

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM PROJETOS
DE ILUMINAÇÃO INTERNA

Thais Borges Sanches Lima

**Salvador - Ba
Agosto, 2003**

USO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM PROJETOS
DE ILUMINAÇÃO INTERNA

Thais Borges Sanches Lima

Orientador
Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Salvador, 04 de agosto de 2003

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: **THAIS BORGES SANCHES LIMA**

Dissertação defendida e aprovada em 18 de agosto de 2003

Prof. Dr. **ARIVALDO LEÃO DE AMORIM** (orientador)
Faculdade de Arquitetura – Universidade Federal da Bahia

Dra. **ROSÂNGELA MARIA SOUZA TENÓRIO**
Pesquisador Associado – Programa de Pós – Graduação em Arquitetura e
Urbanismo - Universidade Federal da Bahia

Prof. Dr. **HEITOR DA COSTA SILVA**
Pesquisador – Programa de Pesquisa e Pós – Graduação em Arquitetura da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

***“Não há obstáculo intransponível”,
não há vitória sem luta,
não há limite para quem tem
a capacidade de sonhar...”***

(autor desconhecido)

À minha família,
que sempre me apoiou
incondicionalmente.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Arivaldo Leão de Amorim pelo apoio e disposição na orientação do trabalho.

Aos membros da banca, Dra. Rosângela Maria Sousa Tenório e Prof. Dr. Heitor da Costa Silva pelo incentivo e sugestões apresentadas.

Aos meus pais, pela confiança depositada e pelas oportunidades a mim dadas durante toda a minha vida.

A Fabiano, pelo incentivo e compreensão durante toda a trajetória acadêmica e o carinho a mim dedicado nos períodos em que mais precisei.

Aos colegas e professores do LCAD – Laboratório de Computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho da Faculdade de Arquitetura da UFBA, pelo apoio e estrutura disponibilizados.

Ao LACAM – Laboratório de Conforto Ambiental da Faculdade de Arquitetura da UFBA, pelo auxílio prestado e utilização de equipamentos.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa concedida para a realização do curso.

A todos que de alguma maneira colaboraram com esse trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho analisa o uso da tecnologia computacional no desenvolvimento de projetos de iluminação, de forma a antever possíveis problemas e testar alternativas de solução visando alcançar um melhor desempenho da obra. Para isso, o estudo fundamentou-se na aplicação de ferramentas para a simulação de aspectos quantitativos e qualitativos dos efeitos da iluminação sobre o ambiente construído. A metodologia empregou procedimentos teóricos e experimentais, sendo embasada no estudo das características e finalidades da simulação computacional e dos modelos aplicados a esse objetivo, dos métodos de cálculo e análise da iluminação e das ferramentas de simulação. Foram realizados testes em programas específicos para validar resultados, identificar limitações de uso das ferramentas, e ainda permitir uma análise comparativa dos mesmos sob seus vários aspectos. O conjunto de experimentos realizados visou verificar o uso das ferramentas em estudos sobre a interferência da iluminação no ambiente; as características da iluminação natural com a modificação das dimensões, posicionamento e tipo das aberturas; as conseqüências da especificação de materiais com diferentes atributos para um mesmo espaço; e sobre o uso integrado da iluminação natural e artificial em ambientes internos. As ferramentas de simulação constituem importante recurso na avaliação do desempenho de projetos de iluminação, pois permitem testar alternativas de solução a baixo custo e propiciam a visualização dos efeitos da luz sobre os ambientes internos. Como resultado, apresenta-se um conjunto de procedimentos para a aplicação das ferramentas na projeção da iluminação e no ensino das disciplinas de conforto ambiental. Com isso espera-se auxiliar o projetista para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e eficazes, em tempos de escassez de energia e da necessidade iminente de sua conservação. Dessa forma, o estudo da simulação computacional vem potencializar a prática projetual do arquiteto ajudando-o a resolver problemas, gerar e validar alternativas, optando por aquelas fundamentadas em dados comparados.

PALAVRAS CHAVE: simulação computacional, projeto de iluminação, ferramentas de simulação.

ABSTRACT

This thesis deals with the application of computer technology in the development of lighting design. It aims to predict possible problems and test design solutions to enable better performance. The study was based on the application of computer tools to simulate the quantitative and qualitative aspects of lighting design within the built environment. The methodology used theoretical and experimental procedures, based in the characteristics and purposes of computer simulation and it analyzed the calculation methods and evaluated lighting simulation tools. Tests in specific programs had been carried out to validate results, to identify its limitations of use, and also to allow a comparative analysis of such tools under its various circumstances. The set of experiments aimed to test the use of these tools to evaluate the influence of lighting within the built environment; considering modifications on dimensions, positioning and type of openings. In addition it was verified the consequences of materials specification and it was evaluated the integrated use of daylighting and artificial lighting of internal spaces. The simulation tools are important elements in the evaluation of lighting design; as they allow the test of alternatives at low costs and enable the visualization of such design alternatives at internal spaces. As a result, it was presented a set of procedures to be used during lighting design and also within disciplines such as environmental comfort. Consequently, this study is expected to help designers in the development of more efficient solutions, concerned with lighting design and energy conservation. In addition, the study of computer simulation tools improves the practical design of architects, helping them to solve problems, to generate and to validate alternatives, choosing those that are based on extensive and comparative data.

KEY WORDS: computer simulation, lighting design, simulation tools.

SUMÁRIO

Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xvi
Lista de siglas e abreviaturas	xvii
Introdução	1
Justificativa	5
Objetivo	9
Estrutura do trabalho	11
Capítulo 1 – A Iluminação no Projeto de Arquitetura	13
1.1 Iluminação natural	15
1.2 Cálculo da iluminação natural	21
1.3 Iluminação artificial	30
1.3.1 Lâmpadas	32
1.3.2 Luminárias	34
1.4 Métodos de cálculo de iluminação artificial	38
1.5 O processo de projeto de arquitetura e de iluminação	42
1.5.1 O processo de projeto	43
1.5.2 O projeto de iluminação	45
1.6 A percepção e o projeto de iluminação	47
Capítulo 2 – Modelos e Simulação Computacional	51
2.1 Modelos	53
2.1.1 A modelagem geométrica tridimensional	61
2.2 Simulação computacional	63
2.3 Possibilidades e aplicações da simulação em Arquitetura e Urbanismo	66
Capítulo 3 – Simulação da Iluminação	69
3.1 Características gerais e classificação das ferramentas	70
3.2 Tecnologias e algoritmos para simulação lumínica	75
3.2.1 Fontes luminosas	75

3.2.2	Modelo de reflexão	77
3.2.3	Modelos de iluminação	81
3.3	Elementos complementares	94
3.3.1	A cor	94
3.3.2	Atributos dos materiais	100
3.3.3	Grandezas luminosas	101
3.4	As ferramentas para simulação de iluminação	102
3.4.1	Ferramentas existentes	105
3.4.2	As ferramentas empregadas	109
 Capítulo 4 – Experimentação, Análise e Discussão		 113
4.1	Materiais e métodos	115
4.2	Descrição dos ensaios, análise e discussão	120
4.3	Análise de discussão dos resultados	178
4.4	Avaliação das ferramentas	181
 Considerações Finais		 184
	Recomendações para aplicação em projetos (procedimentos)	186
	O uso da tecnologia de simulação no ensino de Arquitetura	187
	Conclusões	188
	Desdobramentos e Trabalhos Futuros	190
 Bibliografia		 191
	Referências bibliográficas	192
	Fontes na Internet	200
 Apêndices		
	Apêndice A – Programas analisados	201
	Apêndice B - Diagrama de fluxo de dados nas ferramentas de simulação	226
	Apêndice C - Glossário	228
 Anexos		
	Anexo A – Tabela e gráficos diversos utilizados no cálculo de iluminação	232

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- 1.1 Diagrama do Percurso Aparente do Sol para Salvador – Latitude 13° Sul
- 1.2 Máscara de Sombra
- 1.3 Transferidor auxiliar utilizado para a confecção da Máscara de Sombra
- 1.4 Superposição da máscara de sombra sobre o Diagrama Solar
- 1.5 Condição de iluminação da abóbada celeste
- 1.6 Diagrama de representação da iluminação natural em superfícies horizontais – Diagrama de Pleijel
- 1.7 Diagrama de Contribuição Relativa para céu claro e altitude solar de 15°
- 1.8 Superposição da máscara de obstrução sobre o DCRL
- 1.9 Diagrama com fatores de forma
- 1.10 Representação da iluminação em um ambiente através do Diagrama Isolux
- 1.11 Sistema de iluminação geral
- 1.12 Sistema de iluminação direcional
- 1.13 Sistema de iluminação localizada
- 1.14 Sistema de iluminação local
- 1.15 Curva de distribuição da intensidade luminosa horizontal e vertical
- 1.16 Classificação das luminárias segundo a radiação do fluxo luminoso
- 1.17 Divisão do ambiente a ser iluminado nas três cavidades básicas
- 1.18 Determinação do ângulo horizontal
- 1.19 Determinação do ângulo vertical

Capítulo 3

- 3.1 Reflexão difusa
- 3.2 Reflexão especular

- 3.3 Determinando os volumes de umbra e penumbra
- 3.4 Interações da luz no modelo de iluminação local
- 3.5 Interações da luz no modelo de iluminação global
- 3.6 Imagem sintética obtida pelo modelo difuso
- 3.7 Imagem sintética obtida pelo modelo de Phong
- 3.8 Cálculo dos raios refletidos e transmitidos
- 3.9 Imagem sintética obtida pelo modelo Ray Tracing
- 3.10 Imagem sintética obtida pelo modelo de Radiosidade
- 3.11 Imagem sintética obtida pelo modelo de Radiância
- 3.12 Espectro eletromagnético mostrando as bandas de comprimento de onda principais e a banda correspondente à luz visível
- 3.13 Espaço de cor RGB
- 3.14 Espaço de cor CMY
- 3.15 Espaço de cor HSV
- 3.16 Espaço de cor HSL

Capítulo 4

- 4.1 Ambiente com iluminação artificial
- 4.2 Indicação dos pontos de medição e das fontes de luz artificial
- 4.3 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento A
- 4.4 Valores medidos e valores obtidos na simulação
- 4.5 Imagem do ambiente simulado em falsa cor
- 4.6 Ambiente real iluminado artificialmente
- 4.7 Simulação da iluminação artificial no Lightscape
- 4.8 Ambiente com iluminação natural
- 4.9 Pontos de medição dos níveis de iluminamento natural
- 4.10 Valores medidos e obtidos na simulação da iluminação natural as 9:00 horas
- 4.11 Ambiente às 9:00 horas

- 4.12 Simulação da iluminação natural às 9:00 horas através do Lightscape
- 4.13 Simulação da situação existente
- 4.14 Indicação das fontes de luz artificial e dos pontos de medição
- 4.15 Simulação da iluminação artificial existente
- 4.16 Simulação da iluminação artificial proposta
- 4.17 Simulação da iluminação natural às 10:00 horas
- 4.18 Simulação da iluminação natural com uso de persianas
- 4.19 Simulação da iluminação natural, com uso de persiana, integrada à iluminação artificial
- 4.20 Distribuição do iluminamento para o ambiente estudado
- 4.21 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento D
- 4.22 Indicação das fontes de luz artificial e dos pontos de medição
- 4.23 Dimensões e distribuição das aberturas propostas no experimento
- 4.24 Simulação da iluminação – Fachada 01 às 9:00 horas
- 4.25 Simulação da iluminação – Fachada 01 às 17:00 horas
- 4.26 Simulação da iluminação – Fachada 02 às 9:00 horas
- 4.27 Simulação da iluminação – Fachada 02 às 17:00 horas
- 4.28 Simulação da iluminação – Fachada 03 às 9:00 horas
- 4.29 Simulação da iluminação – Fachada 03 às 17:00 horas
- 4.30 Simulação da iluminação – Fachada 04 às 9:00 horas
- 4.31 Simulação da iluminação – Fachada 04 às 17:00 horas
- 4.32 Simulação da iluminação – Fachada 05 às 9:00 horas
- 4.33 Simulação da iluminação – Fachada 05 às 17:00 horas
- 4.34 Iluminação natural as 9:00 horas
- 4.35 Iluminação natural as 17:00 horas
- 4.36 Simulação da iluminação natural às 17:00 horas e a solução integrada no mesmo horário

- 4.37 Imagens simuladas da iluminação natural da fachada 03 as 17:00 horas e a solução integrada de iluminação artificial e natural no mesmo horário, respectivamente
- 4.38 Imagens simuladas da iluminação natural da fachada 05 as 17:00 horas e a solução integrada de iluminação artificial e natural no mesmo horário, respectivamente
- 4.39 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento E
- 4.40 Posicionamento dos pontos de medição dos níveis de iluminância
- 4.41 Simulação da iluminação natural – Alternativa 1
- 4.42 Simulação da iluminação natural – Alternativa 2
- 4.43 Simulação da iluminação natural – Alternativa 3
- 4.44 Simulação da iluminação natural – Alternativa 4
- 4.45 Simulação da iluminação natural – Alternativa 5
- 4.46 Simulação da iluminação natural – Alternativa 6
- 4.47 Simulação da iluminação natural – Alternativa 7
- 4.48 Simulação da iluminação natural – Alternativa 8
- 4.49 Simulação da iluminação natural – Alternativa 9
- 4.50 Alternativas com abertura lateral
- 4.51 Alternativas com abertura zenital
- 4.52 Abertura lateral, zenital e combinada
- 4.53 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento F
- 4.54 Indicação dos pontos de medição da iluminação natural e artificial
- 4.55 Valores de iluminância na simulação da luz artificial
- 4.56 Valores de iluminância na simulação da luz natural
- 4.57 Vista em planta do modelo com indicação do *grid* de análise
- 4.58 Simulação da distribuição luminosa em falsa cor
- 4.59 Simulação da distribuição luminosa em escala de cinza
- 4.60 Valores de iluminância para o ambiente simulado
- 4.61 Gráfico isolux para o ambiente simulado

- 4.62 Valores de iluminância para o ambiente simulado
- 4.63 Simulação da distribuição luminosa com indicação das curvas isolux
- 4.64 Simulação da distribuição luminosa em falsa cor
- 4.65 Imagens do ambiente simulado nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente
- 4.66 Distribuição da intensidade visualizada com *human sensitivity* no Desktop Radiance
- 4.67 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento G
- 4.68 Posicionamento dos pontos de medição para verificação dos níveis de iluminância artificial
- 4.69 Valores de iluminância para a simulação da luz artificial no Lightscape
- 4.70 Valores de iluminância para a simulação da luz artificial no Lumen Micro
- 4.71 Valores de iluminância para a simulação da luz artificial no Desktop Radiance
- 4.72 Simulação da iluminação artificial, alternativa 1, nos programas Lumen Micro, Lightscape e Desktop Radiance, respectivamente
- 4.73 Níveis de iluminância do ponto 1 para os três programas analisados
- 4.74 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento H
- 4.75 Imagem gerada no Lightscape
- 4.76 Imagem gerada no Lumen Micro
- 4.77 Imagem gerada no Desktop Radiance
- 4.78 Indicação dos pontos para determinação do nível de iluminância natural
- 4.79 Iluminação natural nos três programas analisados
- 4.80 Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado – Experimento I
- 4.81 Indicação dos pontos de medição e posicionamento das fontes luminosas
- 4.82 Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 1
- 4.83 Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 2
- 4.84 Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 3

- 4.85 Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 4
- 4.86 Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 5
- 4.87 Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 6
- 4.88 Foto do ambiente e simulações nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente
- 4.89 Simulações do ambiente nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente
- 4.90 Foto do ambiente e simulação no Lightscape

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

- 1.1 Relação entre a temperatura e a sensação provocada pela cor da lâmpada
- 1.2 Descrição dos valores de IRC

Capítulo 2

- 2.1 Súmula da abordagem conceitual de modelo

Capítulo 3

- 3.1 Comparativo entre termos da Colorimetria e termos perceptivos

Capítulo 4

- 4.1 Roteiro de trabalho para aplicação da simulação computacional em projetos de iluminação
- 4.2 Valores medidos no local e valores obtidos na simulação – Experimento A
- 4.3 Valores medidos no local e valores obtidos na simulação para iluminação – Experimento B
- 4.4 Comparação dos níveis de iluminamento das várias alternativas, em lux – Experimento C
- 4.5 Valores de iluminância para a iluminação natural as 9:00 horas – Experimento D
- 4.6 Valores de iluminância para a iluminação natural as 17:00 horas – Experimento D
- 4.7 Comparativo entre a simulação da iluminação natural às 17:00 horas e a solução integrada no mesmo horário – Experimento D
- 4.8 Valores de iluminância na simulação da luz artificial – Experimento F
- 4.9 Valores de iluminância na simulação da luz natural 21 de março as 9:00 horas – Experimento F
- 4.10 Distribuição luminosa do ambiente para iluminação natural – Experimento H

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3D -	Tridimensional
ABILUX -	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
B-Rep -	<i>Boundary Representation</i>
CAD -	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto Auxiliado por Computador)
CIE -	<i>Commission Internationale d'Éclairage</i>
CIBSE -	<i>The Chatered Institution of Building Services Engineers</i>
CMY -	<i>Cyan, Magenta, Yellow</i> (modelo de cor)
CRT -	<i>Cathode Ray Tube</i> (tubo de raios catódicos)
CSG -	<i>Construtive Solid Geometry</i>
DCRL -	Diagrama de Contribuição Relativa de Luz
DF -	<i>Daylight Factor</i> (fator de luz diurna ou fator de luz natural)
IEA -	<i>International Energy Agency</i>
IES -	<i>Illuminating Engineering Society</i>
IESNA -	<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>
ENCAC -	Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído
ENTAC -	Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
FLN -	Fator de Luz Natural
GRAPHICA -	Congresso Internacional de Engenharia Gráfica nas Artes e no Desenho
HSV -	<i>Hue, Saturation, Value</i> (modelo de cor)
LabCon -	Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina

- LABCON - Laboratório de Conforto Ambiental da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais
- LBL - *Lawrence Berkeley National Laboratory*
- LCAD - Laboratório de Computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia
- NBR - Norma Técnica Brasileira
- NURBS - *Non-uniform Rational B-Splines*
- NUTAU - Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo
- QTVR - *Quicktime Virtual Reality*
- RGB - *Red, Green, Blue* (modelo de cor)
- RVP - *Relative Visual Performance*
- SIGRADI - Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital
- SMR - Sistema do Mundo Real
- UFBA - Universidade Federal da Bahia
- VCP - *Visual Comfort Probability*
- VRML - *Virtual Reality Modelling Language*



INTRODUÇÃO

“More significantly, movement through the represented space can be simulated in real time within the computer environment. This ability, possibly more than any other of computer graphics, may revolutionize the way in which we use representation to study design and thereby alter the sensitivities, criteria, and qualities that apply to architectural design”.

(LASEAU, 2000: 79)

INTRODUÇÃO

Esta pesquisa visa estudar o uso de tecnologias computacionais para a simulação de projetos de iluminação como ferramenta auxiliar na concepção e detalhamento de projetos de modo a prever e minimizar possíveis problemas, relativos ao conforto luminoso.

Através da definição das características e objetivos da simulação computacional e o estudo de modelos aplicados, pretende-se avaliar a eficácia da aplicação da simulação no ato de projetar em arquitetura e, especificamente, no processo de projeto de iluminação. Para tal, devem ser considerados tópicos relacionados às questões de conforto luminoso, tais como fotometria, modelos de iluminação, influência das cores, dos materiais e suas propriedades físicas na propagação e reflexão da luz, as necessidades de iluminação em diferentes ambientes e atividades, o estudo dos métodos de cálculo de iluminação, assim como a aplicação de *software* com recursos disponíveis para a realização dos estudos pretendidos.

A aplicação das tecnologias computacionais em projetos de arquitetura é associada principalmente ao uso de ferramentas de desenho e modelamento para representação e visualização de estudos realizados, embora os recursos da computação gráfica já possam ser usados no auxílio à concepção e desenvolvimento dos mais variados tipos de projetos, tais como cálculo de iluminação, acústica, comportamento térmico, análise estrutural e projetos de instalações hidráulicas e elétricas, dentre outros.

Dentre esses recursos, podemos destacar as ferramentas específicas para simulação de projetos nas diversas áreas da arquitetura, em particular, àquelas voltadas à simulação do conforto luminoso, que podem ajudar nas diretrizes e no desenvolvimento do projeto arquitetônico.

É preciso destacar algumas vantagens e desvantagens que caracterizam a simulação computacional de forma a contextualizar o estudo em questão e avaliar as possibilidades de sua aplicação (LAW, 2000: 92).

Vantagens:

- permite estimar o desempenho de um sistema existente sob as condições controladas;
- possibilita a comparação das alternativas propostas e visualização dos seus resultados; e
- permite manter um controle sobre as condições experimentais e estudar um sistema por um tempo mais longo.

Desvantagens:

- modelos de simulação são, muitas vezes, caros para implementar e consomem tempo para o seu desenvolvimento; e
- modelos que envolvem fatores humanos ou evolutivos são difíceis de serem implementados e são de resultados duvidosos.

