

Cálculo da Iluminação através de Ray-tracing Estocástico

SERGIO GONZALO BESUIEVSKY¹
LÉO PINI MAGALHÃES²

¹Grupo de Computação de Imagens
Departamento de Engenharia de Computação e
Automação Industrial
UNICAMP-Faculdade de Engenharia Elétrica
CP-6101 13081-970 Campinas-SP
¹gonzalo@dca.fee.unicamp.br
²leopini@dca.fee.unicamp.br

Abstract. The stochastic ray-tracing method simulates the transport of luminous energy by tracing rays in a stochastic fashion. By treating the propagation of light in a probabilistic way, this method was developed with the aim of implementing it for problems of light distribution. It suggests a good solution when dealing with the scattering phenomena that occur in the propagation and reflection of light. We implemented this method as an extension to a traditional ray tracer. In this way effects of penumbræ and blurred reflection are included in the generation of realistic images.

1 Introdução

Em Síntese de Imagens realistas, nosso objetivo principal é desenvolver métodos para gerar imagens tridimensionais que simulem cenas reais. Cada ponto da imagem representa a intensidade luminosa vinda da cena, que chega na direção do observador. Esta intensidade é produzida pela interação da luz com os objetos, sendo calculada a partir de modelos de iluminação que são desenvolvidos com base nas leis da Física que descrevem esta interação.

O algoritmo de ray tracing é uma das técnicas mais poderosas de *rendering*, pois além de ser um algoritmo de visualização, pode resolver, de forma efetiva e relativamente simples, a representação de vários fenômenos, como sombras, reflexão e refração. O algoritmo tradicional [17] é baseado numa técnica de amostragem pontual, surgindo portanto, problemas de aliasing na representação dos pixels, assim como certas limitações na resolução de fenômenos que envolvem cálculos de integrais para sua representação. Este é o caso no fenômeno de espalhamento que ocorre na propagação e reflexão de luz. A técnica de ray tracing estocástico, inicialmente denominada por Cook de ray tracing distribuído [6], propõe uma solução geral a este tipo de problemas: distribuindo raios em forma estocástica, as integrais são calculadas por métodos de Monte Carlo.

Uma extensão ao ray tracing estocástico foi sugerida por Kajiya [10] para resolver a *equação de rendering*, que descreve o transporte de energia luminosa entre superfícies, de forma geral e fundamen-

tada no princípio de conservação de energia. Nos últimos anos esta extensão tem sido combinada com o método de radiância, nos chamados algoritmos de dois passos, que apresentam, até o momento, a maneira mais correta de modelar todos os mecanismos de transporte de energia luminosa entre superfícies num ambiente. Desta forma, os métodos estocásticos têm-se tornado um assunto de real interesse na pesquisa de novas soluções para o cálculo da iluminação.

No presente trabalho a técnica de ray tracing estocástico aplicada a um modelo global de iluminação foi abordada para a sua implementação no ambiente ProSIma (Prototipação e Síntese de Imagens Foto-Realistas e Animação), um projeto desenvolvido no grupo de Computação de Imagens do DCA/FEE/UNICAMP [1] [13]. Mediante esta implementação, podem ser representados, na geração de imagens, efeitos de espalhamento de luz tais como penumbra e reflexão borrosa.

2 A questão da iluminação

A maneira mais correta de descrever a intensidade luminosa que chega a um observador é em termos da radiância, que é a quantidade em unidades radiométricas à qual o olho humano é sensível.

Dado um ponto P numa determinada superfície e um observador, a radiância neste ponto que sai na direção ψ_s do observador (figura 1), pode ser dividida em duas componentes: uma de emissão e outra de reflexão.

