

Simulação da luz natural: combinação dos algoritmos de *raytracing* e radiosidade e aplicações na Arquitetura

*Simulation of natural lighting: combination of raytracing
and radiosity algorithms and applications in Architecture*

Aloísio Leoni Schmid

Resumo

Este artigo apresenta o sistema MESTRE para a simulação da propagação da luz, com aplicação no ambiente construído. O sistema foi desenvolvido pelo autor na linguagem Java, com o intuito de criar uma ferramenta de alta portabilidade para o ensino em laboratório e à distância. O sistema permite acesso à discussão conceitual e de eficiência dos procedimentos de simulação. Em breve revisão da teoria a respeito, as equações básicas de projeção de objetos no plano são apresentadas. A metodologia de cálculo de luminância, que combina os algoritmos de *raytracing* e de radiosidade, é explicada. A produção de texturas diversas é mencionada. Alguns exemplos demonstram possíveis e promissoras aplicações.

Palavras-chave: iluminação; simulação; conforto; eficiência energética.

Abstract

This article describes the MESTRE system for the simulation of light propagation, and its application in the built environment. The system was developed by the author in the Java language with the aim of creating a highly portable tool for teaching both in laboratory and on distance learning. The system provides access to discussions on concepts and also on the efficiency of the simulation procedures. On a brief review of the theoretical framework, basic equations for projecting objects on a surface are presented. Further, the methodology for calculating lighting, combining raytracing and radiosity procedures is explained. The production of diverse textures is mentioned. Some examples show possible and promising applications.

Keywords: lighting, simulation, comfort, energy efficiency.

Aloísio Leoni Schmid
Departamento de Arquitetura
e Urbanismo Programa de
Pós-Graduação em
Construção Civil-
Universidade Federal do
Paraná, Caixa Postal 19011
CEP 81531-990 Curitiba, PR
- Brasil
Tel.: (41) 361 3069
E-mail: iso@ufpr.br

Recebido em 14/07/04
Aceito em 07/11/04

Introdução

A simulação da propagação da luz natural associada à modelagem tridimensional de sólidos tem tido cada vez mais aplicações. Notável é a produção de maquetes arquitetônicas e a geração de efeitos especiais no cinema, para citar somente alguns.

Pacotes prontos, como o *Radiance*, desenvolvido pelos Laboratórios Lawrence Berkeley e apresentado por Ward (1994), têm facilitado o uso das aplicações finais e podem desencorajar o domínio dos métodos utilizados para a modelagem físico-matemática dos fenômenos envolvidos.

A simulação da propagação da luz requer conhecimentos sólidos de geometria analítica, álgebra linear, ótica, computação e, ainda, iluminação na Arquitetura.

No intuito de resgatar a dimensão didática dessa atividade, optou-se por desenvolver uma ferramenta própria, da qual se pudesse explicar cada parte. Isso inclui diversos tópicos básicos no ensino de Engenharia e Arquitetura.

Revisão bibliográfica

O método *raytracing* é uma das técnicas mais utilizadas na Computação Gráfica para a produção de imagens realistas. Consiste na determinação de valores de luminância (medida em blondel ou Candela por m^2) para os *pixels* que, na tela, compõem uma figura, através da varredura em sentido inverso do percurso percorrido pela luz até cada fonte primária. Diferentes algoritmos podem ser utilizados para se localizarem tais fontes. Algumas referências a respeito são Kajiya (1986) e Ward et al. (1988).

Uma extensa bibliografia tem sido produzida a respeito. Um trabalho de revisão que abrange referências relevantes é o de Watt (1996), que discute os diferentes problemas computacionais existentes entre a simples renderização (simulação empírica), baseada em modelos locais de iluminação, e a geração de imagens realistas mediante consideração da iluminação global e das inter-relações entre os objetos.

Observadas restrições de representação na tela do computador, o método de *raytracing* permite de maneira exata a modelagem da reflexão da luz em superfícies especulares. Já no caso de superfícies difusamente reflexivas, como uma parede em pintura fosca, esta modelagem se torna mais complicada. É necessária uma discretização dos infinitos raios de luz que, desde cada fonte, são espalhados por tais superfícies.

