhando rumo às fontes de luz, obedecendo às leis de reflexão e refração. O cálculo é complexo porque depende da computação das interseções de todos os raios com todos os objetos da cena, e porque as refrações e reflexões multiplicam o número de raios.

A técnica da **radiosidade** considera as trocas de energia luminosa difusa entre os objetos da cena, que são calculadas por meio de modelos termodinâmicos. O cálculo da radiosidade é extremamente pesado, porque as superfícies têm que ser divididas em pequenas áreas elementares e a influência mútua entre cada par de áreas elementares da cena tem que ser determinada. Entretanto, o cálculo independe da posição do observador, e portanto não precisa ser repetido quando apenas este se move.

Renderman

Renderman é uma especificação de interface de programas aplicativo (API), adquirida e difundida pela conhecida produtora de animações tridimensionais Pixar. A especificação descreve cenas tridimensionais, tal como PostScript descreve páginas bidimensionais (veja Capítulo 6). Com essa interface, os editores e modeladores tridimensionais podem produzir descrições de cenas que podem ser elaboradas por qualquer ferramenta de elaboração que implemente a interface, independentemente de que algoritmos de elaboração utilize. A linguagem, apresentada em [Upstill90], tem muitos elementos semelhantes aos de OpenGL, mas, enquanto esta visa à elaboração em tempo real, tipicamente para aplicações interativas como jogos, Renderman focaliza a elaboração fora de linha com alto grau de realismo, principalmente para filmes. Segundo o sítio da Pixar, todos os vencedores do Oscar de Efeitos Visuais dos últimos 15 anos utilizaram o Renderman.

Um elaborador compatível com Renderman deve ser capaz de realizar as seguintes operações:

- geração de primitivas gráficas;
- percorrer estruturas gráficas hierárquicas tridimensionais, com empilhamento de transformações;
- projeções paralelas e em perspectiva;
- eliminação de superfícies ocultas;
- filtragem e antipseudonímia de pixels;
- correção do gama e *dithering*;
- saída de imagens com canais de cor, transparência e profundidade;
- processamento de mapas de textura e de rugosidade;
- cálculos de iluminação, coloração e sombras.

A especificação inclui também efeitos avançados como modelos físicos de câmeras, sistemas de partículas e rastreamento de raios. Além dos métodos usuais de coloração, descritos anteriormente, os programadores Renderman podem escrever *shaders*, programas que podem implementar algoritmos quaisquer de coloração, escritos na Renderman Shading Language. Esses programas podem ser usados para realizar muitos efeitos especiais.

Modelos construídos com Blender, 3ds Max, Maya, Softimage e outros editores podem ser exportados para o formato **RIB**, utilizado para descrever cenas e animações dentro da especificação Renderman. A elaboração pode ser feita por um **elaborador** (*renderer*) compatível, como PhotoRealistic RenderMan, produto comercial da Pixar, ou **Pixie**, de software livre.

REALIDADE VIRTUAL

Visão Geral

Realidade virtual é um ambiente artificial oferecido pelo computador, apresentado a um usuário de forma a que se assemelhe o mais possível a um ambiente real. Sistemas de realidade virtual levam ao extremo a tecnologia de multimídia: modelos tridimensionais, animação e som espacializado são combinados a tecnologias avançadas de dispositivos gráficos de entrada e saída para aperfeiçoar a ilusão de realidade.

Os sistemas de realidade virtual mais avançados são imersivos, isto é, envolvem completamente a visão, a audição e, possivelmente, o tato do usuário, por meio de recursos como:

- monitores gráficos miniaturizados, colocados em óculos especiais ou capacetes, que apresentam uma imagem para cada olho, criando a ilusão de tridimensionalidade;
- dispositivos que monitoram as ações do usuário, como óculos e capacetes que sentem os movimentos da cabeça;
- sensores de tato, como luvas e trajes sensores, possivelmente com feedback de força, que fornece a ilusão de solidez dos objetos virtuais (dispositivos **hápticos**).

Os sistemas mais avançados de realidade virtual ainda são muito caros e restritos ao mundo da pesquisa avançada e de aplicações de alta tecnologia. Entretanto, versões não imersivas e de baixa resolução são disponíveis, inclusive através da WWW. **Mundos virtuais**, por exemplo, são formas de teleconferência em que os membros do grupo partilham um modelo tridimensional, participando, por exemplo, de um jogo, uma simulação ou um experimento. Os participantes são identificados por ícones especiais (os **avatares**). A limitação das faixas de passagem das redes não é tão restritiva, pois os modelos tridimensionais residem e são

elaborados nas máquinas clientes; em um jogo, só é preciso transmitir os comandos que representam as interações entre os parceiros.

Linguagens

VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) foi a primeira linguagem padronizada de grande difusão, utilizada para representar modelos tridimensionais usados em realidade virtual. Essa é uma linguagem textual, que descreve a geometria e outros parâmetros necessários para a elaboração das cenas e animações tridimensionais, como iluminação, coreografia, som e até scripts para interação. Por ser uma linguagem padronizada, o mesmo modelo pode ser usado através de diferentes visualizadores, que são os responsáveis pela elaboração nas máquinas clientes. Os visualizadores podem funcionar como aplicativos independentes ou podem ser instalados como suplementos (*plug-ins*) dos navegadores.