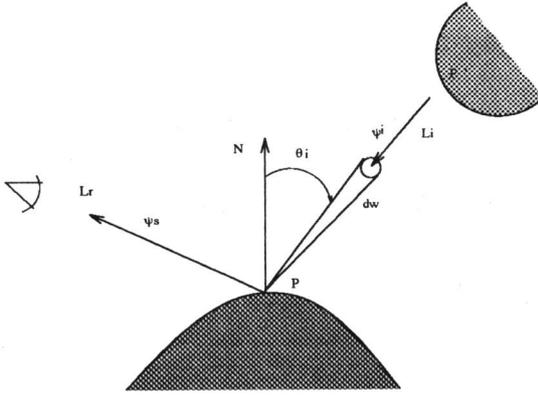


Figura 1: Geometria da equação de *rendering*.

$$L_t = L_e + L_r \quad (1)$$

onde L_e é a radiância emitida, que depende das características da superfície, e L_r é a radiância refletida, que é deduzida a partir da definição da Função de refletância bidirecional (FRBD) [9].

Considerando uma radiância incidente na direção ψ_i , a radiância refletida em P , na direção ψ_s é:

$$dL_r(P, \psi_s) = \rho(P, \psi_i, \psi_s) L_i(P, \psi_i) \cos \theta_i dw \quad (2)$$

onde L_i é a radiância incidente de uma fonte num ângulo sólido dw na direção ψ_i .

Considerando todas as direções no hemisfério superior ao ponto P da superfície que tenham contribuição na radiância incidente, sejam vindas de fontes de iluminação ou de outras superfícies, para calcular a radiância total refletida, devemos integrar no espaço destas direções. Portanto, a radiância total será:

$$L_t(P, \psi_s) = L_e(P, \psi_s) + \int_{\Omega} \rho(P, \psi_i, \psi_s) L_i(P, \psi_i) \cos \theta_i dw \quad (3)$$

Esta é a equação geral da iluminação, introduzida em Síntese de Imagens por Kajiya [10] como equação de *rendering*, e conhecida como equação de transporte do calor na literatura de transferência de calor [16]. Esta equação apresenta uma natureza recursiva, o que faz que a sua solução seja complexa de ser obtida. Vários métodos tem sido desenvolvidos para seu cálculo, tanto em problemas de transferência de calor como em Síntese de Imagens. Uma interessante análise teórica sobre as distintas soluções pode ser encontrada em [4].

3 Ray-tracing estocástico

O método de ray-tracing [17], fundamentado na óptica geométrica, simula o processo de iluminação lançando raios que seguem o caminho da luz nas direções em que esta se propaga no ambiente. Uma forma mais apurada de modelar o transporte de energia luminosa é considerar densidades de raios (ao invés de raios com direções precisamente estabelecidas), e tratar a sua propagação de forma probabilística. O método de ray-tracing estocástico pode ser enfiado desta maneira. Inicialmente denominado de ray-tracing distribuído, este método surgiu como uma extensão ao ray-tracing tradicional, para simular alguns efeitos luminosos:

- Simulação de fontes extensas: Distribuindo raios nos ângulos sólidos das fontes de iluminação pode ser simulado o efeito de penumbras.
- Reflexão especular espalhada: Distribuindo raios segundo a função de distribuição do fluxo refletido pode ser simulado o espalhamento da reflexão especular em superfícies rugosas, observado como reflexão borrada.
- Refração espalhada: Distribuindo raios segundo a função de distribuição do fluxo transmitido pode ser simulado o efeito de translucência, observado como transparência borrosa.

Considerando um modelo de câmera de lente fina, Cook incluiu, por meio deste método, efeitos utilizados em fotografia como profundidade de campo e borrão de movimento (*motion blur*). O primeiro é simulado amostrando a área de uma lente fina e o segundo, incluindo a dimensão do tempo e amostrando também neste espaço.

Apresentamos a seguir os fundamentos teóricos do ray-tracing estocástico e a sua aplicação a dois problemas de distribuição luminosa: fontes extensas de iluminação e reflexões especulares em superfícies rugosas.

3.1 Teoria

A idéia fundamental da técnica de ray-tracing estocástico é o tratamento de problemas de integração por métodos de Monte-Carlo. De acordo com estes métodos [14], a integral multidimensional que determina o valor da intensidade do pixel, pode ser aproximada a partir de várias amostras distribuídas de forma aleatória no espaço do pixel.