Ashdown (1996) chama o procedimento de percorrer somente os raios necessários à geração de uma imagem realista de *Monte Carlo raytracing*, numa alusão ao método computacional mais genérico.

O método de Monte Carlo procura, por amostragem, determinar o comportamento de conjuntos de variáveis aleatórias. O nome é inspirado na cidade do principado de Mônaco conhecida por seus cassinos, onde a roleta é um gerador de números aleatórios. O método também é chamado de amostragem estocástica. Embora o princípio já fosse conhecido, foi viabilizado com o advento do computador eletrônico. Ao se tentar construir uma imagem plana a partir de um número finito de raios de luz em arranjo matricial – devido à estrutura da tela do computador – que são rastreados, ocorre de fato uma prática de amostragem. Entretanto, esta pode ser utilizada para viabilizar, em tempo computacional factível, o conhecimento das relações recíprocas entre os objetos, fontes primárias e secundárias de luz num modelo.

Kim (1989) apresentou um estudo de iluminação natural e aproveitamento de luz natural em *canyons* urbanos, em procedimento numérico similar ao *raytracing*.

Um sistema em que a modelagem de sólidos é utilizada para a determinação das horas de insolação recebidas em cada fachada, em diferentes andares de um edifício alto, de acordo com os parâmetros urbanísticos de afastamento mínimo entre as edificações, taxa de ocupação do terreno e coeficiente de aproveitamento (relação entre a área total construída e a área do terreno), foi apresentado em Schmid (2001a). Um sistema equivalente, como módulo de um sistema maior voltado para a simulação térmica de edificações, foi implementado em Java e apresentado em Schmid (2001b). Uma primeira aplicação do mesmo sistema de modelagem de sólidos para a simulação de propagação da luz foi apresentada por Schmid (2002).

O problema da reflexão difusa é tratado com maior propriedade pelo método da radiosidade, que considera a distribuição da luz dada por uma equação de conservação de energia. Uma referência a respeito é o sistema apresentado em Siggraph (1993). Ashdown (1996) apresenta o método da radiosidade como uma generalização do método de *raytracing*.

No presente artigo é apresentado um desenvolvimento dos trabalhos anteriores do autor

aqui citados, desta vez incluindo a modelagem de luz difusa segundo o método da radiosidade.

Descrição do modelo

A tela do computador é tratada como se fosse a janela através do qual o observador vê o mundo virtual, por detrás da tela. Até mesmo a distância entre o observador e a tela é levada em consideração para maior realismo.

A imagem construída como perspectiva, vista nas simulações, não passa da intersecção entre os raios de luz que chegam à retina do observador e o plano da tela. Como nesta as imagens são representadas em *pixels*, estes se tornam as menores unidades que fazem sentido representar na discretização.

Um ponto P ($P.X, P.Y, P.Z$) no espaço é visto por um observador cujo olho está em O ($O.X, O.Y, O.Z$) (Figura 1). A visão está dirigida de acordo com o vetor o , dado por

$$o = P - O = (P.X - O.X, P.Y - O.Y, P.Z - O.Z). \quad (1)$$

A tela do computador está sobre um plano a dado por

$$aX + bY + cZ + d = 0, \quad (2)$$

que contém o ponto P_0 , origem das coordenadas x_{dc} e y_{dc} .

O vetor normal ao plano α é $n(a, b, c)$ e é dado por

$$n = P_0 - O. \quad (3)$$

Dá-se a n a dimensão de 0,5 m, a distância prevista entre o olho do observador, em O , e P_0 na tela. A representação de P em a é dada pela intersecção da reta dada pela forma paramétrica

$$O + t(P - O) = O + to, \quad (4)$$

e o plano α , dado por sua equação acima citada.