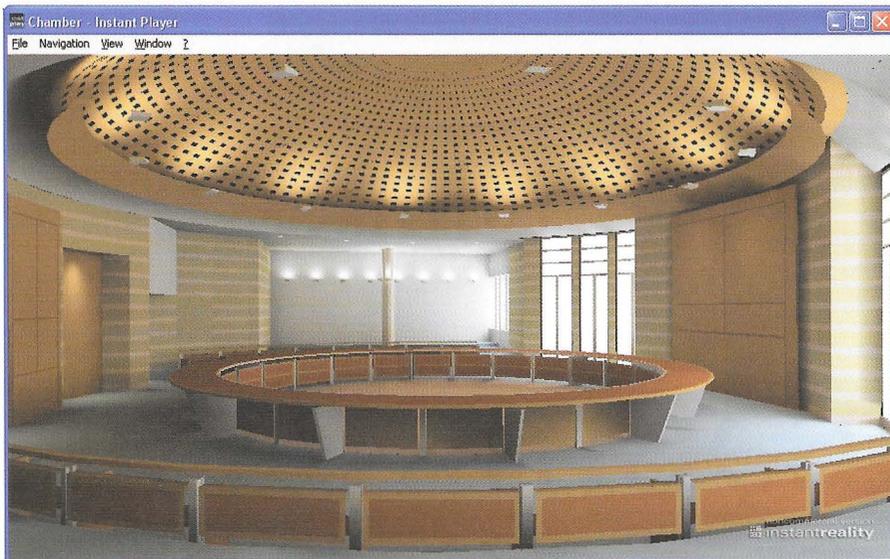


Figura 7.43 Tela do Cosmo Player.

Os arquivos VRML são chamados de **mundos** e têm a extensão **WRL**, com um formato de texto simples ou comprimido (nesse caso, o texto pode ser extraído por ferramentas que suportem o formato ZIP). Além de visualizados em um navegador, os arquivos podem ser importados em um editor tridimensional, como na Figura 7.2. Uma tela do visualizador Octaga Player foi mostrada na Figura 7.23. A Figura 7.43 mostra a mesma cena visualizada no Instant Player. Os visualizadores dispõem de diferentes modos de navegação pela cena, descritos por termos como *caminhar*, *voar* e *olhar para*.

X3D é o formato padronizado pela ISO como sucessor de VRML, compatível com XML. Além dos recursos disponíveis em VRML, suporta recursos adicionais, como NURBS e H-Anim (*Humanoid Animation*), padrão ISO para modelagem e animação de figuras humanoides. A Figura 7.44 mostra uma visualização de um modelo X3D da **Chaleira de Utah**, um dos modelos mais tradicionais da computação gráfica, usado comumente para testar elaboradores e visualizadores. A Figura 7.45 mostra uma animação de uma figura humanoide. A Figura 7.46 mostra um exemplo de visualização técnica (uma molécula de colesterol).



Figura 7.44 Modelo X3D da Chaleira de Utah.

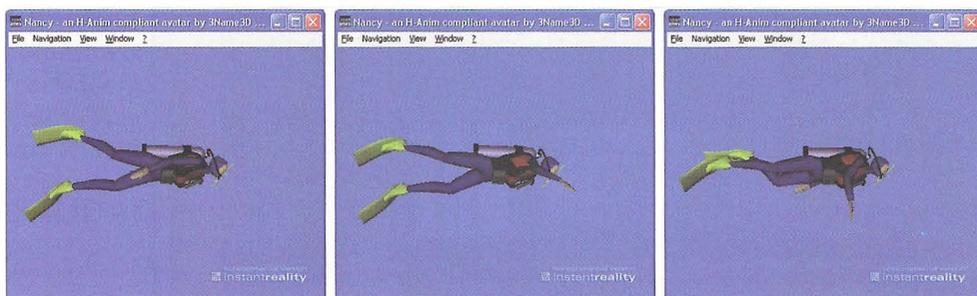


Figura 7.45 Animação humanoide X3D.

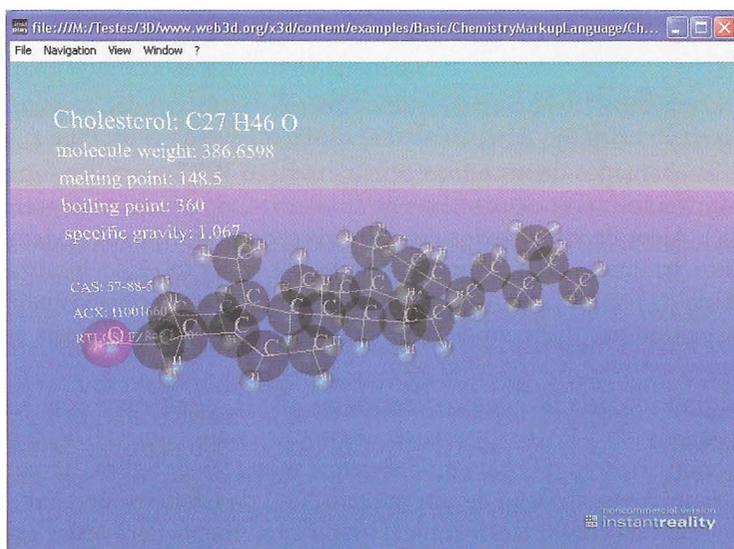


Figura 7.46 Visualização em química.