3.1.1 Integração de Monte Carlo

Tradicionalmente, a intensidade de cada pixel, é calculada de forma independente para cada componente RGB (vermelho, verde e azul). A intensidade em cada uma destas componentes, pode ser expressa como uma integral múltipla no espaço do pixel [11]:

$$C = \int_A L(X)d(X) \quad (4)$$

onde $L(X)$ é a função de radiância no espaço da imagem e A é a área do pixel.

A função do integrando, $L(X)$, pode ser expressa como o produto de duas funções:

$$L(X) = F(X).P(X) \quad (5)$$

onde $F(X)$ é uma função que depende da energia luminosa e $P(X)$ uma função de peso (ou filtro) que é o produto das várias funções de peso correspondentes a cada efeito em particular que está sendo tratado, como filtros bidimensionais para tratar problemas de *aliasing* ou funções de distribuição em fenômenos de espalhamento de luz.

Na integração de Monte Carlo, X é considerada como uma variável aleatória com densidade de probabilidade $P(X)$, a qual deve obedecer as seguintes condições:

$$P(X) \geq 0 \quad \forall X \in \mathcal{R}^n \quad \text{e} \\ \int P(X) dX = 1$$

Nestas condições, a intensidade do pixel, C , na equação 4, é o valor esperado de $F(X)$,

$$C = \mathbf{E}(F(X)).$$

Portanto, dado um conjunto $\{X_i\}$ de N amostras da variável aleatória X , que tem densidade de probabilidade $P(X)$, podemos estimar estatisticamente o valor de C , calculando o valor esperado de $F(X)$. Para um número suficientemente grande de amostras, pode ser demonstrado que [14]:

$$\mathbf{E}(F(X)) = \frac{1}{N} \sum_i^N F(X_i) \quad (6)$$

Uma medida estatística da diferença entre o valor estimado e o valor da integral é a variância. Para avaliar o valor estimado um teste estatístico deve ser feito. Determinando um limiar do erro estatístico a partir de um dado intervalo de confiança, devemos tomar uma quantidade de amostras suficiente, de maneira que o erro seja menor que o limiar.

Uma forma de reduzir a variância (e portanto o erro) é escolhendo a função de densidade de probabilidade $P(X)$ de forma tal que contenha os fatores de maior peso da integral. Desta forma, $P(X)$ terá um comportamento similar ao de $L(X)$ (equação 5) e a amostragem terá maior densidade nas regiões de maior variância de $L(X)$.

Uma demonstração rigorosa dos conceitos apresentados nesta seção, pode ser achada em [14].

3.1.2 Amostragens

Uma questão muito importante no método de Monte Carlo é a escolha das amostras nos espaços de integração. A integral da equação (4) a ser calculada, envolve vários espaços bidimensionais como a área do pixel, as áreas das fontes de luz ou as direções dos raios refletidos. O objetivo é distribuir as amostras em cada um destes espaços de forma tal que a integral seja aproximada corretamente e utilizando o menor número de amostras, pois no ray-tracing o tempo computacional aumenta linearmente com o número de raios lançados.

Foi sugerido ([5]) como padrão de amostragem ideal, a distribuição do disco de Poisson, em que as amostras são distribuídas de forma aleatória, mas com a restrição de que devem manter uma distância mínima umas das outras. O maior problema desta distribuição está em que o custo computacional torna-se alto, com o aumento da distância mínima e do número de amostras. Varias estratégias de amostragem foram sugeridas para simular esta distribuição. A forma mais comum de aproximar esta distribuição é dividindo o espaço em regiões e tomando amostras de forma aleatória em cada região. Esta forma de amostragem, denominada *jittering* [5], está baseada no conceito de amostragem por estratificação (*stratified sampling*), em que o espaço é dividido em regiões (estratos) visando uma redução da variância, e portanto uma otimização na convergência do método de integração.