A solução requer a determinação do parâmetro t da fórmula

$$t = \frac{aO.X + bO.Y + cO.Z + d}{D_{P,O} n \cdot o} \quad (5)$$

Com t se encontra o ponto de intersecção, P' , dado por

$$P' = O + to \quad (6)$$

Em α , ainda, existem as direções dadas por x' , horizontal, e y' , vertical, que definem eixos de um sistema de coordenadas plano em que acontecem as projeções.

As coordenadas de P' no plano α da tela são dadas por

$$P'.X' = (P' - P_0) \cdot x \quad (7)$$

$$P'.Y' = (P' - P_0) \cdot y \quad (8)$$

que, após a operação de escala, constituirão as coordenadas de dispositivo do ponto P :

$$x_{dc}(P) = P'.X' F_e \quad (9)$$

$$y_{dc}(P) = P'.Y' F_e \quad (10)$$

$$F_e = \text{mínimo} \left(\frac{N_{p,x}}{W}, \frac{N_{p,y}}{H} \right) \quad (11)$$

onde

F_e = fator de escala;

$N_{p,x}$ = resolução horizontal da tela (ou janela) em *pixels*;

$N_{p,y}$ = resolução vertical da tela (ou janela) em *pixels*;

W = largura real da tela ou janela (m); e

H = altura real da tela ou janela (m).

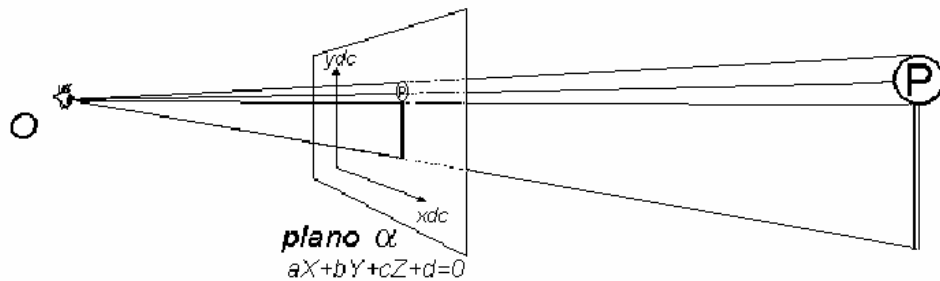


Figura 1 - Produção da perspectiva sobre a tela α a partir do olho do observador O

Cada *pixel* visível na tela do computador pertence a uma figura geometricamente definida. Segue, portanto, em cada ponto P_i uma relação previsível entre as coordenadas (X_i , Y_i e Z_i), e também há uma direção normal bem definida. Ainda, cada *pixel*, representando um material (no caso de intersecção, aquele material de que é feito o ponto real representado pelo ponto central do *pixel*) também é dotado de absortividade, refletividade e transmissividade, três características com especificidade espectral (para cada cor do espectro assumem um valor; o sistema RGB é adotado para simplificar a representação).

Isso torna possível a representação, para cada *pixel*, da luz total incidente, num sistema de equações. O *pixel* i,j recebe luz das fontes primárias e secundárias, e a reflete:

$$\begin{aligned} E_i - L_2 Ff_{2,i} - L_3 Ff_{3,i} - \dots - L_j Ff_{j,i} - \dots - L_N Ff_{N,i} &= Ed_i + Lp_i \\ -L_1 Ff_{1,i} + E_2 - L_3 Ff_{3,2} - \dots - L_j Ff_{j,2} - \dots - L_N Ff_{N,2} &= Ed_2 + Lp_2 \quad (12) \\ \dots & \\ -L_1 Ff_{1,i} - L_2 Ff_{2,i} - \dots + E_i + \dots - L_j Ff_{j,i} - \dots - L_N Ff_{N,i} &= Ed_i + Lp_i \\ \dots & \\ -L_1 Ff_{1,N} - L_2 Ff_{2,N} - \dots - L_j Ff_{j,N} - \dots - L_N Ff_{N,N} + E_N &= Ed_N + Lp_N \end{aligned}$$

onde:

L_i é a luminância da superfície i ;

$Ff_{i,j}$ é o fator de forma da superfície i em relação a j : é a fração que a superfície i ocupa no hemisfério unitário sobre o ponto P de j , multiplicada pelo produto interno entre o vetor normal à superfície j e o vetor que une P ao $P_{m,i}$ (centro da superfície i);

E_i é a iluminação sobre a superfície i ;

$E_{p,i}$ é a luminância própria da superfície i , multiplicada por π ; e

$E_{d,i}$ é o acréscimo ao nível de iluminação em i devido às fontes primárias de luz.