A partir dos resultados obtidos nas simulações será possível observar o desempenho do projeto, do ponto de vista da iluminação, mesmo antes de sua execução, dando uma efetiva contribuição e uma maior consistência para as decisões a serem tomadas durante a fase de projeção arquitetônica.

Sendo a concepção do projeto arquitetônico a fase onde se definem as características do edifício, baseadas no programa de necessidades e na possibilidade de criar alternativas de solução para os problemas propostos, o uso da simulação computacional pode vir a ajudar na resolução do projeto e comprovação de sua eficácia.

É relevante, portanto, estudar mais profundamente as características, os processos envolvidos, as potencialidades e possibilidades para a utilização da simulação no estudo dos efeitos da iluminação nos ambientes projetados.

Atualmente, os recursos tecnológicos disponíveis permitem representar espacialmente imagens realísticas que reproduzem muitas das características técnicas e estéticas, e

muitos dos efeitos gerados pelos materiais aplicados, para estudos tanto quantitativos como qualitativos.

Para esses estudos, devem ser utilizados programas eficientes, voltados para a simulação luminosa, que possibilitem demonstrar os efeitos de materiais, texturas e fontes luminosas, com suas características principais, de forma a chegar a um nível de representação visual próximo ao real. É necessário também que forneçam dados numéricos da solução para a realização de estudos comparativos entre os resultados obtidos por simulação e os dados do mundo real, obtidos através de medições em campo.

Como as ferramentas CAD básicas (editores de desenho e modeladores tridimensionais) não apresentam qualquer referência à interação com o contexto climático, serão usadas outras ferramentas que realizam atividades específicas relacionadas ao projeto de iluminação, tais como cálculos luminotécnicos, simulação da incidência do sol e sua influência no ambiente, análise fotométrica e visualização fotorealística dos efeitos da luz.

A adoção dessa sistemática de trabalho requer além do conhecimento da tecnologia disponível e de suas possibilidades, o estudo da projeção (cálculo e definição dos elementos de projeto e seus atributos) da iluminação natural e artificial, segundo os métodos tradicionais, através de tabelas e gráficos, para se comprovar a veracidade da simulação e suas características quanto às questões qualitativas e quantitativas do projeto de iluminação. Isso porque, com a crescente preocupação com a necessidade de conservação de energia¹ advinda da crise no setor energético, é primordial que os projetos de iluminação venham a ser um instrumento de grande utilidade nesse processo, objetivando a contenção e redução da demanda energética no setor de edificações. O que, por sua vez, acarretará na melhoria da qualidade dos projetos e o conseqüente desempenho das construções, integrando a arquitetura, o conforto ambiental e a conservação de energia.

¹ Uso racional dos recursos energéticos e introdução de técnicas que aumentem a eficiência do uso da energia e elimine os desperdícios (ABILUX , 1992).

Um outro ponto a ser destacado é a possibilidade da aplicação da tecnologia de simulação no ensino das disciplinas de conforto ambiental, principalmente, no que se refere aos estudos de iluminação natural e artificial, já que tais ferramentas permitem a visualização dos efeitos da luz sobre o ambiente projetado e fornecem a quantidade de iluminação do ambiente considerando as propriedades físicas dos materiais, lâmpadas e luminárias.

Essa aplicação pode ser feita mediante o desenvolvimento de uma metodologia para utilização da simulação computacional no processo de projeto de iluminação, usando-a para a verificação dos projetos propostos e análise das alternativas de forma mais rápida e eficiente. Para isso, é necessário que nas disciplinas envolvidas sejam criadas atividades de laboratório para o estudo e aplicação das ferramentas específicas, voltadas para a simulação, de forma que o aluno tenha a oportunidade de conhecer os programas e desenvolver um método de trabalho mais adequado à tarefa a ser realizada.

Em âmbito acadêmico, algumas ferramentas foram desenvolvidas para o estudo da iluminação, podendo ser aplicadas nos laboratórios de conforto como auxiliar no aprendizado, e outras, mais completas, podem ser adquiridas a um custo menor quando utilizadas para fins didáticos.

Justificativa

Com o adensamento e a verticalização das cidades sem a preocupação com os aspectos de conforto ambiental, seja ele acústico, térmico ou luminoso, além da crise energética, fica evidenciada a necessidade de revisão dos modelos de desenvolvimento urbano e da tipologia das edificações para controlar o consumo de energia e conseqüentemente as condições de conforto (ASSIS, 1995: 19).

Muitas das deficiências que ocorrem com relação aos níveis de conforto, tais como o ofuscamento e a elevada carga térmica imposta aos ambientes devido ao uso de grandes painéis envidraçados nas fachadas; o alto consumo de energia elétrica na iluminação artificial e no condicionamento de ar; o adensamento das cidades; e a escassez de áreas verdes, dentre outros, são ocasionadas em, alguns casos, pela legislação de uso e

ocupação do solo que não considera muito dos aspectos do conforto ambiental e da conservação de energia.

Além disso, tem se observado, através de estudos de análise pós-ocupação, que muitos dos aspectos relacionados com o conforto ambiental não têm sido considerados na hora de projetar, deixando algumas soluções a serem resolvidas durante ou após a execução da obra, o que aumenta os custos com reformas não previstas, com condicionamento de ar, implantação de novos pontos de iluminação artificial, etc.

Com a ampliação da oferta e sofisticação dos equipamentos utilizados em edificações, os projetos de iluminação têm sido concebidos privilegiando a luz artificial e esquecendo-se a possibilidade do aproveitamento da luz natural para iluminar os ambientes durante o dia, deixando o recurso da luz artificial apenas para complementação da iluminação necessária no decorrer do dia e seu uso à noite.

Em decorrência da atual crise energética, devido à possibilidade de esgotamento dos recursos naturais mais utilizados para a produção de energia, é fundamental pensar o uso racional da iluminação natural, relacionado à iluminação artificial.

Uma das metas da campanha em prol da conservação de energia é a proposição do uso complementar das duas fontes para se obter uma melhor qualidade na distribuição luminosa advinda do projeto de iluminação e a conseqüente redução no consumo de energia (MAGALHÃES, 1995: 150).

Segundo Goulding (1992: 101), a proporção da energia total requerida nas edificações para o uso da iluminação artificial é de cerca de 35% e o uso correto da iluminação natural pode reduzir esse valor e diminuir o consumo com sistemas de refrigeração.

Romero (1995: 31) destaca que o setor de comércio e serviços é o setor que apresenta maiores condições de intervenção devido ao seu consumo de energia, cerca de 70% do consumo é usado para iluminação artificial e condicionamento ambiental. O arquiteto, enquanto modificador do espaço, tem condições de intervir nesses ambientes de maneira a minimizar os custos com energia e melhorar as condições de conforto. Tais intervenções podem ser feitas na forma, na orientação, nos materiais, no gerenciamento

dos espaços e no projeto de iluminação e condicionamento de ar, utilizando a simulação como ferramenta de análise das propostas estudadas.

Os simuladores de desempenho energético são ferramentas de extrema utilidade, pois efetuam uma grande quantidade de cálculos com facilidade e rapidez, e possibilitam a visualização de ambientes ainda não construídos, que podem ser alterados no todo ou em parte de acordo com as necessidades do projeto.

A utilização de modelos computacionais para a simulação da iluminação no interior de edificações deve ajudar o projetista no melhor entendimento do projeto, visto que pode-se prever as condições da distribuição da luz nos ambientes de forma muito próxima, tal qual acontece no ambiente real.

A simulação computacional possui diversas aplicações em Arquitetura, nas quais podemos destacar a simulação da forma da edificação, sua implantação no terreno e relação com o entorno, simulação do aspecto interno e externo da adaptação espacial projetada e do desempenho dessa adaptação do ponto de vista estrutural, térmico, acústico e luminoso.

A simulação é assunto de potencial interesse de projetistas em arquitetura, visto que, com o uso da simulação, pode-se prever o comportamento de um ambiente proposto e selecionar a melhor solução a partir de uma série de alternativas.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos a cerca do uso das ferramentas computacionais para a simulação da iluminação natural e artificial, principalmente, em âmbito internacional, onde a maioria dos programas voltados para esse enfoque são produzidos, existindo várias pesquisas que têm descrito a aplicação desses programas, fazendo uma análise da sua facilidade de uso, características e, principalmente, os recursos disponíveis para a simulação quantitativa e qualitativa da luz, que podem auxiliar o projetista na aplicação desses recursos no ato de projetar em arquitetura.

Nesse sentido, destacam-se as pesquisas realizadas no IEA – *International Energy Agency* – da LBL – *Lawrence Berkeley National Laboratory* - que desenvolve trabalhos na área de conforto ambiental, dentre os quais a iluminação, publicando estudos sobre

algoritmos, métodos e ferramentas, além de terem desenvolvido alguns dos programas de simulação utilizados pela comunidade científica, tais como o **Adeline** e o **Radiance**.

Muitos trabalhos publicados visam também comparar as diversas ferramentas de simulação de iluminação quando utilizadas no processo de projeto de arquitetura, tais como, os estudos de Joseph Ashmore e Paul Richens (ASHMORE, 2001), do *Martine Centre, University of Cambridge*; Geoffrey G. Roy (ROY, 2000), da *School of Engineering Murdoch University*; A. B. Khodulev e E. A. Kopylov (KHODULEV & KOPYLOV, 2002); e M. Susan Ubbelohde (UBBELOHDE, 2002), da *University of California em Berkeley, CA*.

Roy (2000), analisa pacotes de programas de simulação de iluminação para estudar a precisão e facilidade de uso dos programas **Adeline 2.0 NT**, **Lightscape 3.1.1**, **Microstation 7.1** e **RadioRay 2.0**.

Ashmore (2001), descreve um estudo comparativo entre as simulações produzidas com os programas de simulação de iluminação, o **Lightscape 3.1.1**, o **RadioRay 2.0**, o **Microstation/J 7.1 beta** e o **Adeline 2.0 NT**, e um modelo físico de um ambiente interno retratando aspectos tais como a precisão fotométrica dos resultados, a qualidade visual das imagens geradas e a facilidade de uso dos programas.

Em (KHODULEV & KOPYLOV, 2002), os autores investigam a capacidade dos programas **Lightscape**, **Specter** e **Radiance** de simular a iluminação global, adotando como critério de comparação a análise das interfaces, a descrição física correta de fontes luminosas e materiais, o modelo de iluminação global utilizado, a acurácia da simulação e a capacidade do usuário de monitorar e controlar a precisão da simulação.

Da mesma forma, Ubbelohde (2002), avalia o uso dos programas **Lumen Micro**, **Superlite**, **Radiance** e **Lightscape** fazendo uma avaliação comparativa entre um edifício existente e as simulações da iluminação natural obtidas nos diversos programas estudados.

Em âmbito nacional, podemos destacar os estudos desenvolvidos nas Universidades, por meio dos seus laboratórios de informática e conforto, dos quais podemos destacar o LCAD² – Laboratório de Computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho da

² <http://www.ufba.br/~lcad/>

Universidade Federal da Bahia, que desenvolve a pesquisa Simulação Computacional em Arquitetura e Urbanismo integrando estudos sobre conforto ambiental, estrutura e projeto arquitetônico e urbano; o LABCON³, Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, que realiza medições *in loco* e (ou) simulação, através de modelos físicos e (ou) computacionais, das condições de conforto no ambiente construído, desenvolvendo projetos tais como o “Simulador de Trajetória Solar para Estudo de Insolação e Sombreamento nas Edificações” e o “Simulador de Obstrução da Abóbada Celeste para Estudos de Conforto Térmico e de Conforto Luminoso-Visual: Modelagem física e computacional do globoestereoscópio” para a análise do desempenho do projeto; e o LabCon⁴ – Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, que através de seus pesquisadores desenvolve trabalhos na área de conforto luminoso através de estudos sobre a simulação da iluminação em modelos físicos e computacionais.

Alguns trabalhos podem ser encontrados em publicações de seminários e congressos voltados para estudos na área de Conforto Ambiental, onde se destacam o ENCAC – Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, e o ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído; e aqueles voltados para a discussão de variados enfoques na área de Arquitetura e Desenho, como os simpósios promovidos pelas entidades: NUTAU – Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo; o GRAPHICA – Congresso Internacional de Engenharia Gráfica nas Artes e no Desenho; e o SIGRADI – Congresso da Sociedade Iberoamericana de Gráfica Digital.

Destacamos também as entidades normalizadoras de projetos de iluminação voltadas para a divulgação de informações sobre a iluminação, através de publicações, conferências e seminários, onde podemos citar a CIE – *Commission Internationale d’Éclairage*, o CIBSE – *The Chatered Institution of Building Services Engineers*, e a IESNA – *Illuminating Engineering Society of North America*.

O presente trabalho vem contribuir para o desenvolvimento do tema abordando a aplicação das ferramentas computacionais de simulação de iluminação no processo projetual. Sua contribuição se dará na avaliação do uso deste ferramental, desde a fase

³ <http://www.arquitetura.ufmg.br/tau/labcon>

⁴ <http://www.arq.ufsc.br/~labcon/apresentacao.html>

de concepção até a conclusão, visando incorporar as questões referentes ao conforto visual, auxiliando o arquiteto na elaboração de projetos.

Objetivo

O estudo desenvolvido visa analisar como a simulação computacional pode contribuir nos projetos de iluminação de forma a antecipar os resultados da alternativa selecionada e avaliar as condições luminosas resultantes. Dessa forma, será avaliada a utilização dos recursos da simulação computacional como ferramenta para o estudo e o desenvolvimento de projetos de iluminação interna, partindo das seguintes hipóteses:

- os simuladores de distribuição luminosa são ferramentas de fundamental importância para a previsão do desempenho luminoso do edifício tanto nas fases iniciais de projeto, como também durante a obra ou numa avaliação pós-ocupação, já que permitem testar alternativas de projeto a baixo custo e não dependem de fatores naturais externos para sua execução;
- a simulação de iluminação propicia a visualização dos efeitos da luz sobre os ambientes internos, permitindo a verificação da adequação das variáveis envolvidas para um melhor aproveitamento da luz e conseqüente redução no consumo de energia;
- as simulações facilitam a percepção dos efeitos do uso de diferentes materiais, texturas e cores no nível de iluminação e na distribuição da luz nos ambientes;
- com a simulação, podemos calibrar o uso da iluminação artificial e natural de forma a reduzir os gastos com o consumo de energia; e
- os resultados das simulações contribuem para uma melhor definição da proposta projetual da edificação e para a diminuição das cargas térmicas, já que permitem a definição da melhor orientação para a construção, o correto posicionamento das aberturas e uso de elementos de controle da entrada da luz incidente;

Assim, este trabalho investiga formas de conceituar e caracterizar a simulação computacional e definir as vantagens, desvantagens e possibilidades para a aplicação dessa ferramenta no projeto de iluminação, caracteriza os modelos existentes e classificá-los de acordo com a aplicação, estuda metodologias para a simulação e avalia os recursos disponíveis para a simulação qualitativa e quantitativa da iluminação nos programas específicos.

Para isso, a pesquisa foi desenvolvida a partir de procedimentos teóricos e experimentais que objetivaram viabilizar a análise das ferramentas voltadas para a simulação de iluminação e desenvolver procedimentos para a aplicação desses recursos no processo de projeto de arquitetura e, especificamente, no projeto de iluminação natural e artificial.

Foram feitos a revisão bibliográfica e o levantamento do estado da arte dos principais métodos de cálculo aplicados a projetos de sistemas de iluminação, o estudo do processo de projeto e das ferramentas específicas aplicadas à simulação luminosa de forma a embasar o estudo e possibilitar o desenvolvimento dos procedimentos experimentais.

Estes foram desenvolvidos através da realização de simulações nos programas escolhidos e de medições em ambiente real para verificar a validade das ferramentas, permitindo uma análise comparativa dos mesmos sob seus vários aspectos.

Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

O capítulo I - **A Iluminação no Projeto de Arquitetura**, descreve o desenvolvimento de projetos de iluminação, as características da iluminação natural e artificial e os processos de cálculo utilizados tradicionalmente.

O capítulo II – **Modelos e Simulação Computacional**, trata das questões referentes aos modelos, sua definição, características e tipos aplicados na simulação, e simulação computacional, definindo, caracterizando, descrevendo sua aplicação em Arquitetura e

Urbanismo, suas vantagens e desvantagens, assim como sua utilização em projetos de iluminação.

O capítulo III – **Ferramentas para Simulação da Iluminação** – descreve as características das ferramentas utilizadas na simulação, as tecnologias aplicadas, assim como os recursos disponíveis nos programas específicos para simulação da iluminação.

O capítulo IV – **Experimentação, análise e discussão** – descreve os experimentos realizados e os resultados obtidos nas simulações fazendo-se uma análise e discussão dos resultados de forma a verificar a validade das ferramentas, analisar os programas e fazer um estudo comparativo entre as mesmas, além de permitir o desenvolvimento dos procedimentos de trabalho para o uso da simulação visual no processo projetual.

As **Considerações Finais**, apresentam as conclusões da pesquisa, recomendações sobre o processo de projeto com o uso da simulação e procedimentos para a aplicação das ferramentas, assim como a indicação para a continuidade do trabalho.



A ILUMINAÇÃO NO PROJETO DE ARQUITETURA

“Cerca de 80% das impressões sensoriais humanas são de natureza optica: isto comprova a importância da luz, natural ou artificial, como veículo de informação para desenvolver qualquer atividade”.

(RE, 1978b: 6)

1.0 A ILUMINAÇÃO NO PROJETO DE ARQUITETURA

O projeto de arquitetura é dotado de inúmeras variáveis que vão definir um adequado dimensionamento e configuração do espaço, bem como o seu uso de forma eficiente. Dentre estas, podemos destacar a iluminação, essencial para o bom funcionamento das atividades e o conforto daqueles que as exercem.

Um projeto de iluminação deve garantir às pessoas a possibilidade de executar atividades visuais com segurança e precisão e com o menor esforço possível (LAMBERTS, 1997: 75), devendo ser econômico de forma a buscar a conservação de energia, uma preocupação que tem se tornado constante e cada vez mais importante no ato de projetar.

Existem duas maneiras principais de se economizar energia, a primeira é eliminar os desperdícios e a segunda é utilizar técnicas que aumentem a eficiência de seu uso sem reduzir o conforto (SILVA, 1992: 88). Para isso, devemos elaborar projetos que levem em conta o consumo de energia e o conforto visual, e utilizar sistemas de controle para evitar os desperdícios.

Segundo Hopkinson (1975: 529-530), o projeto de iluminação pode ser dividido em fatores quantitativos e qualitativos:

- fatores quantitativos
 - percentual da área envidraçada em relação à área do pavimento, que definirá a quantidade de iluminação natural disponível no ambiente;
 - as dimensões e forma do cômodo, que irão influenciar na diferenciação da quantidade de iluminação nas áreas mais próximas e mais afastadas às janelas, assim como na uniformidade da distribuição;
 - a orientação, posição e o espaçamento das janelas que influenciará na contribuição do envidraçado na distribuição das luminâncias, considerando a altura do envidraçamento e a porção do céu que consegue visualizar;

- as obstruções internas e externas, que irão definir áreas de não visibilidade do céu sem incidência direta da radiação solar, além de favorecer a componente da luz refletida interna e externa; e
 - as refletâncias das superfícies internas, que irão influenciar na fração dos raios refletidos relativos à luz solar direta no total da iluminação, sendo que para um melhor aproveitamento da luz é necessário o uso de superfícies de alta refletância.
- fatores qualitativos:
 - o posicionamento e tamanho das aberturas que irão influenciar na visualização do céu pelos ocupantes do cômodo e na quantidade de iluminação que atingirá o campo de visão do observador;
 - a existência de ofuscamento através das aberturas, causado pela visualização de uma excessiva luminância do céu no campo de visão do observador;
 - as características refletoras das superfícies internas; e
 - os detalhes das janelas, principalmente caixilhos e faces laterais, que, a depender do material e da cor empregados, irão influenciar na impressão subjetiva do ambiente, devido aos contrastes que possam existir.

O projeto de iluminação visa definir as características quantitativas e qualitativas da luz sobre determinado ambiente de modo a avaliar as condições de luminosidade do local, bem como obter os efeitos luminosos desejados de forma eficiente e eficaz para atingir as exigências do conforto visual, efeitos cenográficos ou outros de natureza subjetiva.

1.1 Iluminação natural

A luz natural é a radiação luminosa proveniente do Sol que se estabelece sob duas formas: a direta ou luz solar, que decorre da incidência direta dos raios solares, e a difusa ou luz do céu, resultante da reflexão da luz solar pela abóbada celeste.

O grau de incidência dos raios solares sobre a superfície da Terra depende da posição geográfica em que se encontra (latitude e longitude), a estação (dia do ano) e a hora do dia. A posição do Sol no céu pode ser descrita por seu ângulo de altura (ângulo vertical sobre o plano do horizonte) e o de azimute (ângulo horizontal tomado a partir do Norte).

Para o estudo da iluminação natural de interiores são utilizados diversos métodos de cálculo, gráficos e analíticos, que permitem determinar o nível de iluminância do ambiente.