3.2 Aplicação a problemas de distribuição luminosa

Apresentamos a seguir uma aplicação de ray tracing estocástico a dois problemas de distribuição luminosa: simulação de fontes extensas de iluminação e efeito de espalhamento em reflexões especulares.

3.2.1 Fontes extensas

A simulação de fontes extensas de iluminação gera o efeito de penumbra quando a luz é parcialmente bloqueada por objetos. A radiância refletida num

ponto de uma superfície, devida a uma fonte, pode ser calculada a partir da equação (2):

$$L_r = \int_{\omega} \rho L_i \cos \theta_i dw \quad (7)$$

onde ω é o ângulo sólido formado pela fonte na direção do ponto. Para simplificar o problema, consideramos o caso de uma fonte de geometria esférica, de emissão constante L_i e distante da superfície. Deste modo a fonte pode ser aproximada por um disco de radiância constante quando "vista" por um ponto da superfície.

3.2.2 Reflexão especular rugosa

As superfícies especulares rugosas tem a sua componente especular distribuída em torno da direção de reflexão, e não inteiramente concentrada nesta direção como em superfícies especulares perfeitas. O efeito de espalhamento na reflexão, ocorre devido a esta distribuição da energia luminosa refletida podendo ser observado como reflexões borradas que se atenuam com o aumento da distância entre os objetos.

Segundo o modelo de reflexão de Cook e Torrance [7] a função de refletância bidirecional pode ser dividida em duas componentes: uma especular e outra difusa.

$$\rho = s \cdot \rho_s + d \cdot \rho_d \quad \text{com } s + d = 1 \quad (8)$$

onde s e d são os coeficientes da proporção de cada componente.

Considerando apenas a componente especular da reflexão na equação (3), a radiância refletida num ponto da superfície é:

$$L_r = s \int_{\Omega} \rho_s L_i \cos \theta dw \quad (9)$$

onde Ω é o hemisfério superior à superfície. Na verdade, esta integral só é significativa num pequeno ângulo sólido em torno da direção de reflexão, devido à acentuada distribuição direcional da função de refletância bidirecional ρ_s . Vários modelos que descrevem ρ_s são apresentados na literatura ([12], [3], [7]).

A figura 2 ilustra a técnica de ray-tracing estocástico aplicada à simulação de fontes extensas e ao cálculo da reflexão especular espalhada. Nesta figura, 4 amostras por pixel são tomadas de forma estocástica. O algoritmo mantém a mesma estrutura do ray tracing tradicional para cada raio lançado, mas acrescentando a informação da distribuição que deve ser seguida pelo raio no caminho de seu percurso.

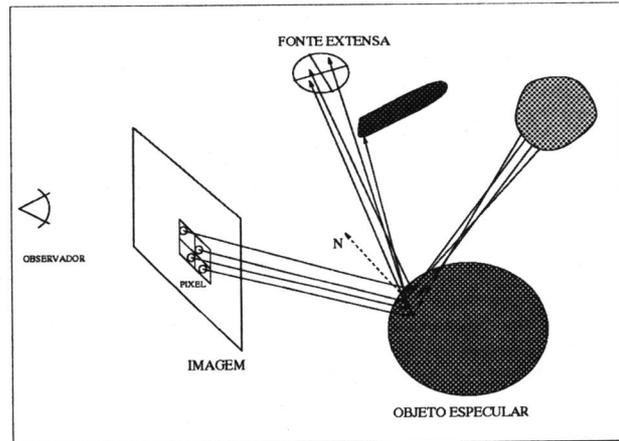


Figura 2: Ray-tracing estocástico com 4 raios por pixel.

4 Implementação

O método de ray-tracing estocástico descrito foi implementado como extensão a um ray tracer tradicional. Duas questões podem ser apontadas como de maior importância na implementação deste método: a determinação das funções de distribuição e o método de amostragem. As funções de distribuição são calculadas integrando as respectivas densidades de probabilidade, que são escolhidas de forma a conter os fatores de maior peso da integral (veja seção 3.1.1). Detalhes dos cálculos podem ser encontrados em [2]. Descrevemos a seguir o método de amostragem.