Se este sistema for resolvido, inicialmente, para o ponto central de cada superfície e, depois, pelo ponto P de cada *pixel* a ser representado na tela, e ainda três vezes (uma para componente R , G e B), e ainda as luminâncias assim obtidas normalizadas de acordo com o grau de contraste disponível para visualização, é obtida uma imagem realista da cena representada.

A parte mais complicada e dispendiosa dos cálculos é o cálculo dos fatores de forma, que representam frações que cada superfície ocupa no hemisfério unitário de outra, tomada no ponto considerado. O hemisfério é tomado de modo discretizado: a cada ponto chega um número finito de raios de luz, cada qual representando uma porção do hemisfério. Estes raios são perseguidos no seu sentido inverso, registradas as reflexões ocorridas, até encontrar uma fonte de luz primária (sol, céu ou lâmpada) ou secundária (superfície iluminada com características de reflexão difusa). Superfícies com transmissividade maior que zero têm sua participação computada em duas partes: uma delas, refletida, e a outra, transmitida.

Ocorre aqui um dilema. Se os raios são gerados com regularidade (por exemplo, a cada 90° de azimute, e a cada 20° de altura), ocorrerá a formação de padrões de sombra irreais. Se houver uma rotação do conjunto de raios de um fator aleatório, aplicando-se o princípio do método de Monte Carlo, surgirá na figura um componente de ruído que, ao disfarçar as sombras citadas, faz surgir uma textura irreal.

A Figura 2 ilustra a geração aleatória de raios dentro de uma divisão do hemisfério virtual, em malha de 5×5 .

Texturas

Algumas texturas foram desenvolvidas para, sobre uma mesma figura geométrica, representarem padrões conhecidos de variação das propriedades óticas – absortividade, transmissividade e refletividade em cada um dos componentes R , G e B . Elas incluem:

- (a) madeira;
- (b) tacos em madeira;
- (c) alvenaria de tijolos;
- (d) pastilhas cerâmicas;
- (e) esquadrias metálicas;
- (f) fachadas com janelas em intervalos regulares;
- (g) ruas e calçadas; e
- (h) globo terrestre (resolução de um *pixel* para cada par de longitude e latitude).

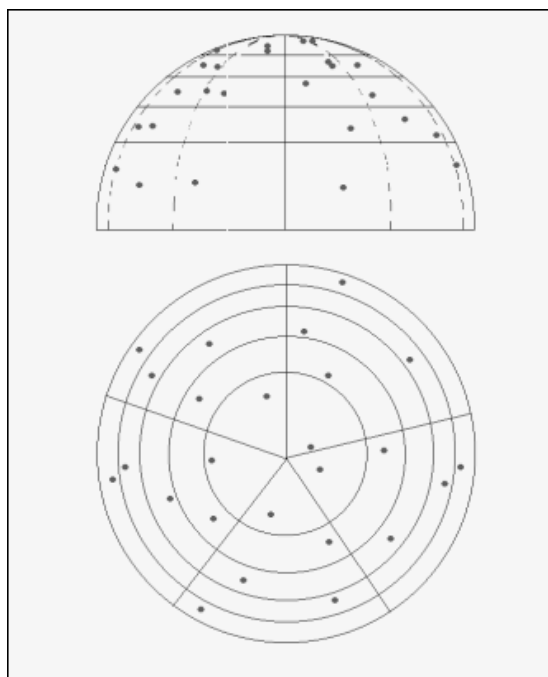


Figura 2 - Discretização do hemisfério num exemplo em 5x5 raios: no alto, elevação, e, abaixo, vista em planta do hemisfério

Exemplos

Texturas

A ilustração a seguir demonstra o uso de diferentes texturas: madeira de duas variedades (mesa e lápis), globo terrestre e nuvens. Repara-se que a janela em vidro ao mesmo tempo reflete a face ensolarada do globo e transmite a imagem do céu com nuvens.