Segundo Moore (1985: 198), dois métodos básicos são utilizados para calcular manualmente a iluminação natural no interior de edificações: o método dos lúmens, adotado pelo *North American Illumination Society*, baseado no cálculo da iluminância interna através de fatores derivados de testes empíricos; e o método do Fator de Luz Natural, usado na Europa e recomendado pela CIE, baseado na determinação da iluminância interna como uma porcentagem da iluminância externa.

Ambos os métodos, utilizam recursos gráficos, além dos analíticos, para calcular a iluminação natural, sendo que a representação gráfica mais utilizada é chamada de Diagrama do Percurso Aparente do Sol, Diagrama Solar ou Gráfico de Insolação (figura 1.1), que representa o caminho aparente descrito pelo Sol na abóbada celeste, através do método de projeção estereográfica⁵, e determina os horários de insolação⁶ nos diversos meses do ano.

Juntamente com o gráfico do Percurso Aparente do Sol, é utilizado outro gráfico denominado de Máscara de Sombra (figura 1.2), que representa, através da projeção estereográfica, as sombras geradas por dispositivos de sombreamento ou elementos do entorno, determinando a porção da abóbada celeste que está escondida pelas obstruções adjacentes. Isso é feito através de um método gráfico onde os ângulos verticais e horizontais, que têm como vértice o centro da superfície iluminante, e abertura angular limitada pelas extremidades dos elementos sombreadores, são marcados com o auxílio do transferidor de ângulos (figura 1.3), sobre a representação da abóbada, gerando o diagrama.

⁵ Projeção geométrica de pontos da superfície da Terra sobre um plano tangente, a partir de um ponto de vista situado na posição oposta ao ponto de tangência. A escala aumenta substancialmente a medida que existe afastamento do ponto de tangência.

⁶ Horários em que há incidência dos raios solares na fachada analisada.

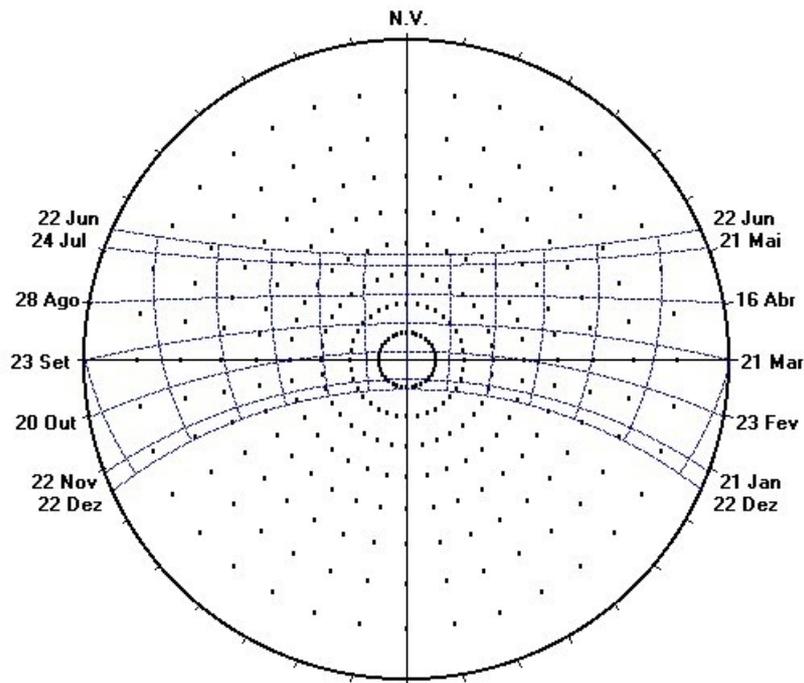


Figura 1.1 – Diagrama do Percurso Aparente do Sol para Salvador - Latitude 13° Sul⁷

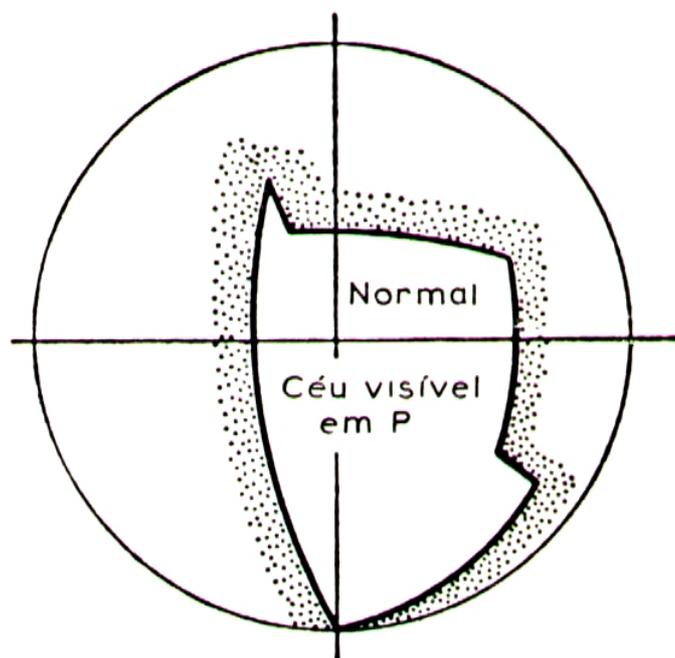


Figura 1.2 – Máscara de Sombra, onde P é o ponto onde está situado o observador⁸

⁷ Diagrama gerado através do programa **Luz do Sol**.

⁸ Fonte: COLORPLAST, [s.d]: 12

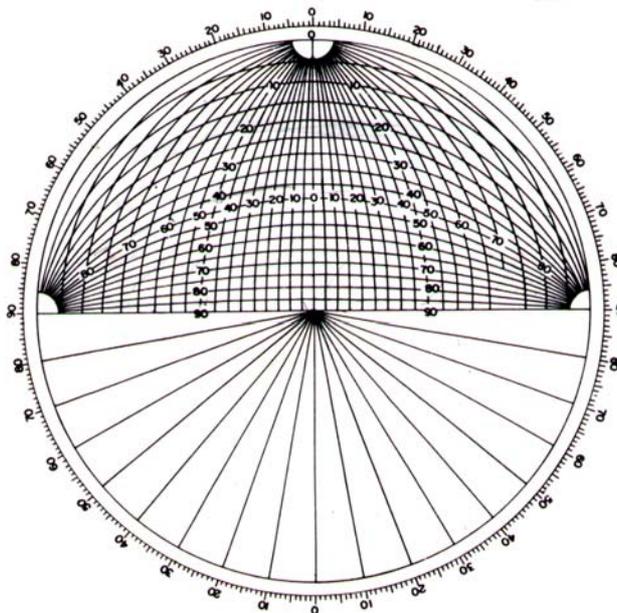


Figura 1.3 – Transferidor auxiliar utilizado para a confecção da Máscara de Sombra⁹

A superposição desses diagramas (figura 1.4), possibilita a verificação das horas do dia e épocas do ano em que ocorrerá a incidência do sol na área analisada, o que auxilia na definição da melhor orientação para as aberturas e da necessidade do uso de dispositivos para diminuir a incidência solar nos períodos mais críticos de insolação.

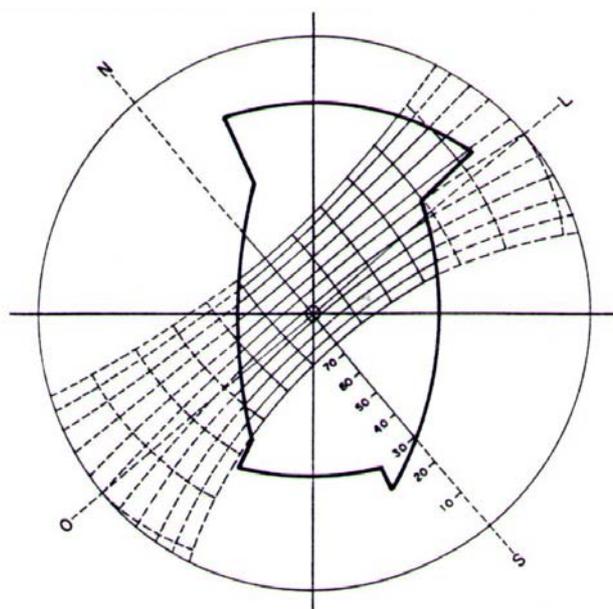


Figura 1.4 – Superposição da máscara de sombra sobre o diagrama solar¹⁰

⁹ BITTENCOURT, 1990: 90

¹⁰ SILVA, 1992: 66

A luz do céu, por sua vez, é uma luz uniformemente distribuída (quanto a orientação e a intensidade), que produz uma iluminação suave, não direcional, dependente das condições do céu, padronizados em três tipos distintos (figura 1.5), que interferem na quantidade de luz disponível (SILVA, 1992: 56).

- céu claro: quando a área coberta pelas nuvens corresponde a menos de 1/3 de sua superfície. Provoca uma luz intensa direta do Sol e difusa da abóbada deixando o céu claro no horizonte e escuro no zênite;
- céu parcialmente encoberto: quando a abóbada celeste possui de 1/3 a 2/3 de sua superfície coberta, produzindo uma variação entre momentos de luz solar intensa e de luz difusa; e
- céu encoberto: quando a abóbada está totalmente encoberta por nuvens e o Sol não é visível.

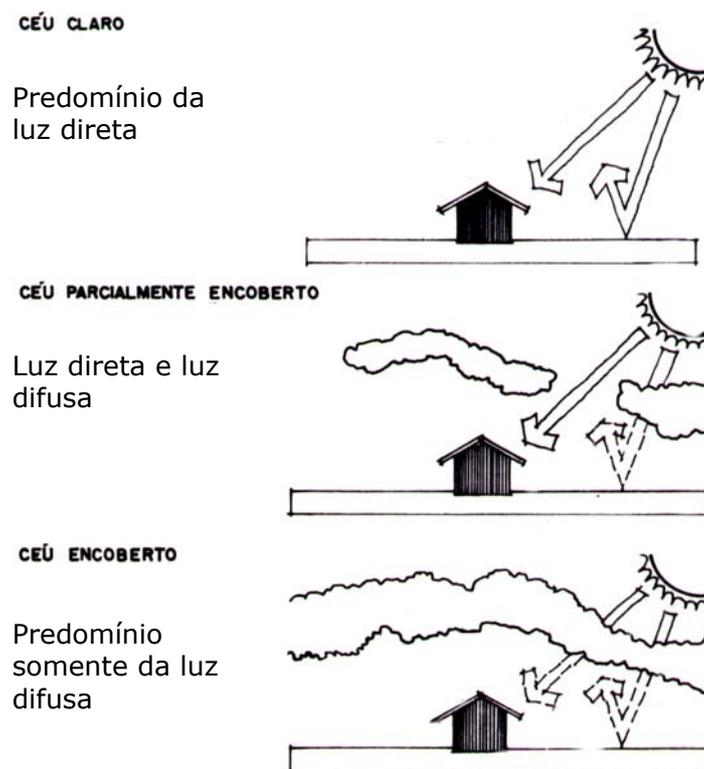


Figura 1.5 – Condição de iluminação da abóbada celeste¹¹

¹¹ ABILUX, 1992: 19

A iluminação natural pode ser considerada na adoção do partido arquitetônico de duas maneiras distintas; como iluminação lateral, proveniente de janelas, elementos vazados e aberturas posicionadas nas paredes externas da edificação; e como iluminação zenital, admitida com a implantação de domus, clarabóias, lanternins, *sheds* e aberturas posicionadas na cobertura da edificação. Esses dois sistemas podem ainda ser utilizados de forma associada para um melhor aproveitamento das condições de iluminação natural.

Segundo Silva (1992: 59) e ABILUX (1991: 9), cada sistema de iluminação requer um tratamento específico, sendo que algumas variáveis devem ser consideradas no momento da escolha pela sua utilização no projeto de iluminação natural:

- as características do edifício, a forma e a disposição dos ambientes;
- o tipo de tarefa a ser realizada;
- a orientação disponível para as aberturas;
- o tipo de abertura adequada à finalidade do ambiente; e
- as superfícies e elementos que possam interferir na iluminação gerando sombras ou contribuindo para a iluminação por meio de reflexão.

Dessa forma, a iluminação lateral é adequada para áreas próximas às janelas, já que, conforme a distância, em relação a elas, aumenta, o nível de iluminação vai diminuindo rapidamente em direção ao interior do ambiente; e a iluminação zenital é adequada para locais profundos e grandes espaços contínuos, oferecendo maior uniformidade, tendo a desvantagem do alto custo de implantação e as dificuldades de limpeza, manutenção e implantação em construções de mais de um pavimento. A falta de limpeza das superfícies transparentes e translúcidas diminui seu rendimento luminoso, ocasionando perdas na distribuição luminosa do ambiente.

Em geral, a quantidade de iluminação proporcionada por esses sistemas no interior do ambiente depende da forma, do tamanho e da orientação das aberturas, influenciando, principalmente, na quantidade de luz solar direta. Essa incidência, por sua vez, pode ser controlada através do uso de dispositivos de controle e sombreamento, que além de diminuir a luz solar direta e a luminância da abóbada celeste, favorece, a depender do

material e cor utilizados, o aumento da iluminação difusa gerada pela reflexão da luz nas superfícies dos dispositivos.

Esses dispositivos são utilizados para barrar ou redirecionar a luz direta ou refletida do Sol, podendo ser horizontais ou verticais, fixos ou reguláveis, tendo sua eficiência dependente da dimensão utilizada, do posicionamento em relação às aberturas, da orientação, do tipo de material aplicado à superfície e da inclinação.

Existem diversos tipos de dispositivos de controle, dentre os quais podemos destacar as marquises, os brises, os *lightselves*¹² e as persianas. Os dispositivos horizontais servem para redirecionar a luz para o teto e paredes na direção desejada e para evitar o ofuscamento, impedindo a visualização de áreas excessivamente iluminadas. Os dispositivos verticais são menos eficientes visto que dependem do rumo do sol e bloqueiam a visão, podendo ser usados de forma integrada com os elementos horizontais para bloquear a luz.

O uso correto dos dispositivos de controle favorece uma melhor distribuição da iluminação no interior do ambiente, além de permitir o aproveitamento da luz natural nos projetos arquitetônicos.

1.2 Cálculo da iluminação natural

As fontes de luz são aquelas que emitem energia radiante, ou seja, possuem luz própria, sendo portanto consideradas como fonte primária de iluminação. O Sol é a fonte primária de iluminação natural, porém não é considerado no projeto e no cálculo devido a sua grande intensidade e dinamismo, já que tem posição e intensidade variável durante o dia e ao longo do ano. Por isso, a abóbada celeste, por refletir a luz solar de forma difusa, correspondendo a uma parcela luminosa de alta magnitude, é considerada nos cálculos como a fonte de iluminação natural, podendo ter seu nível de iluminância variando a depender das condições do céu existente.

“A iluminação natural num interior pode exprimir-se, ou em termos absolutos como um valor de iluminação em lúmens por metro quadrado ou como uma percentagem da

¹² Lightselves (prateleiras de luz), são estruturas horizontais posicionadas sobre as aberturas laterais para aumentar a iluminação nas partes mais afastadas dessas aberturas.

iluminação total da luz natural, obtendo-se a partir do céu inteiramente limpo, isto é, como um Factor de Luz do Dia” (HOPKINSON, 1975: 81). Esses dois métodos serão discutidos a seguir, referindo-se primeiramente ao cálculo da iluminação natural em termos absolutos e posteriormente, discutindo-se o método da definição do fator de luz diurna, para avaliação da iluminação de um ambiente.

No processo de cálculo é utilizado o Diagrama de Representação da Iluminação Natural em Superfícies Horizontais (figura 1.6), que representa a distribuição da luz da abóbada celeste, de forma difusa, cuja superfície, para efeito de cálculo, foi dividida em 1004 partes, representadas por pontos no diagrama, equivalentes à quantidade de luz proveniente de cada uma dessas partes (SILVA, 1992: 67).

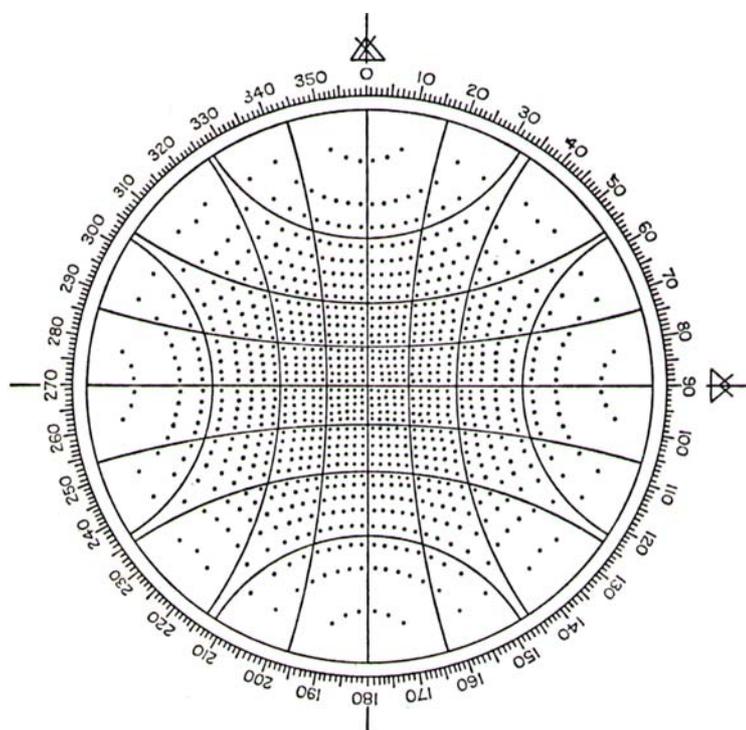


Figura 1.6 - Diagrama de Representação da Iluminação Natural em Superfícies Horizontais¹³

Com a sobreposição da máscara de sombra a esse diagrama, determina-se a quantidade de pontos (**n**) contidos entre as linhas que delimitam a área visível do céu, área esta que será utilizada para a definição do aclaramento externo¹⁴ no plano horizontal (**Ee**), um dos fatores que definirá a área da superfície iluminante necessária para atingir o

¹³ HOPKINSON, 1975: 227

¹⁴ Nível de iluminamento encontrado na área externa ao ambiente decorrente da incidência direta dos raios solares e da reflexão da abóbada celeste, dos elementos do entorno e do piso externo.

aclaramento requerido no plano de trabalho. Assim, o aclaramento externo é definido através da seguinte equação:

$$Ee = \frac{n}{1004} \times Eh \quad (1.1)$$

onde: **Ee**; aclaramento externo no plano horizontal, em lux;

n; número de pontos; e

Eh; aclaramento fornecido pela abóbada celeste que alcança as superfícies horizontais (sem obstruções), definido pelas tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 (ver anexo A), a partir da latitude e nebulosidade do lugar, em lux.

Dessa forma, a superfície iluminante total requerida é calculada através da equação:

$$S_{j/zt} = \frac{E \times S}{Ee \times FD} \quad (1.2)$$

onde: **S_{j/zt}**; área da superfície iluminante total necessária, em m²;

E; aclaramento requerido no plano de trabalho, em lux;

S; área do recinto, em m²;

Ee; aclaramento externo no plano horizontal, em lux; e

FD; fator de depreciação.

O fator de depreciação é calculado pelas equações (1.3), para iluminação zenital, e (1.4), para iluminação lateral, descritas a seguir:

$$FD = t \times Kp \times Km \times (1 - FS) \times Ku \quad (1.3)$$

$$FD = t \times Kc \times Km \times p \times Ku \quad (1.4)$$

onde: **t**; coeficiente de transmissão, em %;

Kp; coeficiente de poço, em %;

Km; coeficiente de manutenção, em %;

FS; fator de sombra, em %;

K_u; coeficiente de utilização, em %;

K_c; coeficiente de caixilho, em %; e

p; coeficiente de parede, em %.

O coeficiente de manutenção (**K_m**) é um fator de redução que corrige o valor do fluxo luminoso devido à sujeira nas superfícies iluminantes (ver tabela 2.1 - anexo A).

O coeficiente de transmissão (**t**) é a relação entre o fluxo luminoso que passa através da superfície sobre o fluxo incidente, dependente do tipo de material da superfície (ver tabelas 3.1 e 3.2 - anexo A).

O coeficiente de poço (**K_p**) é o valor percentual que indica a parcela da radiação visível obstruída pelo formato, altura, área da base e cor do poço

O coeficiente de parede (**p**) é o valor percentual que indica a parcela da radiação visível obstruída pela espessura da parede (ver tabela 4 - anexo A).

O coeficiente de caixilho (**K_c**) é a relação entre a área envidraçada e a área do vão, sendo utilizado para corrigir o valor da área da janela, que normalmente é calculada como sendo a área do vão e não do envidraçado.

O coeficiente de utilização (**K_u**) é a relação do fluxo luminoso que atinge o plano de trabalho e o total que penetra no ambiente, sendo definido em tabela (ver tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 - anexo A), dependendo do coeficiente de reflexão das paredes e do teto (ver tabelas 8.1, 8.2 e 8.3 - anexo A), do índice do local¹⁵ e do sistema de iluminação utilizado. O índice do local (**II**) é um valor percentual que representa a geometria do recinto, calculado pela equação (1.5):

$$II = \frac{C \times L}{(C + L) \times h} \quad (1.5)$$

onde: **II**; índice do local;

C; comprimento do local, em m;

L; largura do local, em m; e

h; distância do plano trabalho ao teto, em m.