4.1 O método de amostragem

Como método de amostragem, utilizamos a estratégia de *N-Rook* (*N-torres*) [15]. Mediante esta, os estratos de cada dimensão são associados em forma aleatória, mas de modo que cada linha ou coluna contenha apenas uma amostra. A figura 3 mostra um exemplo de 5 amostras distribuídas no espaço do pixel usando esta estratégia.

Utilizamos esta estratégia numa forma adaptativa [2]. Esta adaptatividade visa aumentar a eficiência do cálculo, de modo a que mais amostras sejam tomadas nas regiões mais "críticas" da imagem, ou seja, as regiões em que a função de intensidade tem maior variância.

Dado um número N de amostras por pixel, nosso objetivo é distribuí-las da melhor forma possível em cada espaço de integração. O problema aqui tratado envolve cálculo de integrais em vários espaços bidimensionais: a área do pixel, a área das fontes e direções de reflexões especulares. Cada espaço tem dimensões independentes, portanto, podem ser amos-

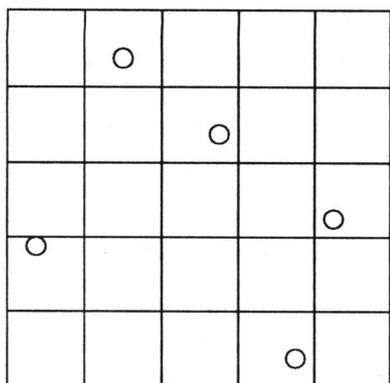


Figura 3: Padrão N -rook de 5 amostras no espaço do pixel.

trados como variáveis aleatórias independentes. Dividindo cada dimensão de cada espaço em N regiões estes espaços podem ser mapeados a grades de N^2 regiões. Mediante permutações, são gerados padrões em cada espaço, e associados entre si também por permutações, de forma a garantir que não haja correlação entre diferentes espaços. A figura 4 ilustra esta idéia com dois padrões N -rook de espaços bidimensionais.

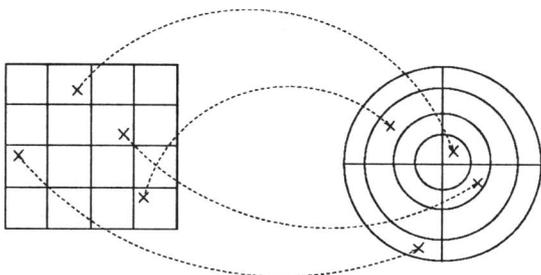


Figura 4: Associação de espaços

Toda vez que seja necessário re-amostrar o espaço, novos padrões de N amostras são formados, rotacionando as linhas (ou as colunas) de cada espaço. Desta forma, o espaço estará inteiramente amostrado após N rotações, tendo um número máximo de N^2 amostras. A figura 5 mostra uma seqüência de padrões de amostragens num espaço bidimensional, após 3 rotações de colunas o espaço estará inteiramente amostrado. Dentro de cada estrato (ou região) é tomada uma amostra em forma aleatória com distribuição uniforme. Como teste de adaptatividade, utilizamos a variância, para avaliar estatisticamente a validade de uma certa medida. O processo de amostragem pára quando a variância é menor que um determinado limiar.

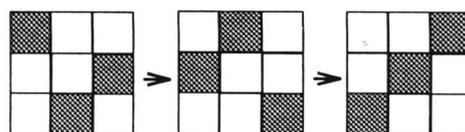


Figura 5: Rotação de um padrão de amostragem.