A representação da Terra, no globo sobre a mesa na Figura 3, é possível mediante uma textura feita especialmente para coordenadas esféricas. A Figura 4 demonstra o que é possível mediante o posicionamento de uma esfera de acordo com os movimentos de rotação e translação da Terra relativos ao Sol.

Sala de aula

Seja a edificação plana, de único cômodo (uma sala de aula), com telhado em meia-água com caída para o norte, e janela principal para o norte. O revestimento das paredes é em tijolos aparentes e o teto e as vigas têm cor branca. O chão é em madeira escura. (Figura 5)

Iluminação zenital

O exemplo a seguir é o de um espaço hipotético, de planta retangular, superfícies em concreto, iluminado unicamente por iluminação zenital. Esta última tem o formato alongado na direção leste-oeste. Diferentes imagens produzidas às 15h00 do dia 21 de junho, equivalente ao solstício de inverno, mostram a parede de face oeste que, assim como a parede de face sul, tomam sol direto à tarde. Esta simulação representa uma localidade à latitude de 25° sul, portanto abaixo do trópico de Capricórnio.

A Figura 7 mostra, em perspectiva, como é este espaço.

A sequência de imagens (Figura 8) reproduz aproximações sucessivas obtidas aumentando-se o número de raios de direção aleatória dentro de limites traçados no hemisfério unitário, de modo a representar contribuições iguais à iluminação sobre o plano considerado.

O acréscimo do esforço computacional é proporcional ao número de raios em que se discretiza o hemisfério virtual visível desde cada *pixel* que faz parte da imagem. Se a imagem obtida pela combinação $2 \times 2 = 4$ raios é bastante carregada de ruído, as imagens obtidas pela combinação $12 \times 12 = 144$ raios e $18 \times 18 = 324$ raios já são nítidas.