¹⁵ Neste caso, o local é considerado como o ambiente (espaço interno) e não está associado à noção de posição.

Assim, o número de superfícies iluminantes pode ser calculado por:

$$N = \frac{S_{jzt}}{S} \quad (1.6)$$

onde: S; área de uma superfície iluminante, em m².

O cálculo (1.6) nos fornece a quantidade de aberturas necessárias para que os níveis de iluminação requeridos pela tarefa a ser executada sejam atingidos. Para o caso de um ambiente já construído e com o sistema de iluminação projetado, é possível verificar a quantidade de iluminação existente com o uso do luxímetro de forma a avaliar se o aclaramento requerido no plano de trabalho está de acordo com as especificações fornecidas por norma, a exemplo da NBR 5413¹⁶ (ver tabela 7 - Anexo A), que trata sobre as iluminâncias de espaços internos.

Segundo Moore (1985), usualmente é utilizada uma outra maneira de avaliar a iluminação natural no interior de um ambiente, chamado de *Daylight Factor*¹⁷(FD), que é considerado um melhor medidor de visibilidade do que o luxímetro, devido à adaptabilidade do olho à variação nos níveis de iluminação. Neste trabalho será adotado o termo Fator de Luz Natural - FLN para indicar a percentagem da iluminação natural total existente em um ambiente interno.

O Fator de Luz Natural é indicado em valores percentuais e representa “(...) a relação de proporção entre a quantidade de luz natural em um certo ponto P de um interior e a referente no espaço exterior desobstruído” (VIANNA, 2001: 109), demonstrando dessa forma que a quantidade de luz natural em um espaço interno é alterada simultaneamente com a variação da luminosidade do céu. Esse fator não considera somente a influência do céu na quantidade de iluminância interior, mas também, todas as outras variáveis que interferem na disponibilidade de luz natural, tais como, as componentes de reflexão interna e externa, o fator de caixilho, o fator de manutenção e o coeficiente de transmissão.

¹⁶ Iluminância de Interiores, 1982.

¹⁷ Também denominado de fator de luz do dia, fator de luz natural ou fator de luz diurna.

Assim, tem-se que

$$\boxed{FLN = (CC + CRE + CRI) \times t \times Kc \times Km \times FS} \quad (1.7)$$

onde: **FLN**; Fator de Luz Natural, em %;

CC; componente celeste. É a razão entre a iluminação proveniente unicamente da abóbada celeste sem considerar a incidência da luz solar em um ponto interior do ambiente, e a iluminação exterior simultânea num plano horizontal devido à abóbada celeste livre de obstruções e sem incidência solar direta. É um fator dependente da latitude, da época do ano, da hora do dia, da orientação, das condições da abóbada celeste e da área da abóbada visualizada;

CRE; componente de reflexão externa. É a razão entre a iluminação proveniente das reflexões de obstruções externas em um ponto interior, e a iluminação exterior simultânea num plano horizontal devido à abóbada celeste livre de obstruções e sem a incidência solar direta. Depende do tamanho, posição e distância da obstrução, assim como da sua reflectividade; e

CRI; componente de reflexão interna. É a razão entre a iluminação proveniente das reflexões de obstruções internas em um ponto interior, e a iluminação exterior simultânea num plano horizontal devido à abóbada celeste livre de obstruções e sem incidência solar direta. Depende da área, material, cores e texturas das superfícies internas.

Segundo LABEEE (2002), as componentes são calculadas da seguinte forma: a componente celeste (**CC**) é calculada a partir do Diagrama de Contribuição Relativa de Luz (DCRL), ver figura 1.7, que é a representação da abóbada celeste em projeção estereográfica, subdividida em 244 zonas, que representam numericamente a contribuição relativa para a iluminância no plano horizontal desobstruído, em função da altitude do sol. Inicialmente é produzida a Máscara de Sombra de um ponto interno escolhido para o estudo, determinado o dia e a hora a se estudar e selecionado o DCRL mais adequado de acordo com a altitude solar e a condição da abóbada celeste. Posteriormente deve-se superpor a Máscara de Sombra ao DCRL (ver figura 1.8), e somar os valores internos à máscara de obstrução para determinar a componente celeste.

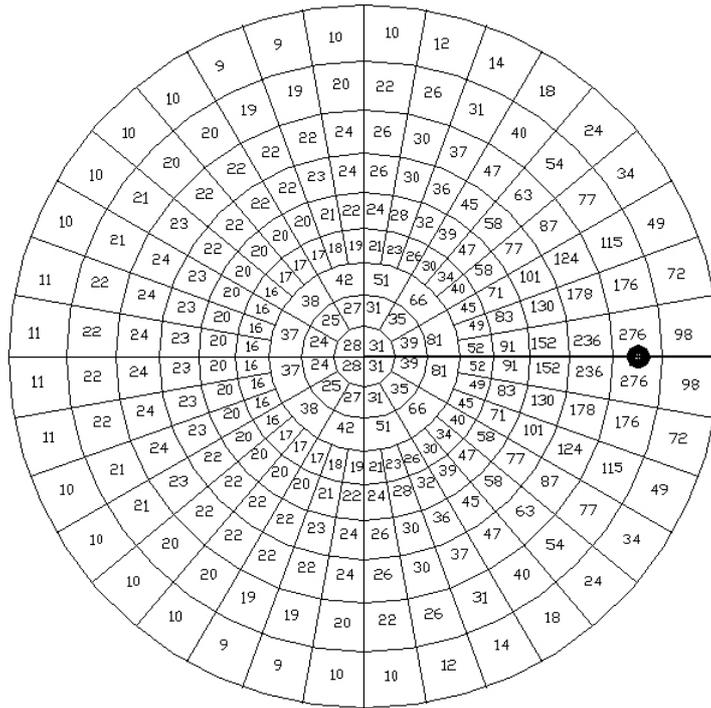


Figura 1.7 - Diagrama de Contribuição Relativa para céu claro e altitude solar de 15^o18

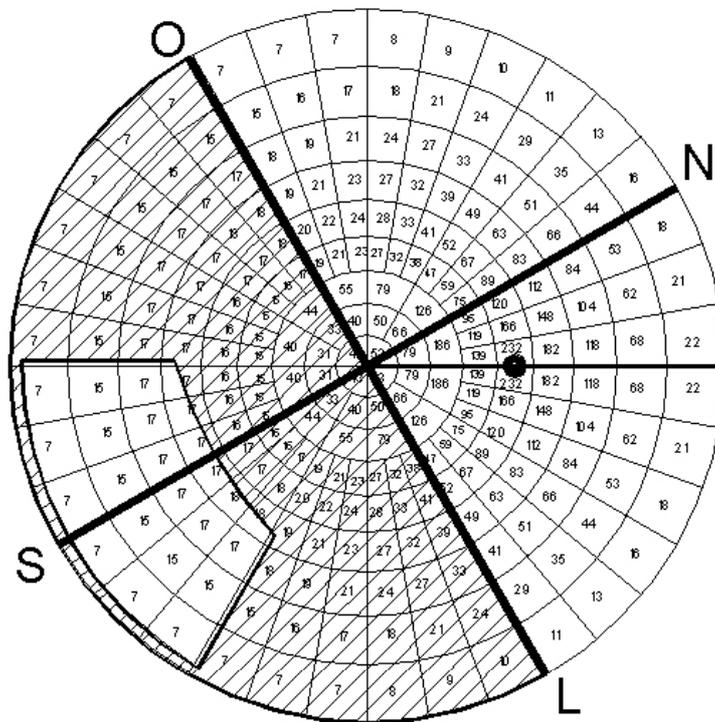


Figura 1.8 - Superposição da máscara de obstrução sobre o DCRL¹⁹

¹⁸ LABEEE, 2002: 6

¹⁹ Idem.

A componente **CRE** é determinada pela multiplicação da iluminância na superfície oposta à abertura, pelo fator de forma correspondente à superfície da abóbada obstruída pela edificação (dada através do diagrama com fatores de forma – figura 1.9) e pelo coeficiente de reflexão da superfície externa.

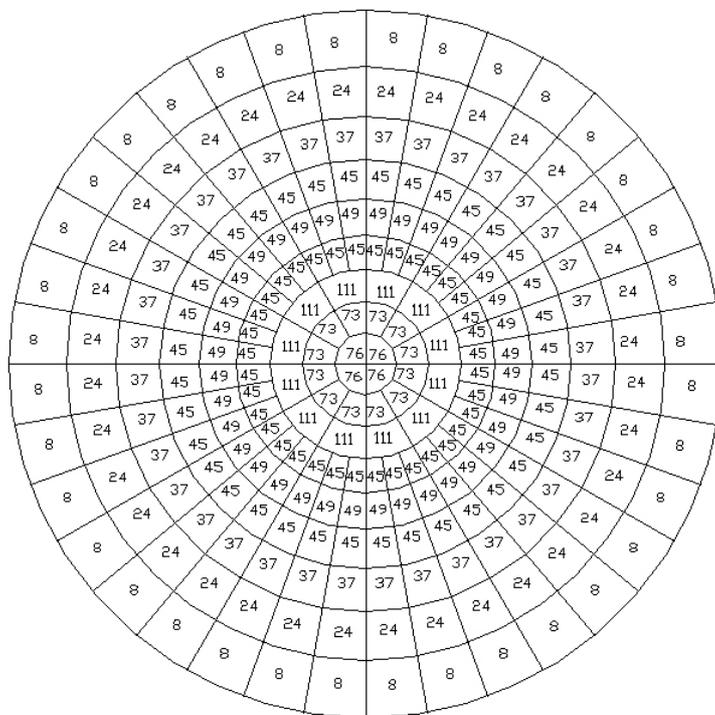


Figura 1.9 – Diagrama com fatores de forma²⁰

A componente **CRI** é determinada pela superposição da projeção estereográfica das superfícies internas do ambiente em relação aos pontos de medição, sobre o diagrama com os fatores de forma, obtendo-se assim o valor da área projetada das superfícies internas do ambiente. O valor do fator de forma para cada uma das superfícies internas é multiplicado pela refletância média desta superfície para obter-se o valor percentual do **CRI** em relação ao ponto estudado.

Assim, com o uso do FLN é possível avaliar a distribuição luminosa de um ambiente ainda em fase de projeto, podendo-se fazer uma análise dessa distribuição por meio do uso de diagramas onde são visualizadas as curvas de isolux, que ligam os pontos de mesma iluminância ou, quando representados em porcentagem, ligam pontos de mesmo FLN, permitindo avaliar se o nível de iluminação estar de acordo com a tarefa a ser executada.

²⁰ Idem.

Na figura 1.10, pode-se observar a distribuição luminosa interna do ambiente, através das curvas isolux, onde são representados, em planta, os valores de iluminância (em lux) gerados pela luz natural incidente, representados por curvas que unem os pontos de igual iluminamento. No corte, pode-se visualizar essa distribuição através de uma curva que representa a variação do iluminamento da área mais próxima à janela até a parede oposta.

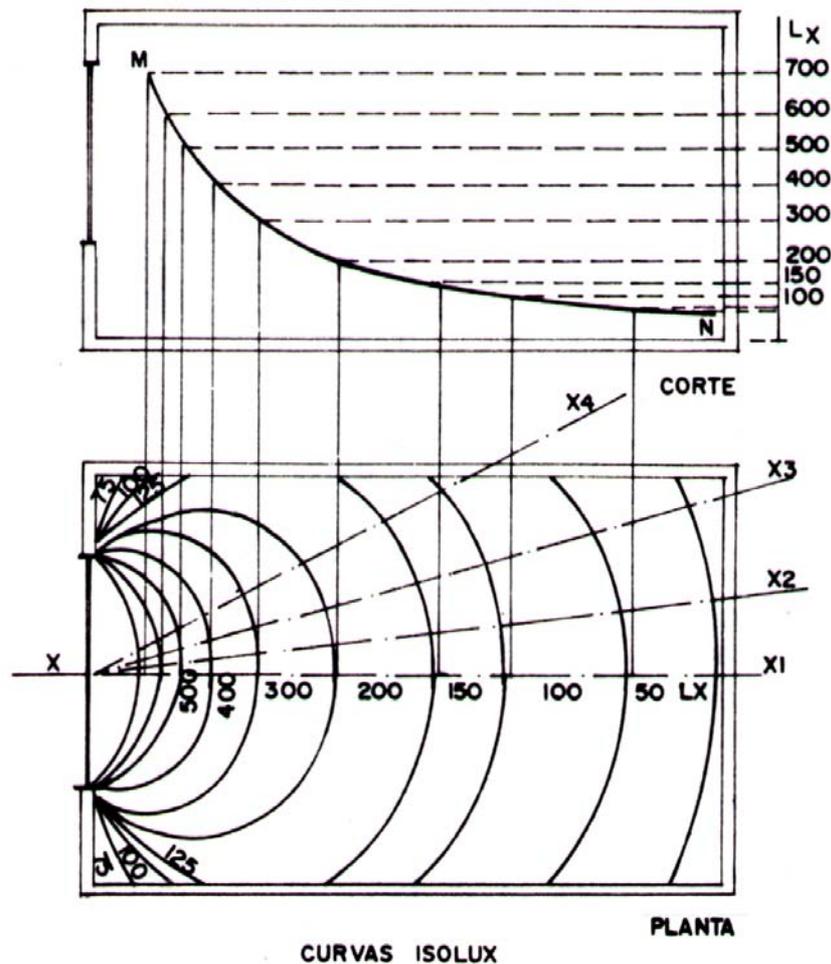


Figura 1.10 – Representação da iluminação em um ambiente através do Diagrama Isolux²¹

Dessa forma, através desses cálculos, é possível determinar o grau de luminosidade existente em um ambiente interno, gerado a partir da iluminação natural, que deve ser utilizado para determinar de que forma a luz natural pode ser utilizada no projeto de iluminação, melhorando as condições de conforto luminoso e a especificação de sistemas de iluminação que a utilizem durante o dia, conservando energia.

²¹ ABILUX, 1992: 13

1.3 Iluminação artificial

A iluminação artificial é aquela proveniente de fontes artificiais de iluminação, como as lâmpadas, que necessitam de energia elétrica para produzirem luz. O projeto de iluminação artificial é caracterizado pela especificação de lâmpadas e luminárias adequadas para se atingir o nível de distribuição luminosa no espaço, que dependerá da atividade a ser desenvolvida, do tamanho e das características do espaço.

Um projeto de iluminação artificial deve fazer uso dos recursos energéticos disponíveis de forma eficiente, com economia nos custos iniciais e de manutenção sem comprometer a qualidade no que se refere ao desempenho visual. Isso pressupõe o atendimento às necessidades humanas, proporcionando ao usuário conforto visual com relação à atividade a ser desenvolvida no ambiente.

Quatro sistemas de iluminação artificial podem ser utilizados (SILVA, 1992: 25):

- iluminação geral ou global: iluminância com um certo grau de uniformidade devido à distribuição uniforme de luminárias (figura 1.11);

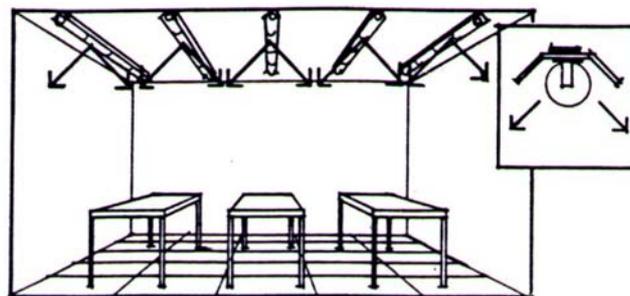


Figura 1.11 – Sistema de iluminação geral²²

- iluminação direcional: a luz incide predominantemente em uma única direção devido à distribuição e tipo de luminária utilizada (figura 1.12);

²² SILVA, 1992: 24

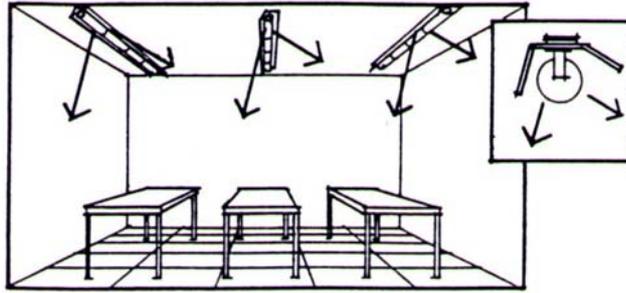


Figura 1.12 – Sistema de iluminação direcional²³

- iluminação localizada: concentra iluminamento em pontos de interesse pré-determinados. É utilizada em situações onde o nível de iluminamento necessário é alto (figura 1.13); e

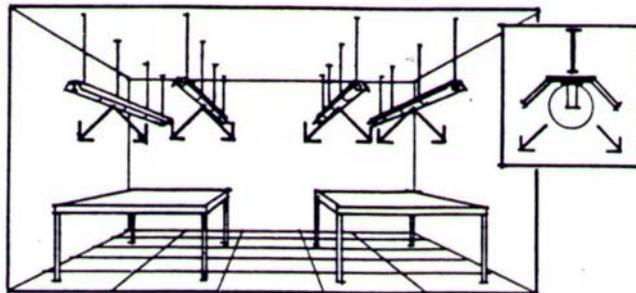


Figura 1.13 – Sistema de iluminação localizada²⁴

- iluminação local: instalação das luminárias próxima à tarefa visual iluminando pequenas áreas. Deve ser complementada por outro sistema de iluminação (figura 1.14).

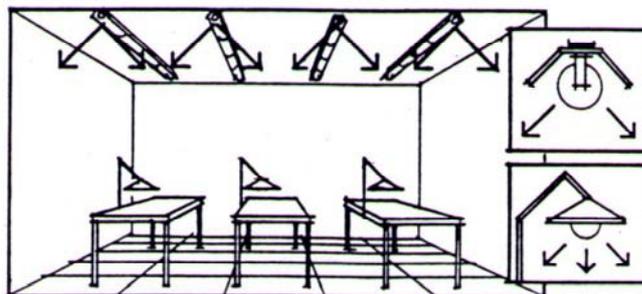


Figura 1.14 – Sistema de iluminação local²⁵

²³ SILVA, 1992: 24

²⁴ SILVA, 1992: 25

²⁵ SILVA, 1992: 25

Após a escolha do sistema a ser utilizado, é necessário considerar os seguintes aspectos na elaboração do projeto:

- a função e a forma do ambiente, que irá definir o nível de iluminamento necessário para a execução das tarefas. Nível esse determinado pela norma NBR 5413, da ABNT que trata da iluminância de interiores;
- os materiais de acabamento das superfícies internas e suas cores, que irão definir a forma como a luz irá interagir com o ambiente projetado;
- a disposição dos elementos construtivos e do mobiliário, causadores de obstruções;
- a presença de luz natural, onde as aberturas para o exterior definirão a incidência da radiação solar direta e por sua vez a necessidade do uso de dispositivos de proteção;
- a ausência de ofuscamento nas pessoas que irão utilizar o local;
- a correta reprodução das cores²⁶ das superfícies e objetos iluminados, através da escolha correta das lâmpadas;
- as características das lâmpadas a serem utilizadas;
- as luminárias com suas características e distribuição; e
- o grau de limpeza e manutenção previsto para o ambiente.

1.3.1 Lâmpadas

As lâmpadas são dispositivos destinados a produzir luz artificialmente e tem as seguintes características:

- aparência de cor: sensação visual causada pela temperatura de cor que pode por sua vez transmitir sensações de calor e frio;

²⁶ Fidelidade na qual as cores são reproduzidas com a utilização de fontes artificiais, quando comparadas à luz natural.

Tabela 1.1 – Relação entre a temperatura e a sensação provocada pela cor da lâmpada

Temperatura (°K)	Sensação
Até 3000	quente
3000 a 6000	morno
Acima de 6000	frio

- Índice de Reprodução de Cor – IRC: índice de fidelidade de reprodução de cor de determinada superfície ou objeto a ser iluminado, expresso em percentagem;

Tabela 1.2 – Descrição dos valores de IRC

Índice (%)	Descrição
90 a 100	Excelente
80 a 89	Bom
60 a 79	Razoável
40 a 59	Médio
Abaixo de 40	Insuficiente

- fluxo luminoso: quantidade de luz emitida pela lâmpada;
- vida útil;
- rendimento;
- eficiência luminosa: relação entre o fluxo luminoso total emitido pela fonte e a potência por ela absorvida, em lúmens por watts (lm/W);
- classificação quanto ao tipo:
 - lâmpadas incandescentes (comuns e halógenas); e
 - lâmpadas de descarga (fluorescente comum, fluorescente compacta, a vapor de mercúrio, a vapor de sódio, mista e a vapor metálico).

1.3.2 Luminárias

Também chamadas de aparelhos de iluminação, são dispositivos capazes de distribuir, de forma controlada, a luz gerada pelas lâmpadas, tendo a função de conexão e proteção da lâmpada, distribuição do fluxo luminoso, conforto (evitando o ofuscamento), alojamento dos reatores (quando necessário), e acabamento, dando beleza e estética.