4.2 Materiais

Um objetivo importante na geração de imagens realistas é simular materiais de forma a que apresentem aparência real. Um problema que surge na maioria dos modelos de iluminação é o da escolha dos parâmetros do modelo, que é difícil de ser associada com as medidas reais das superfícies. Os diversos tipos de materiais podem ser agrupados em classes, segundo as características que precisam ser especificadas para sua representação. Dividimos os materiais em quatro classes: condutores (muito especulares, em geral metais), dielétricos (em geral transparentes), lambertianos (materiais puramente difusos) e materiais compostos (superfícies pintadas ou esmalgadas). Desta forma, definindo uma classe de material, apenas as características importantes devem ser atribuídas. Como modelo de reflexão utilizamos o de Cook e Torrance [7].

5 Resultados

As seguintes figuras foram geradas com o ray-tracing estocástico descrito. A cena da figura 8 está iluminada por duas fontes, uma pontual e outra estensa. As superfícies dos objetos foram definidas utilizando a classificação dos materiais descrita na seção anterior. A cuia é definido como uma superfície lambertiana (puramente difusa), a bomba é um material condutor (foi simulada com os parâmetros do alumínio) e a mesa é um material composto especular com rugosidade.

O efeito de reflexão especular espalhada, descrito na seção 3.3, pode ser observado em superfícies especulares rugosas. O grau de espalhamento da reflexão é caracterizado pela rugosidade da superfície. As figuras 6 e 7 apresentam uma superfície deste tipo (o chão), simulada com distintos graus de rugosidade. Com o aumento da rugosidade perde-se a nitidez na reflexão. As figuras 9 e 10 apresentam outros exemplos em que podem ser observados os efeitos de penumbra e reflexão borrosa. Todas as imagens foram geradas com uma amostragem inicial de 5 amostras por pixel, o que permite, como descrito na implementação, um máximo de 25 amostras por pixel nas regiões mais críticas.

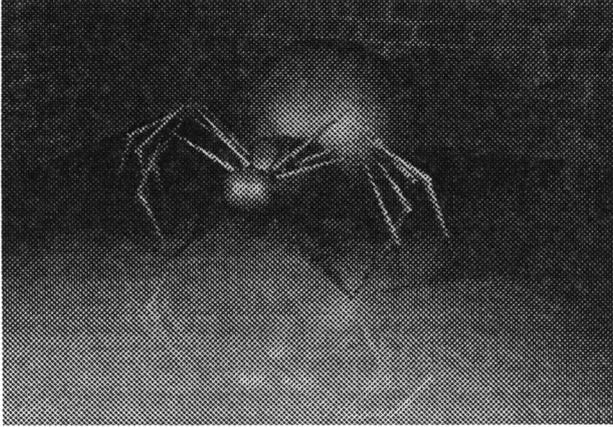


Figura 6: Simulação de superfície especular pouco rugosa.



Figura 7: Simulação de superfície especular muito rugosa.

6 Conclusão

A técnica de ray tracing estocástico foi implementada para sua aplicação em problemas de distribuição luminosa que não podem ser resolvidos pelo algoritmo tradicional.

A escolha e o controle da amostragem são as principais questões no emprego de métodos estocásticos para cálculo de integrais. Conhecendo-se as funções de distribuição que descrevem um determinado problema, podemos aplicar a idéia de amostragem em importância, em que as amostras são tomadas com maior densidade onde a probabilidade é maior.

Esta técnica pode ser estendida a outros problemas. Na simulação de efeitos de fotografia, podem ser gerados efeitos de profundidade de campo, borrão de movimento e *zooming* [6] [8], e no cálculo da iluminação pode ser aplicada ao problema da interreflexão difusa [15].

7 Agradecimentos

Gostariamos de agradecer a todos os integrantes do ProSIma que diretamente ou indiretamente colaboraram na elaboração deste trabalho, em particular a Jorge Diz pela participação em discussões e aporte de idéias, e a Luciana Silveira pela criação do modelo da aranha utilizado nas figuras 6 e 7.