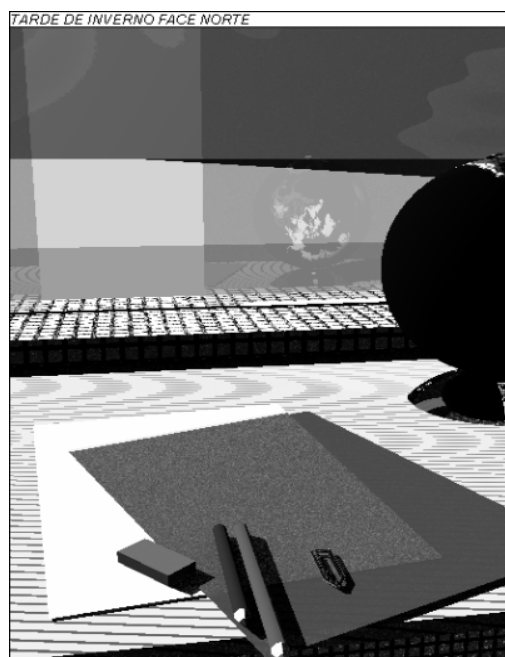


Figura 3 - Uso de texturas

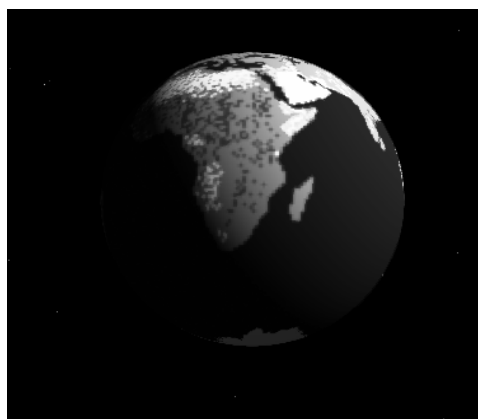


Figura 4 - Textura representando o globo terrestre

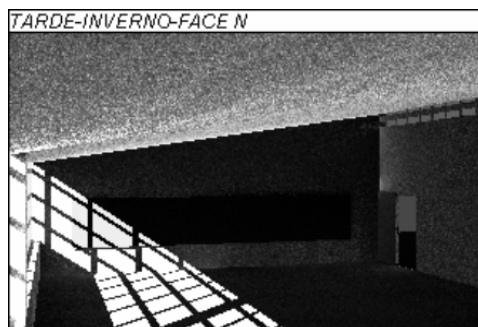


Figura 5 - Sala de aula de face N em tarde de inverno (vista dos fundos)



Figura 6 - Sala de aula de face N em tarde de inverno (vista da frente)