As luminárias são definidas e diferenciadas pela quantidade e tipo de lâmpadas que pode abrigar, pelo seu rendimento, pelo fator de utilização e por sua curva de distribuição luminosa ou curva fotométrica.

O rendimento de uma luminária é a razão entre o fluxo luminoso fornecido pela luminária, em lúmens, e o fluxo emitido pela lâmpada, em lúmens.

O fator de utilização (η) é um fator relacionado com a cor das paredes (fator de reflexão - ρ), e com o índice do local (\mathbf{II}), dependente das dimensões do ambiente a ser iluminado. Normalmente é apresentado em forma de tabela onde estão relacionados os diversos índices do local e os fatores de reflexão do teto, paredes e piso.

A curva de distribuição da intensidade luminosa ou curva fotométrica (figura 1.15) é um diagrama polar que representa a distribuição luminosa de uma luminária ou lâmpada, segundo um plano passando pelo centro da fonte em função da direção, apresentando as respectivas intensidades luminosas proporcionadas pela luminária ou lâmpada.

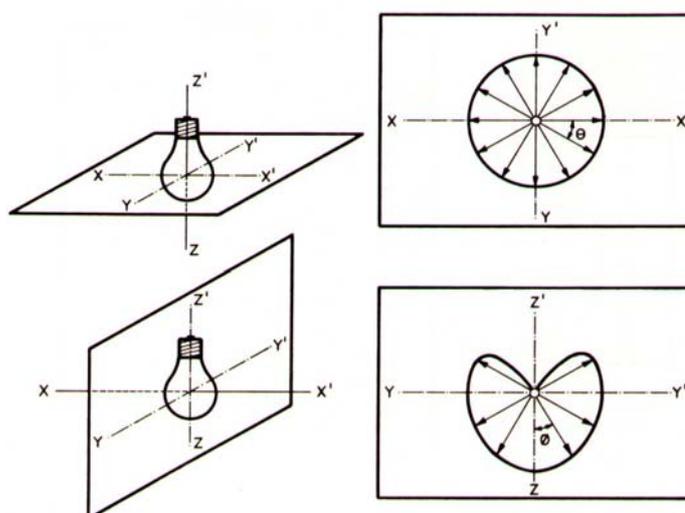


Figura 1.15 – Curva de distribuição da intensidade luminosa horizontal e vertical²⁷

²⁷ MOREIRA, 1982: 13

Além desses fatores, definidos pelo fabricante da luminária, existe outro fator, não controlado pelo mesmo, e que deve ser considerado na avaliação do rendimento do sistema de iluminação. É o que chamamos de fator de depreciação (**d**), definido como a perda de rendimento causado pela sujeira depositada nas superfícies da luminária.

A escolha do tipo de luminária depende da atividade a iluminar, da distribuição das intensidades luminosas e dos materiais empregados. Estes influenciam no tipo de efeito gerado pela luminária, que por sua vez depende da forma como a luz interage com as superfícies dos objetos, definida pelas seguintes propriedades dos objetos (ABILUX, 1991: 8 e RE, 1978a):

- reflexão: devolução da radiação por uma superfície opaca com a modificação no trajeto dos raios luminosos no mesmo lado da superfície sobre a qual incidem. As superfícies refletoras podem ser classificadas como polidas ou ásperas:
 - polidas (superfície especular) – gera uma reflexão chamada especular, pois os raios são refletidos em uma única direção, onde o ângulo de incidência e de reflexão são iguais, refletindo imagens perfeitas; e
 - áspera (superfície difusa) – gera uma reflexão chamada difusa, onde o raio incidente é refletido em várias direções.
- transparência ou transmissão (difusão): permitem a passagem da luz através de um meio segundo o grau de refração sofrido pelos raios luminosos. A refração é a modificação na direção de propagação da radiação, determinada pela modificação na velocidade de propagação que ocorre quando um raio luminoso passa de um meio não homogêneo para outro. A transmissão pode ser:
 - difusa (superfícies translúcidas) – ocorre quando o fluxo luminoso emitido se espalha em todas as direções; e
 - especular (superfícies transparentes) – ocorre quando as superfícies deixam passar grande parte do fluxo luminoso em uma mesma direção.
- absorção: ocorre sempre que raios luminosos incidem sobre a superfície dos corpos e lá permanecem, transformando a energia radiante numa forma diferente de energia, normalmente calor, por interação com a matéria.

As luminárias podem ser classificadas, segundo o tipo de distribuição luminosa que possibilitam, da seguinte maneira (figura 1.16):

- iluminação direta: dirige de 90 a 100 % do fluxo para baixo;
- iluminação semi-direta: dirige a maior parte do fluxo luminoso para baixo – 60 a 90 %;
- iluminação geral difusa: distribui eqüitativamente o fluxo luminoso para baixo e para cima - 40 a 60 %;
- iluminação semi-indireta: direciona a maior parte do fluxo luminoso para cima – 60 a 90 %; e
- iluminação indireta: direciona de 90 a 100 % do fluxo luminoso para cima.

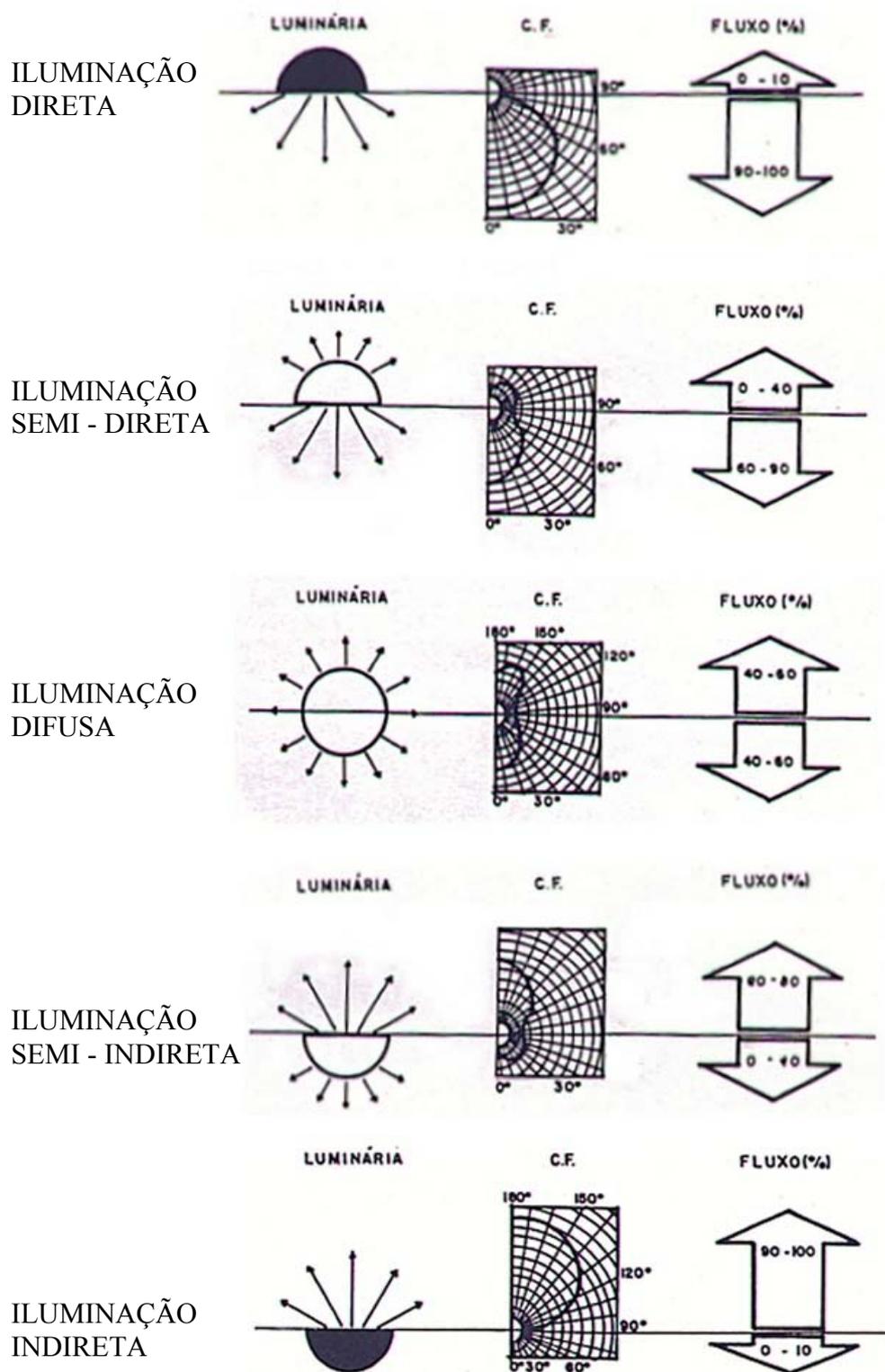


Figura 1.16 – Tipos de luminárias segundo a radiação do fluxo luminoso²⁸

²⁸ SILVA, 1992: 27-29

1.4 Métodos de cálculo de iluminação artificial

Dentre os métodos de cálculo para iluminação artificial, os mais utilizados são o Método do Lúmens, baseado na determinação do fluxo luminoso médio para uma área definida; e o Método do Ponto por Ponto, baseado na determinação da quantidade de luz que incidirá em um ponto pré-definido. Um outro método, adotado a partir de 1964 pela *Illuminating Engineering Society*, chamado Método das Cavidades Zonais, é um método complementar ao Método dos Lúmens, utilizado para determinar o fator de utilização do recinto para aplicação nos cálculos.

a) Método dos Lúmens:

É utilizado para calcular a iluminação global a partir da determinação do iluminamento médio no plano de trabalho, utilizando para isso dados gerais obtidos por meio de tabelas encontradas em manuais específicos de iluminação ou dados fornecidos pelo fabricante de lâmpadas e luminárias, de forma a calcular o fluxo luminoso necessário a partir da seguinte equação:

$$\phi = \frac{E \times S}{\mu \times d} \quad (1.8)$$

onde: ϕ ; fluxo luminoso total emitido pelas lâmpadas, em lúmens;

E ; iluminância média requerida no plano de trabalho, em lux;

S ; área do recinto, em m^2 ;

μ ; fator de utilização, em percentual - definido a partir da tabela que relaciona o índice do local (**II**)²⁹ (ver equação 1.9) e o fator de reflexão (ρ) do teto, paredes e piso, ou calculado através do Método das Cavidades Zonais definido a seguir; e

d ; fator de depreciação de serviço da luminária, em percentual – é definido a partir das características de limpeza do ambiente.

²⁹ O índice do local (**II**) é um valor percentual que representa a geometria do recinto.

$$\boxed{II = \frac{C \times L}{(C + L) \times h}} \quad (1.9)$$

onde: **II**; índice do local;

C; comprimento do local, em m;

L; largura do local, em m; e

h; distância da fonte de luz ao plano de trabalho, em m.

Com o valor do fluxo necessário para iluminar o ambiente, aplica-se a expressão (1.10) para o cálculo do número de luminárias necessárias e a expressão (1.11) para o cálculo do número de lâmpadas.

$$\boxed{N = \frac{\phi}{\phi lum}} \quad (1.10)$$

onde: **N**; número de luminárias; e

φlum; fluxo luminoso da luminária, em lumens.

$$\boxed{\phi lum = \phi lamp \times n} \quad (1.11)$$

onde: **φlamp**; fluxo luminoso de uma lâmpada, em lumens; e

n; número de lâmpadas.

A distribuição das luminárias é dada pelo número de luminárias, tomando-se como espaçamento máximo entre eixos o valor de 1,1 vezes a altura do recinto, sendo que a distância entre a luminária e a parede é dada pela metade da distância entre o eixo de duas luminárias.

Para a definição do fator de utilização, pode-se utilizar a tabela descrita no anexo A ou o Método das Cavidades Zonais, que se baseia no cálculo dos índices de cavidade e das refletâncias de cada cavidade existente, além da refletância da parede para determinar o fator.

Neste método, o ambiente é dividido em três cavidades (sub-espços) básicas, descritas a seguir:

- cavidade do teto (C_T): é a cavidade situada acima do plano das luminárias;
- cavidade do recinto (C_R): equivale à área situada entre o plano da luminária e o plano de trabalho; e
- cavidade do chão (C_C): é a cavidade situada abaixo do plano de trabalho.

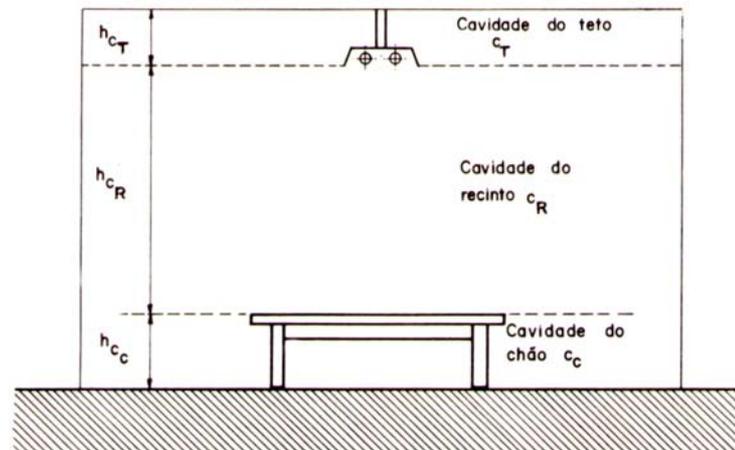


Figura 1.17 – Divisão do ambiente a ser iluminado nas três cavidades básicas³⁰

Inicialmente, são calculados os índices de cavidade pelas equações (1.12) e (1.13), sendo que a 1.12 é usada para o cálculo de ambientes com plantas regulares, de formato retangular, e a 1.13 é utilizada para calcular ambientes com plantas irregulares (de outros formatos).

$$I_c = \frac{5h \times (C + L)}{C \times L} \quad (1.12)$$

$$I_c = \frac{2,5 \times P \times h}{C \times L} \quad (1.13)$$

onde: I_C ; índice de cavidade do teto, recinto ou chão (I_{CT} , I_{CR} , I_{CC})
 C ; comprimento (maior dimensão) do ambiente, em m;
 L ; largura (menor dimensão) do ambiente, em m;
 h ; altura da cavidade do teto, recinto ou chão (h_{CT} , h_{CR} , h_{CC}), em m; e

³⁰ MOREIRA, 1982: 122

P; perímetro da cavidade do chão, em m.

Após a determinação dos índices de cavidade, determina-se as refletâncias para as cavidades do teto e do chão, ambas determinadas por tabela (ver gráfico 1 - anexo A) e a refletância das paredes (ρ_{paredes}) através da tabela de refletância (ver anexo A). A refletância da cavidade do teto (ρ_{CT}) é a combinação das refletâncias do teto e das paredes e a refletância da cavidade do chão (ρ_{CC}) é a combinação das refletâncias do chão e das paredes. Para o caso do uso de luminárias embutidas ou montadas à superfície do teto ($\rho_{\text{CT}} = 0$).

Com os valores de ρ_{CT} , ρ_{paredes} , I_{CR} e o tipo de luminária empregada, define-se o valor do fator de utilização (μ) utilizando o gráfico 2 correspondente (ver anexo A). De posse do fator de utilização, aplica-se a equação (1.8), do método dos lúmens, para a determinação do fluxo luminoso necessário para a iluminação do ambiente.

b) Método do Ponto por Ponto

É utilizado para o cálculo da iluminação local, considerando cada foco de luz incidindo em um determinado ponto de modo a verificar seu nível de iluminamento e calcular a iluminação complementar de destaque utilizando as expressões (1.14), para o cálculo do nível de iluminamento no plano horizontal, e (1.15), para o cálculo do nível de iluminamento no plano vertical.

$$E_h = K \times \frac{I \times \alpha_h}{d^2} \times \cos \alpha_h \quad (1.14)$$

$$E_v = K \times \frac{I \times \alpha_v}{d^2} \times \sin \alpha_v \quad (1.15)$$

onde: **K**; fator de depreciação, em percentagem;

I; intensidade luminosa dada pela curva fotométrica, em candela;

d; distância do foco ao ponto a ser iluminado, em m; e

α_h ; ângulo horizontal de incidência em relação à normal = $\arctg x/y$

α_v ; ângulo vertical de incidência em relação à normal = $\arctg x/y$

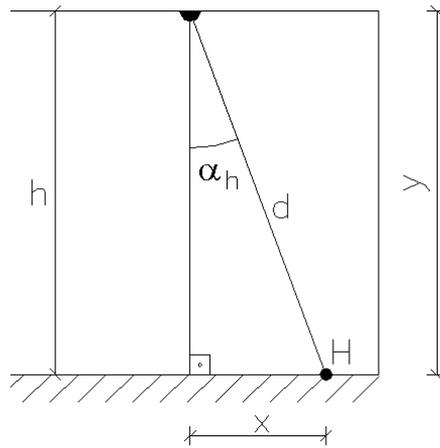


Figura 1.18 – Determinação do ângulo horizontal

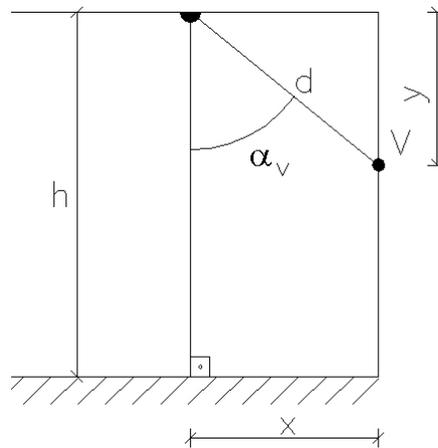


Figura 1.19 - Determinação do ângulo vertical

1.5 O processo de projeto de arquitetura e de iluminação

O processo projetual em arquitetura envolve uma série de variáveis que são determinadas pelo plano conceitual e podem ser classificadas segundo Rego (2000: 31-32) em dois grupos, definidos como o grupo das variáveis internas, relacionadas aos indivíduos, e o grupo das variáveis externas, referentes ao contexto, onde podemos incluir as condicionantes físico-ambientais, e entre elas, a iluminação, objeto desse estudo. A iluminação, seja ela natural ou artificial, por sua vez, envolve um grande

número de variáveis que irão interferir no projeto e que devem ser estudados ao longo do processo projetual.

Entende-se por projeto de iluminação o processo de definição, cálculo e representação dos sistemas de iluminação a serem utilizados em um determinado espaço, a partir de uma alternativa de solução, para atender às questões quantitativas, relacionadas ao nível de iluminação necessário para a execução das atividades a que o espaço se propõe; e às questões qualitativas para uma melhor apreensão do espaço do ponto de vista do conforto visual, devendo ser entendido como a integração da iluminação natural e artificial.

Dessa forma, serão aqui definidas as etapas do processo projetual arquitetônico, sua interação com a iluminação e as necessidades qualitativas e quantitativas para o bom desempenho do edifício em relação ao conforto visual.

1.5.1 O processo de projeto

O processo de projeto em arquitetura segue critérios na avaliação das propostas que dependem da concepção do projetista e das condicionantes contextuais e é representado por uma progressão iniciada por um problema, por uma seqüência de etapas de definição da proposta em estudo e por uma alternativa de solução.

Silva (1998: 44-49) define seis categorias segundo as quais pode-se estabelecer o nível de qualidade da proposta de projeto para a solução de um problema particular de organização do espaço:

- necessidade – capacidade do projeto em satisfazer os objetivos definidos na sua concepção;
- resolubilidade – capacidade do projeto de resolver às questões implícitas no contexto da realidade física da obra concebida;

- otimização – as soluções propostas devem satisfazer às condições ótimas para a resolução do problema;
- viabilidade – as propostas devem ser aplicáveis de forma exequível à situação em estudo do ponto de vista da tecnologia, economia, legislação, entre outros;
- grau de definição – o projeto deve abordar todos os aspectos materiais exigidos para a completa solução do problema; e
- comunicação – o projeto deve ser um meio para se atingir o objetivo determinado, que é a construção do edifício.

Lam (1986: 4-8) define os objetivos que o projeto de iluminação natural deve alcançar e que poderíamos definir também como sendo os objetivos para qualquer tipo de projeto onde o uso da luz seja incorporado, seja ela natural ou artificial. Esses objetivos são:

- fornecer conforto ao usuário ao realizar as tarefas para qual o ambiente foi projetado;
- satisfazer as necessidades do programa estabelecido;
- minimizar os custos com energia na utilização da luz elétrica; e
- minimizar custos construtivos utilizando sistemas integrados de iluminação³¹.

O processo de projeto pode ser dividido em quatro fases, caracterizadas da seguinte forma (MONTENEGRO, 1987: 70-78 e LAWSON, 1997: 32):

- fase 1 – Assimilação: coleta de dados relacionados ao problema proposto, tais como objetivos, dimensões, localização, materiais e técnicas;
- fase 2 – Estudo geral: associação dos dados de maneira a formular alternativas de solução para o projeto;

³¹ Uso da iluminação natural e artificial, conjuntamente, de forma a atingir os níveis adequados de iluminação, diminuindo o consumo de energia elétrica.