Referências

- [1] C. Banwart et al. Prosin - projeto em síntese de imagens. *SIBIGRAPI '89*, page 395, 1989.
- [2] S.G. Besuievsky. Cálculo da iluminação em síntese de imagens através de ray-tracing estocástico. *Dissertação de Mestrado, Instituto de Física-UNICAMP*, 1992.
- [3] J. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *ACM Siggraph*, 11:192 - 198, 1977.
- [4] C. Bouville et al. A theoretical analysis of global illumination models. *Workshop on Rendering*, pages 679-694, 1991.
- [5] R. Cook. Stochastic sampling in computer graphics. *ACM Transaction on Graphics*, 5(1):51-72, 1986.
- [6] R. Cook, T. Porter, and L. Carpenter. Distributed ray tracing. *ACM Siggraph*, 18(4):165-174, 1984.
- [7] R. Cook and K. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Siggraph*, 15(3):307-316, 1981.

- [8] J. Diz et al. Simulation of photographics lenses and filters for realistic image synthesis. *Compu-graphics '91*, pages 197 – 204, 1991.
- [9] W. Driscoll. *Handbook of Optics*. McGraw-Hill, New York,N.Y., 1978.
- [10] J. Kajiya. The rendering equation. *ACM Siggraph*, 18(4):165–174, 1986.
- [11] M. Lee, R. Redner, and S. Uselton. Statistically optimized sampling for distributed ray tracing. *ACM Siggraph*, 19(3):61–68, 1985.
- [12] T. P. Phong. Illumination for computer generated images. *Communications of the ACM*, (18):311–317, 1975.
- [13] M. Queiroz and L.P. Magalhaes. O método radiosidade em um ambiente de síntese de imagens foto-realísticas. *SIBIGRAPI '91*, pages 157 – 166, 1991.
- [14] R. Rubinstein. *Simulation and the Monte-Carlo method*. John Wiley & Sons, New York,N.Y., 1981.
- [15] Peter Shirley. Physically based lighting calculation for computer graphics. *Phd thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign*, 1990.
- [16] R. Siegel and J.R. Howell. *Thermal Radiation Heat Transfer*. McGraw-Hill, New York,N.Y., 1981.
- [17] T. Whitted. An improved illumination model for shaded display. *Communications of the ACM*, 23(6):343–349, 1980.

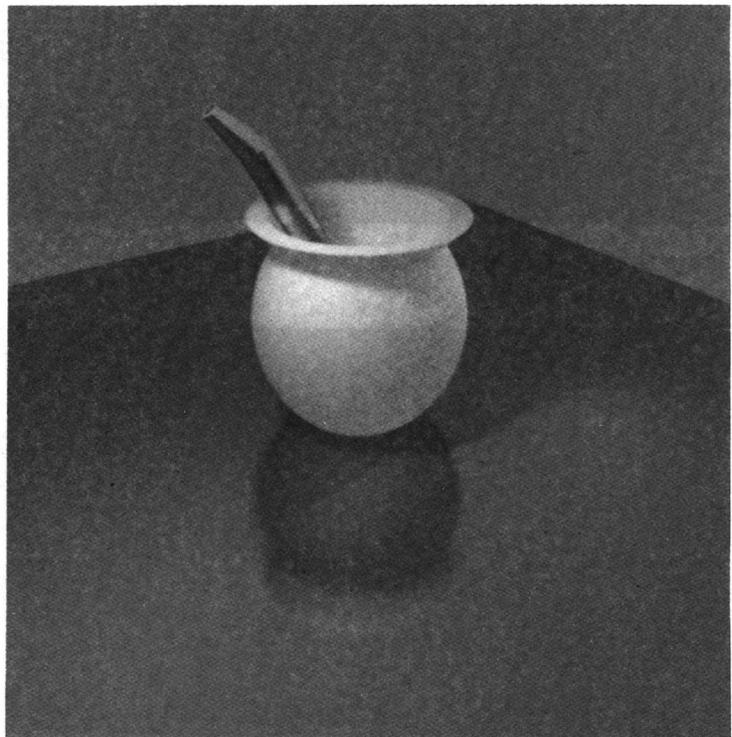


Figura 8: Chimarrão.