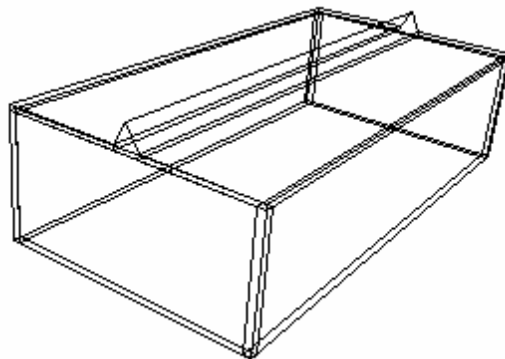


Figura 7 - Espaço em concreto com iluminação zenital

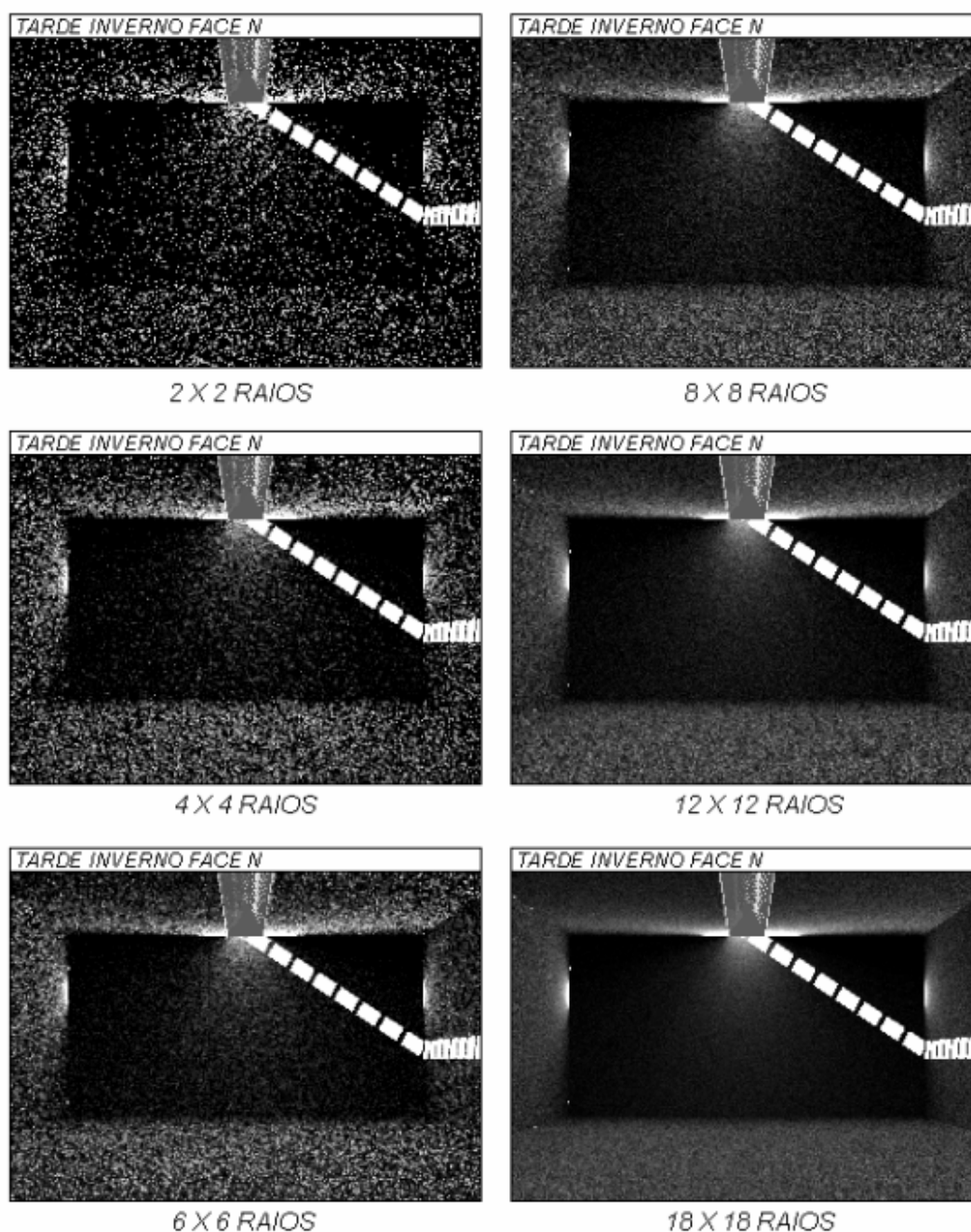


Figura 8 - Simulação em ambiente com iluminação zenital

Considerações finais

A reprodução da reflexão direta da luz, assim como da incidência da radiação solar, é uma tarefa complexa, contudo pouco demandante de tempo de computação. Já a reprodução da reflexão difusa da luz, que acontece entre as diferentes superfícies, corresponde à parcela mais dispendiosa em termos de tempo de computação. Futuramente, é necessária a continuação deste trabalho, de modo a

utilizar recursos de interpolação que, mediante algum sacrifício da exatidão dos cálculos, forneçam em tempo significativamente mais curto imagens de qualidade comparável, senão melhor.

O autor pretende colocar o programa, numa versão para testes, à disposição tão logo tenha asseguradas as medidas de proteção de propriedade intelectual, finalizado a documentação de utilização do programa e, enfim, obtido êxito nas técnicas de

interpolação, com vistas à maior agilidade do processamento.

Referências

ASHDOWN, Ian. Lighting for architects.

Computer Graphics World, Tulsa, v. 19, n. 8, p. 38-41, 1996.

KAJIYA, James T. The rendering equation.

Computer Graphics, New York, v. 20, n. 4, p. 143-150, 1986.

KIM, Jong-Jim. Daylighting in a Hot Arid Area.

In: BUILDING SIMULATION. 1989, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: International Building Performance Simulation Association, 1989. p. 88-93.

SCHMID, Aloisio Leoni. Daylighting and insolation in high-density urban zones: how simulation supported a new law in Curitiba. In: BUILDING SIMULATION. 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: International Building Performance Simulation Association, 2001a.

_____. Simulação de desempenho térmico em múltiplas zonas: MESTRE: um sistema brasileiro na linguagem Java. In: ENCONTRO NACIONAL, 6., e ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3., 2001, São Pedro. **Anais...** São Pedro: ENCAC, 2001b.

_____. Iluminação para a segurança pública.

Engenharia e Construção, Curitiba, n. 66, p. 20-25, 2002.

SIGGRAPH. Disponível em:

<http://www.siggraph.org/education/curriculum/projects/slide_sets/slides93/53_93.htm>. Acesso em: 17 set. 1993.

WARD, Gregory J.; RUBINSTEIN, Francis M.;

CLEAR, Robert D. A ray tracing solution for diffuse interreflection. **Computer Graphics**, New York, v. 22, n. 4, p. 85-92, 1988.

WARD, Gregory J. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. **Computer Graphics Proceedings: Annual Conference Series**, 1994. New York, p. 459-472, 1994.

WATT, Allan. Rendering techniques: past, present and future. **ACM Computing Surveys**, Baltimore, v. 28, n. 1, p. 157-159, Mar. 1996.