- fase 3 – Desenvolvimento: avaliação das soluções registradas e seleção da solução mais adequada; e
- fase 4 – Comunicação: representação ou expressão da alternativa escolhida.

No próximo item serão confrontadas as fases da projeção arquitetônica com as questões relativas ao conforto luminoso e ao processo de projeto de iluminação, analisados do ponto de vista da aplicação da simulação computacional durante o desenvolvimento da proposta projetual.

1.5.2 O projeto de iluminação

Entende-se por conforto ambiental o conjunto das questões relativas à iluminação, à insolação, ao desempenho térmico, à ventilação natural e à acústica, devendo ser consideradas na fase inicial da proposta arquitetônica, já que é nessa fase que são decididos os parâmetros mais determinantes do projeto, tais como implantação e orientação do edifício, posicionamento, dimensionamento e características das aberturas.

A abordagem do conforto visual segue o pressuposto de que a função é fator determinante na adoção da proposta a ser desenvolvida e nas estratégias de manejo da luz no espaço arquitetônico e tem como questão fundamental a relação existente entre os aspectos qualitativos e quantitativos da luz no ambiente projetado.

Os aspectos quantitativos se referem aos dados físicos mensuráveis, tais como, intensidade, fluxo, iluminância, índice de reflexão, entre outros. Os aspectos qualitativos estão relacionados com a produção de estímulos e sensações, que são difíceis de serem medidos, já que são aspectos subjetivos.

Aqui serão definidas as etapas do projeto de iluminação, como: **conceituação/definição**, **cálculo** e **avaliação** da proposta. Na etapa de conceituação/definição são determinadas as características do problema e as possíveis soluções. Na etapa de cálculo são definidos os parâmetros quantitativos através do

cálculo da iluminação do ambiente, que possibilitam avaliações mais precisas das condições visuais a serem implementadas. A etapa de avaliação é onde se verifica se a solução proposta atende aos requisitos estabelecidos para o problema, onde os dados quantitativos podem ser comparados com as necessidades do projeto e um estudo qualitativo pode ser realizado, principalmente com o uso das tecnologias computacionais e, em particular, o uso da simulação computacional aplicado ao projeto de iluminação.

Uma vez iniciado o processo de projeto e a etapa de conceituação/definição, o conjunto de requisitos a serem atendidos, deve especificar detalhes sobre o uso dos espaços e critérios de performance para a iluminação, tais como, quantidade de luz, orientação da edificação, necessidade de elementos de controle e redirecionamento³², definição da forma de integração da luz natural ao projeto de iluminação artificial.

Após a definição do programa arquitetônico, o sítio deve ser avaliado através do estudo do clima, incidência solar e sombreamento por parte das edificações vizinhas, vegetação e terreno, de forma a se definir a posição e dimensionamento das aberturas, o uso de elementos de controle e a especificação dos materiais a serem empregados. A partir daí, segue-se às decisões em termos da forma arquitetônica que é determinada pela combinação do programa, sítio e clima, que é o contexto na qual a integração do edifício com os objetivos de conforto visual devem ser considerados (LAM, 1986).

Nos estágios iniciais do projeto, a forma da edificação determina o desempenho da iluminação natural sobre os ambientes, já que a orientação do espaço favorece a maior ou menor entrada de luz solar durante as horas do dia e durante os dias do ano, influenciando no desenho dos controles da luz solar e no ganho de calor, devido ao movimento aparente do sol.

Após a etapa de conceituação, e já com a definição do projeto arquitetônico, pode-se calcular os níveis de iluminância natural para a alternativa escolhida e sua integração com o projeto de iluminação artificial. Este é melhor desenvolvido após a definição das especificações gerais do espaço, tais como os materiais a serem aplicados nas paredes, piso e teto, e a atividade a ser executada em cada ambiente proposto.

³² Elementos de controle da radiação solar usados para barrar ou redirecionar a luz solar direta e (ou) refletida, tais como marquises, beirais, brises e *lightshelves* (FREIRE, 1997:42-43).

É possível desenvolver projetos de iluminação comprometidos com os aspectos conceituais e qualitativos, gerando soluções adequadas às necessidades do conforto visual, diminuindo os gastos com energia elétrica e proporcionando ambientes agradáveis para a execução das tarefas.

1.6 A percepção e o projeto de iluminação

O objetivo do projeto de iluminação é conseguir que o ocupante do espaço consiga realizar as tarefas, para qual o espaço foi projetado, atendendo às necessidades do conforto visual.

Entende-se como conforto visual, o grau de satisfação visual produzido pelo ambiente iluminado, que se caracteriza pela eliminação do ofuscamento, obtendo o contraste desejado entre as diferentes superfícies do ambiente e o equilíbrio entre luminâncias verticais³³ e horizontais³⁴ (REVISTA PROJETO, 1993: 75).

A percepção de um objeto é determinada pelo nível de iluminamento do local, pelos contrastes de cor e luminância, pela tarefa visual a ser executada e pela distância do objeto ao observador.

O nível de iluminamento do local é definido a partir da proposta de iluminação especificada para o ambiente e as interações entre as fontes luminosas e as superfícies dos objetos.

O contraste constitui-se no destaque que possa existir entre o objeto focado e as outras superfícies que compõem o entorno. Um grau elevado de contrastes de luminância gera o ofuscamento, que pode ocorrer tanto pela visão direta da fonte de luz quanto por reflexão desta fonte sobre a superfície visualizada e deve ser controlado para se obter um bom desempenho visual (SILVA, 1992: 8).

O fenômeno da visão é a habilidade do olho de perceber a porção do espectro de radiação que é definida como luz visível. Apresenta dois aspectos: o objetivo, relacionado com as características físicas da luz, energia, comprimento de onda e

³³ Valores de luminância encontrados nas superfícies verticais, perpendiculares ao piso.

³⁴ Valores de luminância encontrados nas superfícies horizontais, paralelas ao piso

freqüência; e outro subjetivo, associado à interpretação do fenômeno luminoso pelo observador, como acuidade visual, percepção e campo visual.

Quanto ao aspecto objetivo, podemos definir a luz como sendo uma energia radiante capaz de produzir uma sensação visual ao observador, sendo sua propagação caracterizada por uma freqüência e um comprimento de onda. A luz visível é a radiação do espectro eletromagnético com comprimento de onda entre 380 e 780 nm (nanômetro)³⁵, podendo ser admitida através de fontes primárias, aquelas que emitem luz própria, ou fontes secundárias, cuja luminância resulta da reflexão da luz nas superfícies iluminadas.

Quanto ao aspecto subjetivo, a acuidade visual é a capacidade do sistema visual de ver os objetos de maneira distinta. Campo visual são os limites dentro dos quais a visão humana, focalizando um ponto sobre a linha do horizonte, pode alcançar. Esses limites são 50° para cima, 60° para baixo e 80° para os lados. Percepção é a maneira como o olho distingue o ambiente ao seu redor e dependerá da adaptação visual, devido à rápida mudança do diâmetro da pupila através da sua dilatação ou contração, à variação nos níveis de luminância do ambiente.

É devido a essa adaptabilidade que, apesar da luminância de um ambiente poder ser registrada quantitativamente por um fotômetro³⁶, ela não é percebida da mesma maneira pelo olho humano, que a capta de forma subjetiva a depender do estímulo da retina ao fluxo luminoso que a atinge, proveniente não só da luz recebida da superfície, mas também de todo o campo de visão a sua volta (FREIRE, 1997: 15).

A adaptação aos níveis de iluminação é considerada a característica dominante da visão humana, pois, ao visualizar um objeto ou espaço, o homem considera um nível de referência (claro, escuro ou colorido) e produz sua própria interpretação, diferente de pessoa para pessoa e dependente da adaptabilidade de cada um.

É por isso que, apesar dos níveis de iluminação sofrerem uma grande variação durante todo o dia, ela não é percebida quantitativamente pelo homem, já que é mais fácil perceber a variação relativa nos gradientes de iluminação do que os valores absolutos (LAM, 1986: 26).

³⁵ 1 nm (nanômetro) = 10⁻⁹ m

³⁶ Equipamento utilizado nas medições do nível de iluminação.

O fenômeno da visão é caracterizado por três aspectos diferentes, porém dependentes um do outro, definidos como os aspectos físicos, relacionados à ótica geométrica e à luz como radiação; os aspectos fisiológicos, relacionados com o processo pelo qual o olho interage com a radiação luminosa; e os aspectos perceptuais, que envolvem a maneira pela qual o sistema visual interpreta o processo de adaptação à variação dos níveis de iluminação.

O conforto visual pode ser avaliado através da adaptação do olho à iluminação no espaço, do contraste de iluminação para a tarefa visual e ausência de ofuscamento. A adaptação, mesmo durante a noite, com iluminação artificial, é uma média da distribuição luminosa existente, existindo ainda uma tendência visual de perceber o ambiente como é conhecido e não só baseado na sua aparência no momento da visualização (MOORE, 1985: 27).

O contraste é a percepção dos objetos, através da distinção entre partes mais claras e partes mais escuras, porém um contraste muito acentuado pode vir a dificultar o discernimento de detalhes, já que o olho, ao se adaptar à média dos níveis de luminância, não visualiza corretamente a adjacência entre dois níveis muito diferentes, gerando desconforto. A utilização da cor nos projetos é uma forma de acentuar o contraste e a conseqüente distinção entre objetos.

O ofuscamento é um distúrbio na percepção visual causado por uma fonte de luz brilhante ou por uma reflexão com alto nível de luminância, podendo causar diminuição da acuidade visual e da sensibilidade ao contraste. Decorre da visualização de um brilho intenso em relação à média no nível existente, sendo dependente das dimensões das aberturas, do brilho do céu, da intensidade da fonte luminosa e da reflexão das superfícies.

Além desses efeitos, devemos considerar a distribuição luminosa no ambiente, a difusão e a geração de sombras, como citado anteriormente, de forma a melhorar a percepção do espaço. Isso porque, é desejado, nos projetos de iluminação, que haja uma distribuição luminosa uniforme nos planos de trabalho para melhor iluminar as tarefas, bem como a existência de uma iluminação difusa, o que evita o ofuscamento. Além disso, é preciso utilizar iluminação localizada e direcional de forma a criar sombras, melhorando a

distinção de detalhes dos objetos, acentuando sua forma e profundidade (GHISI, 1997: 39).

A partir da análise dessas questões é possível avaliar a iluminação do ponto de vista da percepção, considerando não só a necessidade de satisfazer quantitativamente os níveis de iluminação, mas também permitindo a visualização do espaço, com todas as suas características, tais como a percepção correta das cores e da interação da luz com as superfícies.

Na prática, esses efeitos podem ser utilizados no processo projetual para provocar respostas visuais e sensitivas inerentes à função de cada tipo de edifício, aprimorando as sensações que o projeto de iluminação pode gerar perante o usuário do espaço.

Em edifícios tais como escritórios, escolas e bibliotecas, além de ser necessário que o nível de iluminação esteja de acordo com a atividade a ser executada, é preciso evitar os contrastes excessivos, causados pela falta de uniformidade da iluminação e pela presença de áreas de alta intensidade luminosa que ocasionam o ofuscamento dos ocupantes.

Para os edifícios de lazer e cultura, tais como teatros, museus, restaurantes e *boites*, a iluminação é responsável pelo efeito cênico, sendo portanto necessário que haja contrastes de luz e sombra e desuniformidade da iluminação.

Levando-se em conta que os métodos tradicionais de cálculo e projeto consideram somente os aspectos quantitativos da iluminação, é necessário que se desenvolva uma nova metodologia de projeção preocupada com as questões subjetivas, relacionadas à percepção do espaço iluminado.

É dessa forma que o uso da tecnologia computacional pode vir a ajudar nesse processo, possibilitando recursos para visualização dos espaços projetados, avaliando a qualidade do projeto de iluminação e testando alternativas para a determinação da melhor solução projetual.



MODELOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

“Somente o aprendizado do projetar poderá levar o arquiteto a compreender quais são as operações que se devem levar a cabo com o pleno auxílio da consciência raciocinante e, eventualmente, com a ajuda dos meios técnicos (de desenho ou matemáticos: desde as quatro operações e da régua de cálculo, passando pela calculadora mecânica e o computador)”.

Ludovico Quaroni

2.0 MODELOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os problemas enfrentados pela sociedade, principalmente os relacionados ao espaço em que habita, são cada vez maiores e mais complexos exigindo o uso de técnicas e procedimentos para auxiliar no seu entendimento e solução. Através do uso da simulação computacional, aplicada ao processo de projeto e análise do espaço urbano e arquitetônico, pode-se ter subsídios para as decisões dos problemas espaciais.

É preciso que haja, por parte do projetista, um conjunto de recursos e um amplo conhecimento do problema a ser resolvido de forma a definir o melhor modelo para a simulação, ou seja, uma formulação capaz de representar e operar os Sistemas do Mundo Real³⁷ - SMR o qual deseja-se estudar.

Para um melhor entendimento do assunto, podemos definir sistema como “(...) uma coleção de itens, entre os quais se possa encontrar ou definir alguma relação, que são objeto de estudo ou interesse” e modelo como sendo “(...) uma **abstração** do sistema” (SOARES, 1990: 2-3).

Neste trabalho, serão usados modelos matemáticos (numéricos) para representar os espaços arquitetônicos e os fenômenos da iluminação. A construção de um modelo deve considerar a finalidade e os elementos importantes para a resolução do problema, assim como a relação entre esses elementos.

O objetivo de um modelo é reproduzir o sistema e, a partir daí, conhecer o comportamento e o desempenho desse sistema. Partindo desse pressuposto, os modelos de simulação podem ser usados para os seguintes objetivos, segundo Soares (1990: 4):

- ferramenta de análise para detecção de elementos críticos;
- ferramenta explanatória para definição de um sistema ou problema;
- ferramenta para síntese e avaliação de soluções propostas; e
- ferramenta de planejamento para desenvolvimentos futuros.

³⁷ Sistema que existe, caracterizado por seus componentes, sua organização e função.

Assim, a modelagem para simulação é assunto de interesse de projetistas na Arquitetura e no Urbanismo, visto que, com o uso da simulação, pode-se prever o comportamento de um ambiente proposto e selecionar uma alternativa de projeto a partir de uma gama de soluções, possibilitando inferências sobre o sistema sem construí-lo (sistemas propostos); sem perturbá-lo, em casos de sistemas de alto custo operacional; e sem destruí-lo, determinando os limites para o seu funcionamento.

Para a simulação do projeto de iluminação, tem se utilizado os recursos da computação gráfica para simular os efeitos fotorealísticos do mundo real a partir do processo de síntese de imagens, onde podemos construir uma simulação reproduzindo ambientes, fenômenos e comportamentos do mundo físico, gerando imagens que parecem reais segundo o padrão de referência da fotografia, o que envolve a representação gráfica precisa de objetos e a descrição física dos efeitos de iluminação na cena, que incluem reflexões, transparências, texturas e sombras (MACHADO, 2001).

2.1 Modelos

A palavra MODELO pode significar uma teoria, lei, hipótese, idéia estrutural, síntese de dados; ou representação (substantivo), grau de perfeição (adjetivo) e demonstrar (verbo). Do latim “*modulos*” (medida) é a representação de um objeto que se repete, protótipo para produção, seguindo os pressupostos de cópia, de reprodução e repetição.

Morais (1995: 151-152) descreve os seguintes significados para a palavra modelo:

- segundo o antigo dicionário de Bouillet: (modelo arquitetônico) representação exata de um edifício ou máquina numa outra escala;
- segundo o dicionário inglês de Oxford: modelo - representação da estrutura de um objeto projetado ou construído; forma, linguagem e escala da estrutura de um objeto a ser construído; objeto de imitação;
- segundo os manuais técnicos de construção do início do século XX: modelo - é associado a noções de função, a aspectos quantitativos de dimensão, de estrutura, de materiais e à forma de construir/reproduzir;

- segundo a Enciclopédia Luso-Brasileira: modelo - é associado a um raciocínio. Padrão da realidade traduzida, de preferência, em linguagem matemática.

Para Martin (1975), modelo é a representação de uma realidade através da expressão de determinadas características relevantes, sendo feita a partir da observação e abstração, processos subjetivos. A determinação dessas características é definida pela intenção do construtor do modelo. As questões, as quais o modelo irá se referir, dependem da formação do realizador do modelo, dos recursos disponíveis, da instituição em que trabalha, entre outros aspectos.

Para Machado (2001: 117), modelo (matemático computacional) é

(...) um sistema matemático que procura colocar em operação propriedades de um sistema representado. O modelo é portanto, uma abstração formal – e, como tal, passível de ser manipulado, transformado e recomposto em combinações infinitas -, que visa funcionar como a réplica computacional da estrutura, do comportamento ou das propriedades de um fenômeno real ou imaginário.

O dicionário Michaelis define que modelo é um desenho ou imagem que representa o que se pretende reproduzir, desenhando, pintando ou esculpindo, procurando imitar ações e maneiras do objeto que foi modelado.

Segundo o dicionário, Houaiss (2001: 1941), modelo é a representação tridimensional em escala reduzida de um objeto, onde são descritos os fenômenos físicos ou, eventualmente, é feita a previsão de novos fenômenos ou propriedades tomando como base um certo número de leis físicas, em geral obtidas ou testadas experimentalmente.

Martin (1975), destaca as principais funções dos modelos, que podem ser descritas da seguinte forma:

- psicológica: permite visualizar e compreender um grupo de fenômenos que não poderiam ser compreendidos de outra forma devido à sua magnitude ou complexidade;
- aquisitiva: pode-se definir e ordenar a informação;
- lógica: explica como se produz um fenômeno;

- normativa: compara alguns fenômenos com outro mais familiar;
- cognoscitiva³⁸: comunicação de idéias científicas;
- sistemática: proporcionar um marco onde se pode definir estudos parciais conhecendo sua interação com o resto do sistema; e
- avaliativa: proporciona um marco onde se pode simular os efeitos de diferentes decisões dentro de um sistema.

Diversos autores definem algumas classificações para os modelos, os quais podemos destacar:

1. Echenique (1975), classifica os modelos da seguinte forma:

- segundo sua finalidade, o modelo pode ser:
 - **descritivo**, onde sua principal intenção é explicativa, objetivando compreender a realidade para estabelecer como se produz um fenômeno e descrever relações entre os fatores relevantes;
 - **preditivo**, como sendo aquele que pretende prognosticar o futuro e se baseia no pressuposto de que o modelo é capaz de representar a forma como a realidade está evoluindo;
 - **explorativo**, onde sua principal intenção é descobrir, mediante especulação, outras realidades que podem ser possíveis variando sistematicamente os parâmetros básicos; e
 - **de planejamento**, no qual sua principal intenção é otimizar determinadas variáveis ou aspectos, simulando o efeito que decisões diferentes têm sobre um dado sistema.
- segundo o método de construção, ou seja, os meios escolhidos para representar a realidade, o modelo pode ser:

³⁸ Ato de adquirir conhecimento

- **físico**, representando as características físicas da realidade, sendo classificados como:
 - **icônicos**, tendo suas propriedades físicas representadas por meio de uma escala (ex.: modelos arquitetônicos, fotografias); e
 - **analógicos**, que usa regras de transformação para representar as propriedades físicas do objeto real (ex.: mapas, desenhos e gráficos).
- **conceitual**, representando as características relevantes mediante conceitos (linguagens ou símbolos), podendo ser:
 - **verbal**, através do emprego da palavra falada ou escrita; e
 - **matemático**, através do uso de símbolos e relações expressas em termo de operações.
- segundo a análise do tempo, o modelo pode ser:
 - **estático**, que se concentra na posição e possibilidades num momento particular dado; e
 - **dinâmico**, que se concentra em processos e funções através do tempo.

Considerando essa classificação podemos exemplificar, na arquitetura, alguns tipos de modelos:

Projeto (desenho): modelo descritivo, físico, analógico e estático;

Memorial descritivo: modelo conceitual verbal;

Maquete de um edifício: modelo descritivo, físico, icônico e estático.

2. Elma Ghraby³⁹ apud MORAIS (1995), descreve um outro tipo de classificação para os modelos em função do tipo de abstração do objeto e do objetivo para a construção, podendo estes serem definidos como:

- **icônico**, que descreve a realidade analisada com o objetivo de representar as questões físicas simples de um fenômeno particular;
- **analógico**, que caracteriza o objeto com as questões que lhe são inerentes, selecionando as propriedades que se quer reproduzir, com o objetivo de descrever um campo mais vasto no tempo (ex. Filosofia); e
- **simbólico**, que representa o sistema através de símbolos para traduzir elementos e suas relações, vocacionado para o campo da matemática.

3. Segundo A . Bruschi⁴⁰ apud MORAIS (1995), os modelos podem ser classificados segundo a função do uso/finalidade do modelo como:

- **modelo de configuração simplificante direcionado para a representação gráfica**, que visa traduzir a realidade objetiva;
- **modelo organizador sintático**, usado para sistematizar um conjunto de informações, identificando o contexto do sistema para que a informação reproduzível seja perceptível;
- **modelo heurístico**, usado para transmitir informação para o objeto que se pretende construir e transmitir;
- **modelo de interpretação isomórfica**, que tem a finalidade de garantir a correspondência biunívoca de dois sistemas; e
- **modelo de instrumentação teórica**, usado para testar hipóteses com aptidão para o ordenamento do território.