Figuras a cores no final, a partir da página 349

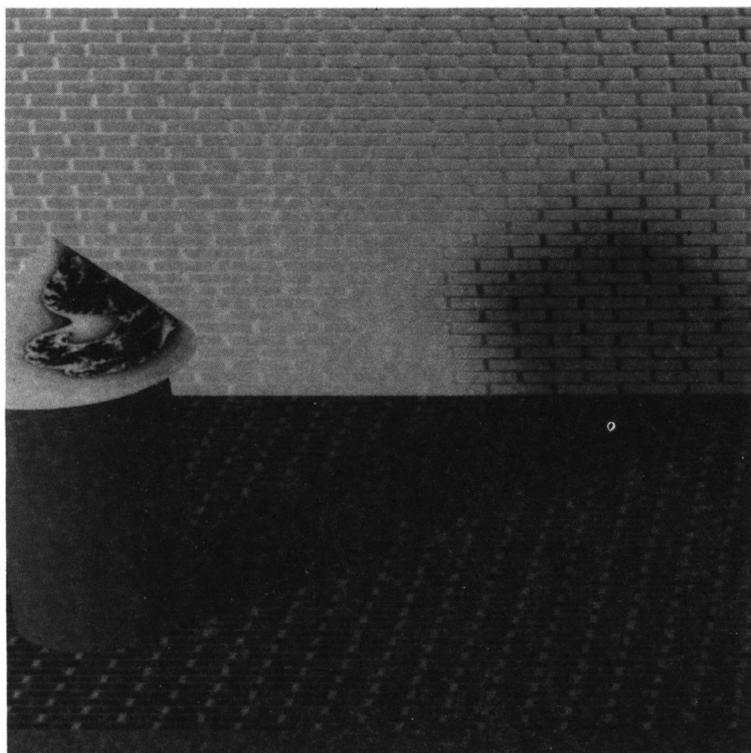


Figura 9: Efeito de penumbra provocado por fonte extensa.

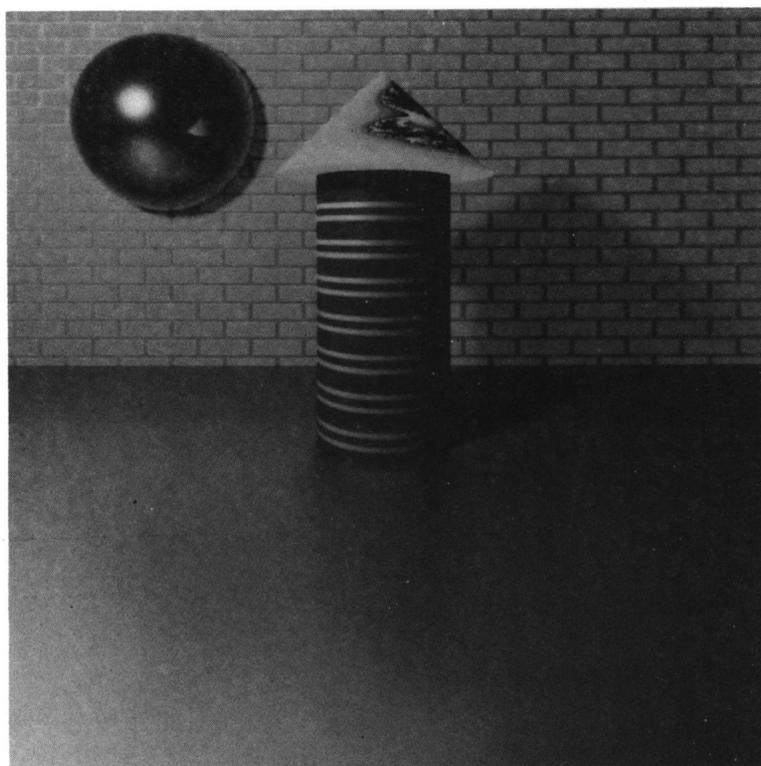


Figura 10: Poste: imagem gerada com um máximo de 25 amostras por pixel.

Figuras a cores no final, a partir da página 349