³⁹ ELMA GRABY, S. E. The design of production system. Nova Iorque: Reinhold Publishing Corporation, 1966. In: MORAIS, João Sousa. **Metodologia de projecto em Arquitectura: organização espacial na Costa Vicentina**. Lisboa: Editorial Estampa, 1995. 1. ed.

⁴⁰ BRUSCHI, ^a La teoria dei modelli nelle scienze sociali. Bolonha: Il Mulino, 1971. p. 35-54 MORAIS, João Sousa. **Metodologia de projecto em Arquitectura: organização espacial na Costa Vicentina**. Lisboa: Editorial Estampa, 1995. 1. ed.

Para abordar o conceito de modelo na Arquitectura é necessário entender o seu significado temporal, as permanências físicas e as regras que regulam a conceptualização e proliferação deste, tendo como palco preferencial a cidade, as relações que se estabelecem no seu quadro topológico edificatório habitacional (enquanto função por excelência da cidade) apresenta um carácter repetitivo, afecto aos diferentes tempos de construção da urbe (MORAIS, 1995: 155).

O modelo deve ser de fácil compreensão, contudo mantendo uma complexidade tal que reflita realisticamente as características importantes do Sistema do Mundo Real, sendo construído de forma reducionista, pois contendo todas as características do objeto concreto é o próprio objeto.

Os modelos têm o objetivo principal de representar objetos, sistemas, fenômenos ou conceitos, de forma a compreendê-los melhor, sendo possível simular operações e manipular suas características para propor alterações. Deve ser simples para a manipulação e compreensão daqueles que o utilizam, representativo no total das implicações que pode ter e completo para representar de forma precisa o sistema em estudo.

Para a construção de um modelo é necessário satisfazer às seguintes condições:

- existência ou formulação de um objeto ou sistema a ser investigado;
- identificação das características essenciais para o estudo; e
- validação do modelo e estabelecimento de conclusões sobre os resultados.

Segundo Moraes (1995) a construção de modelos depende de três tipos de ações definidas como: eleição, abstração e reprodução. A eleição é a escolha do objeto a ser reproduzido de acordo com fatores diversos, que dependerá da finalidade a que se propõe o modelo. A abstração é um complexo processo mental, de raciocínio, de forma a encontrar a linguagem de representação do objeto. A reprodução é o estabelecimento de um conjunto de regras que tem como objetivo final a utilização do modelo no campo de atuação proposto.

Tabela 2.1 – Súmula da abordagem conceitual de modelo

SIGNIFICADOS	FUNÇÕES	CLASSIFICAÇÕES		
		1	2	3
<ul style="list-style-type: none"> • Teoria, lei, hipótese, idéia estrutural, síntese de dados • Representação, grau de perfeição, demonstrar • Representação de um objeto que se repete, protótipo para produção • Representação exata de um edifício ou máquina numa outra escala • Representação da estrutura de um objeto projetado ou construído • Forma de construir, reproduzir • Representação da realidade através de características relevantes • Sistema matemático que opera propriedades do sistema representado • Desenho ou imagem que representa o objeto modelado • Representação tridimensional em escala reduzida de um objeto 	<ul style="list-style-type: none"> • Psicológica • Aquisitiva • Lógica • Normativa • Cognoscitiva • Sistemática • Avaliativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Segundo a finalidade <ul style="list-style-type: none"> - Descritivo - Preditivo - Explorativo - De planejamento • Segundo o método <ul style="list-style-type: none"> - Físico <ul style="list-style-type: none"> - Icônico - Analógicos - Conceitual <ul style="list-style-type: none"> - Verbal - matemático • Segundo a análise do tempo <ul style="list-style-type: none"> - Estático - Dinâmico 	<ul style="list-style-type: none"> • Segundo o tipo de abstração e objetivo <ul style="list-style-type: none"> - Icônico - Analógico - Simbólico 	<ul style="list-style-type: none"> • Segundo a finalidade <ul style="list-style-type: none"> - De configuração simplificante direcionado para a representação gráfica - Organizador sintático - Heurístico - De interpretação isomórfica - De instrumentação teórica

Para que o modelo possa ser construído é preciso que as seguintes informações sejam especificadas (GONÇALVES, 1995):

- geométricas: criação de um modelo representativo da realidade, mas isento de complexidades desnecessárias;
- construtivas: determinação dos materiais constituintes de cada elemento; e
- operativa: referentes à operação do objeto modelado.

Neste trabalho, o conceito de modelo está relacionado a um processo de abstração de uma situação real, sendo a realidade reproduzida de diversas formas, podendo ser físico ou conceitual, com analogias positivas (similaridades) ou negativas (diferenças), de acordo com sua finalidade e a capacidade seletiva do modelador.

Os modelos físicos em escala reduzida são utilizados como instrumento para a compreensão do projeto, possibilitando a visualização da geometria do objeto arquitetônico e estudos de iluminação. Entretanto, possuem limitações que restringem sua aplicação, como a escala utilizada, que nem sempre permite reproduzir detalhes com exatidão; a representação fiel dos acabamentos, cor, textura e refletância; e, no caso particular da iluminação artificial, a impossibilidade de representar lâmpadas e luminárias em escala reduzida.

Em relação a estudos de iluminação natural no interior de edifícios, o modelo reduzido permite fazer um estudo dos aspectos fotométricos, porém necessita que os testes sejam feitos em condições naturais de insolação, o que pode causar resultados variados, devido às constantes mudanças na quantidade de iluminação durante as horas do dia e os dias do ano; ou com o uso de céus artificiais para assegurar constância total das condições de iluminação, que, por sua vez, são equipamentos caros e não estão disponíveis para projetistas no dia-a-dia do processo projetual, só encontrado em laboratórios de pesquisa.

Os modelos construídos através de técnicas e algoritmos em ambiente computacional auxiliam o projetista na compreensão da forma e do comportamento do objeto projetado, sendo a base para a utilização da simulação computacional, mas também possuindo limitações que irão influenciar nos resultados obtidos.

Serão utilizados os seguintes tipos de modelos, classificados segundo sua aplicação no processo de simulação:

- a representação do espaço arquitetônico será feita através do emprego de **modelos geométricos tridimensionais** que são modelos matemáticos (numéricos) representados através de algoritmos e estrutura de dados capazes de responder às solicitações requeridas no processo. Tem como domínio o universo da Matemática. Será utilizado como dado de entrada para o processo de simulação; e
- a representação do fenômeno da luz será feita através dos **modelos de iluminação** que são modelos matemáticos (numéricos) representados por algoritmos embutidos nos simuladores com a função de processar os dados de entrada para a simulação. Tem como domínio o universo da Física.

O modelo geométrico tridimensional é construído segundo as técnicas da modelagem geométrica descritas a seguir e o modelo de iluminação, neste trabalho, os algoritmos implementados para o cálculo de iluminação, serão descritos no capítulo III.

3.2.1 A modelagem geométrica tridimensional

A forma é uma informação importante em se tratando da visualização e requer a definição de uma série de características do espaço modelado para descrever com exatidão a geometria do modelo.

A construção do modelo geométrico do ambiente é a primeira etapa para o desenvolvimento do processo de simulação e, conseqüentemente, para a geração de imagens fotorealísticas.

Entende-se por modelamento geométrico o “conjunto de técnicas relacionadas à definição e modificação dos modelos dos objetos da cena, descrevendo-os de forma abstrata segundo as leis matemáticas geométricas” (ZUFFO, 1992: 31).

A modelagem geométrica tridimensional pode ser representada através das seguintes técnicas:

- *Wireframe* (estrutura de arame) – técnica mais simples para a representação de modelos de objetos, sendo estes descritos através de primitivos geométricos simples, tais como retas, pontos e arcos. Nessa técnica o objeto é representado apenas pela sua aresta, podendo ser exibido rapidamente nas diversas vistas ortográficas e isométricas, porém com uma visualização ambígua já que, não contendo superfícies, todos os elementos são visíveis, independente da posição em relação ao observador, não permitindo a identificação do objeto como um sólido (objeto físico).
- Por superfícies – permite uma descrição visual e matemática da forma da superfície do objeto através de elementos de superfícies, tais como polígonos planos, superfícies analíticas (esferas, cones, cilindros) ou qualquer superfície de forma livre descrita por técnicas como Bezier, a B-splines e NURBS. São úteis para o cálculo de volume, para a criação de modelos para síntese de imagens, mas não podem representar o interior do modelo como um sólido, uma vez que descreve apenas a casca (superfície) dos vários objetos ou elementos representados.
- Por sólidos – técnica que utiliza sólidos primitivos (blocos, cilindros, cones, esferas) para modelar formas simples ou complexas que descrevam completamente o objeto representado, permitindo o cálculo de suas propriedades (volume e massa). Existem vários métodos de representação de sólidos, dos quais podemos destacar a modelagem por varredura (*sweep*), que consiste na criação de contornos bidimensionais (geratriz) que são deslocados ao longo de um caminho (diretriz) fazendo uma varredura e criando assim um sólido. Este sólido pode ser definido através de uma translação (extrusão) ou rotação em torno de um eixo. Outro tipo de representação é a chamada Representação por Fronteira ou B-Rep (*Boundary Representation*) onde o sólido é representado pelos segmentos de sua fronteira, descritos por faces, arestas e vértices. A representação por Geometria Sólida Construtiva ou CSG (*Constructive Solid Geometry*) é caracterizada por objetos gerados a partir de primitivos sólidos elementares (cilindros, cubos, paralelepípedos) combinados por meio de operações booleanas (soma, subtração e interseção).

Este trabalho empregou as técnicas de modelagem por superfícies, para a construção dos modelos simples, e por sólidos para a construção dos ambientes existentes que possuíam detalhes complexos.

Para o processo de simulação, é preciso definir de antemão o grau de detalhamento do modelo geométrico, quais os recursos que podem ser utilizados (blocos, *layers*) e como as superfícies poderão ser orientadas em relação à incidência da luz de forma a facilitar a importação, que a depender do programa de simulação, exige um formato de arquivo específico, podendo gerar a perda de algumas representações (objetos) no momento da conversão de um formato para outro.

2.2 Simulação computacional

Para alguns modelos, é possível utilizar métodos matemáticos para a obtenção dos resultados às questões estabelecidas, caracterizando o que é chamado de solução analítica de problemas. Porém, como a maioria dos modelos para o estudo da iluminação, são ditos complexos, é preciso desenvolver processos que possibilitem avaliar o modelo e dar respostas às diversas questões envolvidas, de forma rápida e precisa.

Com o surgimento dos computadores de grande capacidade de processamento, capazes de resolver sistemas de equações complexas, desenvolveu-se a chamada abordagem sistêmica, que “(...) constitui um método de resolver problemas (*problem solving*) que considera a totalidade dos aspectos envolvidos, analisando as interações entre as diversas partes e entre elas e o todo, formulando e avaliando alternativas para o todo e para cada uma das partes” (SERRA, 1995: 11).

A pesquisa operacional vem reforçar a aplicação dessa abordagem a problemas complexos tratados como sistemas de “entradas” e “saídas”, utilizando-a para a simulação de problemas que admitem muitas soluções e nas quais a questão central da solução é a otimização, permitindo a orientação do processo de tomada de decisão e a realização de análises e avaliações de sistemas, de forma a propor soluções para a melhoria da performance do sistema.

A simulação por computador permite reproduzir fenômenos ou sistemas de tal forma que possa ser utilizada para testar seus comportamentos sobre as mais diferentes situações (AMORIM, 2003). Ao simular um objeto ou fenômeno busca-se atribuir, ao modelo simulado, propriedades e (ou) capacidades do modelo real e não mais somente

“copiar” sua aparência visual, o que irá depender da finalidade da simulação (MACHADO, 2001).

Existem três tarefas que envolvem o processo de simulação em iluminação: a primeira se refere à obtenção de entrada de dados precisas, a segunda está relacionada à simulação precisa e eficiente da interação da luz no ambiente e a terceira, refere-se ao mapeamento dos resultados para os dispositivos de saída.

Um objetivo da simulação é a criação de imagens geradas em computador, que em muitas vezes, é a maneira mais fácil, menos dispendiosa e mais eficaz de visualizar preliminarmente resultados de projeto, ao contrário de modelos construídos e protótipos, além de permitir a consideração de alternativas adicionais de projeto, a partir da interação do projetista com a imagem exibida (FOLEY, 1997).

O estudo de um sistema, pode ser dado sob duas diferentes formas de abordagem. Uma se refere à interferência direta no sistema físico existente promovendo alterações para melhorar a performance do mesmo, o que envolve altos custos operacionais e perturbações no sistema. Outra se refere à utilização de modelos que representem convenientemente o sistema, construído de forma a verificar seu comportamento perante as modificações das variáveis em estudo, sendo a melhor maneira de testar novas alternativas de resolução para o problema (LAW, 2000: 4-6).

Segundo Soares (1990: 84-86), o processo de simulação segue os seguintes estágios de desenvolvimento:

- formulação do problema – definição do problema a resolver e dos objetivos a serem alcançados;
- construção do modelo – definição dos elementos e suas características e do modo como estes elementos interagem entre si. Deve-se conhecer a estrutura do sistema e como ele opera, não incluir detalhes desnecessários, decidir quais simplificações são válidas e quais elementos devem ser incluídos no modelo e decidir quais interações devem ocorrer entre os elementos;
- determinação dos dados de entrada e saída – definição dos parâmetros de simulação a partir dos resultados a que se quer chegar;

- implementação do modelo – implementar o modelo sob a forma de algoritmos computacionais;
- verificação - determinar se o modelo trabalha como esperado;
- validação - determinar se o modelo é uma representação do Sistema do Mundo Real e funciona como tal;
- experimentação – variação dos parâmetros de forma a obter os melhores resultados;
- análise dos resultados – interpretação dos resultados sobre o sistema simulado; e
- documentação – documentar os resultados para que possam ser utilizados em novos experimentos.

Esses estágios referem-se a todo o processo de simulação, inclusive a implementação do próprio modelo, e não devem ser seguidos de forma seqüencial já que a compreensão do problema vai aumentando de acordo com o desenvolvimento do processo, sendo necessário voltar a estágios anteriores para definir novas questões de interesse.

Para a aplicação da simulação, uma tarefa importante a ser realizada é a validação do modelo de simulação, que se refere ao grau de confiabilidade com que o modelo representa o sistema em estudo sob o enfoque considerado.

A validação deve ser feita pelo projetista do sistema, no momento da sua implementação e pelo usuário desse sistema de forma a garantir que os resultados encontrados no processo de simulação estejam corretos e possam ser utilizados para os estudos enfocados.

Law (2000: 265) define a validação como o processo que determina se o modelo de simulação é uma representação válida do Sistema do Mundo Real, para os objetivos particulares do estudo, seguindo algumas perspectivas gerais:

- se a simulação de um aspecto é válida em uma tecnologia ou ferramenta, então estas podem ser usadas para produzir decisões sobre o mesmo aspecto em outros espaços;

- a facilidade ou a dificuldade do processo de validação depende da complexidade do sistema modelado e das características a serem simuladas; e
- nas edificações complexas, o modelo pode ser simplificado levando em conta os aspectos relevantes (necessários e suficientes) para o processamento da solução.

Segundo Roy (2000: 13-14), a validação de um programa de simulação pode ser feita tendo como estratégia para a comparação dos resultados os seguintes pontos de referência:

- modelo matemático de referência, utilizado para gerar analiticamente as propriedades da cena a ser simulada para posterior comparação;
- edifício real, utilizado como base de comparação para os resultados obtidos na simulação em relação às medidas reais;
- modelo em escala, utilizado para a testar condições de projeto e compara-las aos resultados das simulações; e
- outro programa, utilizado como referência para a avaliação de um programa em vista de já ter sido validado e considerado confiável para a resolução do problema proposto.

Para o estudo em questão é necessário proceder a uma validação para os sistemas de simulação existentes de forma a verificar a sua confiabilidade. Isso foi feito através de estudos comparativos entre os resultados obtidos através dos programas de simulação e as medições feitas em ambientes reais, descritos nas experimentações, no capítulo IV.

2.3 Possibilidades e aplicações da simulação em Arquitetura e Urbanismo

A simulação computacional pode ser utilizada nas mais diversas áreas do conhecimento humano, sendo que, para o caso específico da Arquitetura e do Urbanismo, podemos empregá-la nas seguintes situações:

- No Urbanismo: sendo uma área de grande complexidade, pode-se usar quase todos os tipos de modelos para descrever e planejar sistemas urbanos. Para isso, é necessário definir o limite do sistema e sua interação com o universo em que está inserido para simular seu aspecto, operação e desempenho, de forma a englobar a totalidade. Pode-se simular intervenções no espaço urbano, tais como, novas intervenções no sistema viário, iluminação pública, redefinição no uso de áreas, implantação de equipamentos, etc.

A simulação pode também auxiliar na avaliação da implantação de um empreendimento no espaço urbano, bem como as modificações decorrentes dessa implantação através da simulação do projeto nas condições atuais e nas condições propostas, na geração de tráfego, etc.

Um estudo recente, desenvolvido no Programa de Pós - Graduação da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, aplica a simulação computacional na análise do sombreamento das praias, gerado pela modificação nos parâmetros urbanísticos numa área da orla de Salvador (THEMOTHEO, 2002), o que permite verificar de que forma as intervenções no espaço urbano vão se comportar e de que maneira é possível adequá-las para que não interfiram na paisagem a que se quer intervir ou ainda interferir nas condições de uso das praias.

- Na Arquitetura: grande parte dos tipos de modelos pode ser usado em arquitetura, visto que, sendo uma área multidisciplinar, engloba uma série de informações que podem ser modeladas de diferentes formas. Os modelos e sistemas de simulação em arquitetura podem ser usados para:
 - representação e simulação do aspecto externo e/ou interno da adaptação espacial projetada; e
 - simulação e análise do desempenho dessa adaptação do ponto de vista estrutural, térmico, acústico e luminoso, dentre outros.

No desenvolvimento de projetos arquitetônicos, a maioria dos projetistas já utiliza os modelos geométricos tridimensionais, conhecidos como “maquetes eletrônicas”, para a apresentação dos projetos aos clientes, e portanto um meio de simulação. Porém, poucos têm noção das possibilidades existentes nos programas

computacionais para simular os aspectos internos e externos da edificação de forma realística, aproveitando todos os recursos disponíveis nas ferramentas como a descrição precisa dos materiais, a orientação para a simulação da incidência solar, a criação de planilhas de orçamento e a geração de memoriais descritivos a partir das propriedades das superfícies do modelo construído.

Quanto à simulação do desempenho, os projetistas de arquitetura não costumam desenvolver projetos complementares, deixando para outros profissionais essa tarefa. Estes, acostumados com os métodos tradicionais, nem sempre estão dispostos a aprender novas técnicas por acreditarem que isso aumentaria os custos e o tempo empregado no projeto.

Na verdade, a simulação do comportamento da estrutura, da acústica, da iluminação e do conforto térmico pode vir a ajudar o projetista no desenvolvimento do projeto, melhorando a solução escolhida e permitindo a obtenção de respostas em menor tempo e de forma mais econômica, a depender da habilidade e experiência do usuário.

Já existe uma gama variada de ferramentas que possibilitam esse tipo de simulação, que, além de serem aplicadas em escritórios de projeto, podem vir a ser de grande auxílio no aprendizado acadêmico, permitindo aos alunos conhecer o comportamento dos materiais, das fontes luminosas, dos diversos tipos de estruturas, dentre outros.

Além disso, pode-se utilizar os recursos de animação para simular o movimento do observador no edifício ou na cidade de forma a entender as relações dos fluxos e das atividades com o objeto em estudo. Através desses recursos é possível visualizar, por exemplo, o percurso do sol durante todo o dia e nos diversos dias do ano, estudando sua incidência no objeto em estudo e de que forma irá influenciar na composição da forma da edificação ou do espaço urbano.



SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO

“In general, computer programs have been written to evaluate designs against a whole series of criteria where simple numerical calculation will suffice. Thus architectural packages now exist for evaluating the thermal, lighting and acoustic environments of buildings. (...) Such programs may simulate lighting conditions and the surfaces and colors of materials, and give some indications of the actual appearance of the object.”

(LAWSON, 1997: 293-294)

3.0 SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO

Após a fase inicial de concepção do projeto e a definição das diretrizes programáticas referentes às questões de conforto luminoso, pode-se aplicar as ferramentas computacionais de simulação de iluminação para avaliar alternativas da proposta projetual e produzir imagens fotorealísticas.

Os chamados programas para simulação, segundo Rego (2000), são ferramentas CAD dedicadas voltadas para a avaliação dos efeitos de insolação, ventilação, iluminação artificial, entre outros projetos, que têm sido alvo de investimentos em pesquisa devido à sua importância para a obtenção de projetos de melhor qualidade.

O realismo da representação e a validade das respostas quantitativas dadas por estes programas dependem fundamentalmente da sofisticação dos algoritmos implementados para o cálculo da iluminação e dos recursos de equipamento disponíveis para a visualização.

Do ponto de vista da análise dos aspectos quantitativos, os simuladores de iluminação favorecem o teste de alternativas de projeto, onde diferentes e numerosas variáveis podem ser testadas. Em relação à análise qualitativa, os recursos de visualização contribuem para uma análise mais adequada da alternativa de projeto, viabilizando sua implantação.

3.1 Características gerais e classificação das ferramentas

As seguintes características devem ser consideradas na escolha do programa de simulação (ROY, 2000; LAW, 2000; KHODULEV & KOPYLOV, 2002; e ASHMORE & RICHENS, 2002):

a. Características gerais

- flexibilidade – facilidade de importar dados de outros aplicativos;

- facilidade de uso – referente ao tempo gasto no preparo e edição dos dados que descrevem a geometria e as propriedades dos objetos da cena e ao tempo gasto para processar as simulações; e
 - interface – referente à facilidade com a qual o usuário pode manipular o modelo geométrico da cena e as propriedades óticas dos objetos, assim como os parâmetros do processamento e saída dos resultados.
- b. *Hardware e software* requeridos
- c. Suporte e documentação (manuais)
- d. Dados de entrada – referem-se aos dados necessários para o processamento da simulação.

One of the practical problems with using such programs for performance prediction is that each requires an input, the description of the proposed building in a different way, to suit its subject. (SZOKOLAY & PEDRINI, 2000: 1)⁴¹

- geometria da cena – modelo geométrico tridimensional do ambiente a ser simulado;
- propriedades dos materiais – atributos físicos que irão definir o modo como as superfícies irão interagir com a luz;
- dados fotométricos das fontes de luz;
 - iluminação artificial
 - definição de lâmpadas e luminárias quanto ao tipo e cor; e
 - características fotométricas;

⁴¹Um dos problemas práticos com o uso de programas para a previsão do desempenho é que cada um requer como dado de entrada, a descrição do edifício (projetado) de diferentes maneiras, a depender do seu objetivo.

- iluminação natural
 - variedade de modelos de céu; e
 - orientação, latitude, longitude, dia, mês e hora da simulação;

- e. Algoritmos utilizados – referem-se aos modelos de iluminação utilizados no cálculo da iluminação;

- f. Dados de saída – referem-se à maneira na qual os resultados dos cálculos são disponibilizados ao usuário;
 - *rendering* fotorealístico;
 - QTVR (*quicktime virtual reality*)⁴²;
 - modelo em VRML (*virtual reality modeling language*)⁴³;
 - *walkthrough animation*⁴⁴;
 - *interior solar study animation*⁴⁵;

- g. Ferramentas de análise – referem-se às ferramentas de análise quantitativa da solução gerada pela simulação em termos de grandezas fotométricas;
 - vista do plano de trabalho e da cena com contornos de isoluminância;
 - imagens em falsa cor;
 - valores de luminância e iluminância num ponto;

⁴² *Software* multimídia da Apple, disponível para ambiente Windows, que permite criar cenas panorâmicas de realidade virtual.

⁴³ Modelo que permite simular ambientes de realidade virtual em três dimensões para exibição na *World Wide Web*.

⁴⁴ Animação que simula o movimento do observador em torno ou através do objeto.

⁴⁵ Animação que simula a incidência do sol durante o dia no interior de um ambiente.

- exibição de valores de luminância ou iluminância através de um *grid*⁴⁶;

h. Atributos desejáveis no aplicativo

- resultados fotometricamente corretos;
- qualidade da saída visual;
- facilidade de consertar erros de *rendering*; e
- acurácia do modelo;

No processo de análise, um dos principais problemas encontrados é a verificação da confiabilidade da ferramenta computacional do ponto de vista da representação precisa do sistema a que pretende simular, ou seja, determinar se o programa é válido, se os resultados obtidos com o mesmo são confiáveis.

Segundo Szokolay & Pedrini (2000: 5-6), os programas de simulação, voltados para a análise térmica, podem ser divididos em programas de avaliação, usados para avaliar as possíveis soluções em termos de performance ou outras conseqüências, e programas construtivos, que podem gerar soluções para o arranjo de edifícios complexos ou determinar o tamanho de um elemento. Utilizando-se o mesmo critério, os programas de simulação de iluminação podem ser enquadrados na primeira definição, já que estão aptos a avaliar alternativas de solução de maneira mais rápida e eficaz, produzindo respostas tanto qualitativas quanto quantitativas ajudando na análise do projeto e definição da provável solução.

As ferramentas para a análise quantitativa, como os programas fornecidos pelos fabricantes de lâmpadas e luminárias, a exemplo da **Lumini**, contemplam o cálculo do projeto de iluminação tal como é feito com os métodos tradicionais e, em geral, se referem à iluminação artificial, definindo quantidade de luminárias e lâmpadas e sua disposição no ambiente. Para a iluminação natural existem programas que fornecem tabelas e gráficos com estimativas das intensidades da radiação solar incidente e

⁴⁶ Malha retangular de pontos onde são determinadas as grandezas de iluminação.

projeções dos raios solares através de janelas em ambientes internos, como no caso do programa **Luz do Sol**.

As ferramentas para a análise qualitativa são voltadas para a visualização dos efeitos da iluminação no espaço projetado e através delas é possível perceber os contrastes, sombras e “ofuscamentos” existentes no projeto, assim como a interação da luz com os materiais através das reflexões e transparências. São exemplos desses programas o **3D Studio MAX**, o **3D Studio VIZ** e o **Accurender**.

Os programas de simulação que contemplam ambas as análises são de fato os mais úteis no processo de projeto já que possibilitam, além da visualização, a análise dos níveis de iluminação. Dentre essas ferramentas, podemos destacar o **Lightscape**, o **Lumen Micro**, o **Adeline** e o **Desktop Radiance**.

Esses programas podem ser, do ponto de vista do funcionamento, *stand alone*, ou seja, completamente independentes, necessitando apenas do sistema operacional para serem executados, ou *plug-in*, que são módulos ou rotinas de trabalho que otimizam ou estendem recursos de um programa, funcionando somente nesse ambiente específico.

Do ponto de vista do usuário, os programas *plug-in* têm a desvantagem de precisar de um aplicativo para funcionar, aumentando os custos de aquisição, porém garantem a migração dos dados e facilitam o aprendizado e treinamento já que têm como base um programa que fornece o ambiente operacional.

Como a maioria dos programas de simulação não possui recursos de modelagem geométrica, é necessário o uso de outras ferramentas CAD, modeladores tridimensionais, voltadas para essa finalidade, cujos formatos de arquivos possam ser usados nas ferramentas de simulação. Apesar do intercâmbio de dados ser uma preocupação entre fornecedores e usuários, nem todos os recursos dos modeladores são suportados nos simuladores, necessitando para isso de uma maior preocupação na etapa de desenvolvimento do modelo geométrico, de forma a construí-lo de acordo com as possibilidades de interpretação, manipulação e processamento dos programas onde serão importados.

Um recurso dos simuladores é a disponibilidade de bibliotecas de materiais e fontes luminosas, com suas características físicas, e a possibilidade de “criação de novos materiais”⁴⁷ através da definição de suas propriedades.

3.3 Tecnologias e algoritmos para simulação de iluminação

Na simulação de imagens (síntese de imagens), um dos fatores mais importantes a ser considerado é a iluminação visto que é ela que torna os objetos visíveis e possibilita a diferenciação de cores, texturas e formas. Dessa forma, para simular o efeito visual da luz sobre os objetos do mundo físico, criando imagens fotorealísticas, é preciso simular a iluminação considerando os efeitos gerados pela sua interação com as superfícies do ambiente e a atmosfera. Assim, é preciso que os objetos tenham sua geometria e materiais representados, principalmente com suas propriedades físicas, para gerar os efeitos de iluminação na cena, que incluem reflexões, transparências, texturas e sombras.

Para isso, são utilizados os modelos de iluminação, técnicas que descrevem como a luz é refletida pela superfície do objeto e, conseqüentemente, determinam a intensidade da cor do objeto a ser exibido utilizando informações tais como, as propriedades óticas das superfícies da cena, a cor da luz emitida pela fonte luminosa e sua posição, bem como a posição e orientação do observador.

Para um melhor entendimento, dividimos o estudo em três grupos: modelos das fontes luminosas, modelos de reflexão e modelos de iluminação.

3.2.1 – Fontes luminosas

As fontes de luz são modelos que definem a natureza da luz que emana de uma fonte, ou seja, a geometria da sua distribuição e os parâmetros de intensidade. Podem ser

⁴⁷ Definição das propriedades do material, tais como refletância, cor e textura, a partir das características de um material existente no programa, ou ainda definindo totalmente as características desse “novo material”.

caracterizadas como fontes emissoras de luz, que emitem energia radiante, tal como o Sol ou uma lâmpada, ou fontes de luz refletida ou superfícies refletoras, aquelas que refletem a energia radiante proveniente das fontes emissoras de luz.

Na especificação das fontes emissoras de luz, deve-se definir as seguintes características: geometria (formato físico da fonte), parâmetros de cor e intensidade e, distribuição espacial e espectral. Quanto à geometria, as fontes de luz podem ser divididas em:

- fontes pontuais, puntiformes ou omni:

Segundo Hearn (1997), é o modelo mais simples de luz emitida, onde os raios seguem radialmente em todas as direções a partir de um único ponto, sendo uma aproximação razoável para as fontes cujas dimensões são pequenas se comparadas ao tamanho dos objetos na cena. É estabelecida pela distância e direção em relação ao objeto, possuindo portanto atenuação⁴⁸. Produz sombras definidas e a sua intensidade varia inversamente com o quadrado da distância (LAM, 1986). Um exemplo dessa fonte é a lâmpada incandescente comum.

- fonte *spot* ou luz focal:

É uma fonte caracterizada por emitir um cone de luz em uma certa direção, tais como os refletores, com intensidade que varia da área de máxima iluminação, chamada de *hotspot*, para a área que a circunda, de menor intensidade luminosa, denominada *falloff*. É uma luz que possui atenuação, sendo controlada pela geometria do cone, posição da fonte e direção e intensidade da luz.

- fonte direcional ou distante:

É uma fonte considerada no infinito, cujos raios vêm da mesma direção e é determinada através de um vetor unitário que define sua direção. É considerada direcional, pois os vetores não se alteram significativamente de um ponto a outro na superfície do objeto.

⁴⁸ Redução da intensidade luminosa com o aumento da distância da fonte.

O Sol, por estar a uma distância muito grande, é considerado como uma fonte distante, podendo ser modelado, dessa forma, nos programas de simulação. Consideram-se os raios do Sol paralelos e uniformes, controlados pela sua direção, que é determinada pela altura, dada pela hora do dia; e pelo azimute, dependente do dia do ano, para uma mesma latitude.

- fonte linear:

É uma fonte que tem uma dimensão linear onde a luz é propagada segundo o eixo dessa dimensão. Varia inversamente com a distância e produz sombras ao longo de um eixo, tal como uma lâmpada fluorescente linear.

- fonte área, extensa ou distribuída:

Possui uma superfície emissora de luz e um sistema de coordenadas associado para especificar sua posição no espaço e a direção da iluminação (GOMES, 1990). Uma luminária com um conjunto de lâmpadas fluorescentes é um exemplo desse tipo de fonte.

3.2.2 – Modelo de Reflexão

Segundo Berg (2002a: 6), “um modelo de reflexão descreve a interação da luz com uma superfície, em termos das propriedades da superfície e da natureza da luz incidente”. Essas propriedades, rugosidade, transparência e cor, são usadas para descrever a quantidade de luz que é refletida, absorvida e transmitida pela superfície. Nesse modelo, segundo Hearn (1997), todas as fontes são consideradas fontes pontuais, especificadas com a posição de coordenada e o valor de intensidade.

Os modelos de reflexão são também chamados de modelos básicos de iluminação e podem ser classificados em:

- luz ambiente, luz de fundo ou reflexão ambiente

Este modelo considera a fonte de luz difusa, não direcional, produzindo múltiplas reflexões de muitas faces (MENDES, 2002: 2). Segundo Carrara (2002: 13), é um recurso utilizado para simular reflexões ocorridas entre os objetos, gerando uma

iluminação constante para todos os pontos do objeto, dependendo somente da cor desse objeto. Isso faz com que sejam considerados como fontes emissoras de luz, porém sem a capacidade de iluminar outros objetos. Servem para simular uma iluminação constante e atenuar diferenças bruscas entre as diversas regiões da cena.

A intensidade da iluminação ambiente num objeto é dada pela equação (3.1):

$$I = I_a \times K_a \quad (3.1)$$

onde: **I_a**; intensidade da luz ambiente, comum a todos os objetos; e
K_a; coeficiente de reflexão ambiente, que varia de 0 a 1 e, sendo uma conveniência empírica, não corresponde a qualquer propriedade física dos materiais reais (FOLEY, 1997b: 479).

- luz difusa ou reflexão difusa

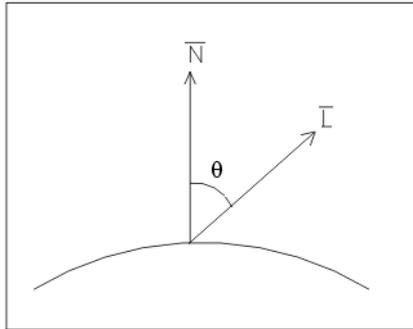
Esses modelos são também conhecidos como modelos de reflexão lambertiana, pois se baseiam no conceito da Lei do Coseno de Lambert, onde a quantidade de luz refletida para o observador é diretamente proporcional ao coseno do ângulo entre a direção do observador e a normal à superfície.

Nesse modelo, a luz vinda de uma fonte pontual é refletida em todas as direções, sendo dependente da cor do objeto e da posição da fonte de luz (direção e distância). A reflexão difusa é constante para cada superfície na cena e independe do ponto de vista.

A equação de iluminação difusa é dada pela equação (3.2):

$$I = I_p \times K_d \times \cos \theta \quad (3.2)$$

onde: **I_p**; intensidade da fonte de luz pontual;
K_d; coeficiente de reflexão difusa, que varia de 0 a 1 dependendo do material; e
θ; ângulo de incidência da luz em relação à normal à superfície, variando de 0 a 90°.



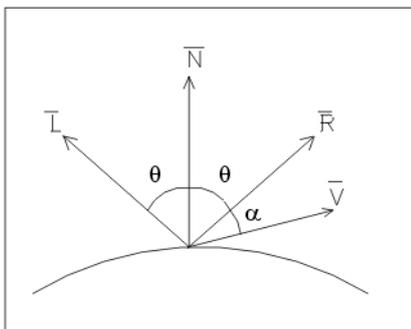
N – vetor normal à superfície
L – vetor na direção da fonte luminosa

Figura 3.1 – Reflexão difusa⁴⁹

- luz especular ou reflexão especular

É a reflexão que pode ser observada em qualquer superfície brilhante, na qual produz o ponto de brilho ou realce (*highlight*) na superfície iluminada, com a cor da luz incidente e não a cor do objeto.

Nesse modelo, a luz é refletida em um ângulo igual ao ângulo de incidência, em relação à normal à superfície (Lei de SNELL). A intensidade da reflexão especular depende das propriedades dos materiais da superfície e do ângulo de incidência, assim como da polarização e cor da luz incidente (HEARN, 1997).



N – vetor normal à superfície
L – vetor na direção da fonte luminosa
R – vetor da direção de reflexão
V – vetor da direção do observador

Figura 3.2 – Reflexão especular⁵⁰

Assim, a iluminação total é considerada como sendo o somatório dessas três intensidades dada pela equação (3.3):

$$\boxed{I_{total} = I_{ambiente} + I_{difusa} + I_{especular}} \quad (3.3)$$

⁴⁹ FOLEY, 1997a: 723

⁵⁰ FOLEY, 1997a: 729

Alguns aspectos têm que ser considerados, em se tratando da utilização desses modelos, no que se refere ao entendimento de como tratam as questões relacionadas com a cor, a atenuação, a transparência e as sombras.

- atenuação da intensidade

Para produzir efeitos de iluminação realísticos, é preciso considerar nos cálculos a atenuação, que se traduz na diminuição da intensidade da luz com o aumento da distância a partir da fonte. Ou seja, a energia radiante de uma fonte de luz pontual tem sua amplitude atenuada pelo fator $1/d$ (inverso da distância) ou $1/d^2$ (inverso do quadrado da distância), a depender do tipo de fonte de luz utilizada.

- cor

Os modelos de iluminação descritos anteriormente consideram somente efeitos de iluminação monocromáticos. Para incorporar a cor é preciso rescrever a equação de intensidade considerando as propriedades de cor das fontes de luz e das superfícies dos objetos, expressando-a em termos das suas componentes de cor.

- transparência

A luz ao atingir uma superfície transparente é refletida e transmitida, a depender do grau de transparência da superfície. Os efeitos de transparência são modelados considerando a luz refratada, que pode gerar efeitos de transmissão especular (materiais transparentes) ou difusa (materiais translúcidos), a depender do índice de refração de cada material e da direção da luz incidente.

- sombra

As áreas de sombra são definidas como as áreas onde as superfícies não podem ser iluminadas pela fonte de luz e são determinadas pelo tipo de material e a geometria dos objetos e pela geometria da fonte de luz. Para o cálculo da sombra e do brilho de cada face do objeto é necessário o conhecimento sobre a distância e o ângulo de incidência da fonte de luz na superfície e a refletividade. A sombra se caracteriza pela presença de duas regiões, a umbra, cuja intensidade luminosa é nula, ou seja, é a área onde a fonte luminosa não é visível; e a penumbra, região onde alguma luz é visível, variando de zero até a intensidade luminosa do

ambiente, sendo ocasionada por uma fonte que tem uma grande radiação e não está localizada muito distante do objeto considerado.

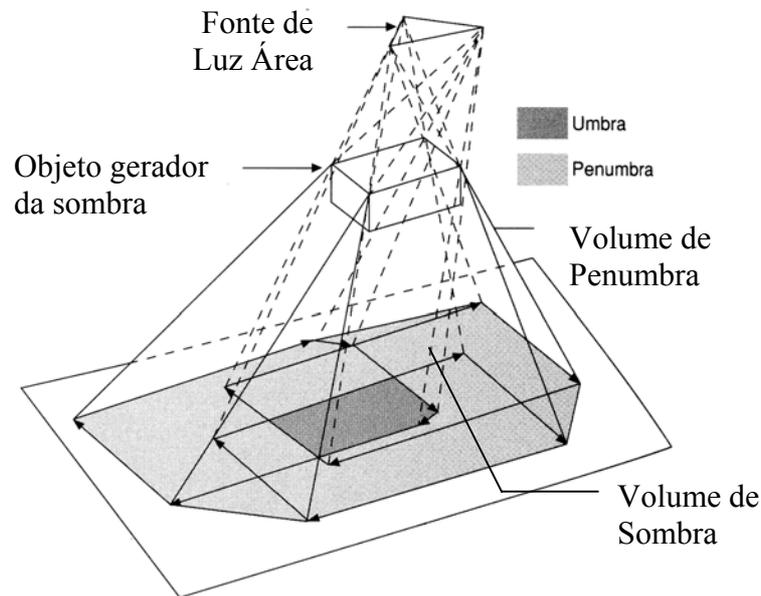


Figura 3.3 - Determinando os volumes de umbra e penumbra ⁵¹

3.2.3 – Modelos de Iluminação

Os métodos atualmente mais utilizados para o cálculo da imagem e dos efeitos lumínicos nos programas de simulação baseiam-se em algoritmos de tonalização⁵² genéricos chamados de algoritmos de iluminação local e iluminação global.

Esses algoritmos de iluminação, também chamados de modelos de iluminação ou modelos de *shading*, são usados para calcular a intensidade da luz que é vista de um ponto da superfície de um objeto a partir de parâmetros das propriedades óticas das superfícies na cena, a cor e posições das fontes de luz e a posição e orientação do plano de visão (HEARN, 1997).

⁵¹ NISHITA, T. NAKAMAE, E. Continuous tone representation of three-dimensional objects taking account of shadows and interreflection. Computer Graphics (Proceedings SIGGRAPH '85), 1985. p. 23-30. In: FOLEY, 1997a: 772.

⁵² “processo de atribuição de intensidades e cores a cada *pixel* da superfície de apresentação através da utilização de um modelo de iluminação para o cálculo da sua intensidade.” (AMORIM, 1999)

Os algoritmos de iluminação local descrevem como as superfícies refletem ou transmitem a luz considerando apenas os raios que incidem diretamente sobre cada ponto da superfície. São normalmente utilizados em ferramentas voltadas para a texturização de modelos tridimensionais onde calculam a intensidade, cor e distribuição da luz que deixa a superfície, na qual o raio incidiu, não considerando a interação entre os raios refletidos e transmitidos por essas superfícies para os demais objetos, ou seja, a característica de cada objeto depende apenas da fonte de luz e não da interferência de outros objetos que estão ao seu redor. Os *software 3D Studio MAX* e o *AutoCAD* são alguns dos aplicativos que utilizam esse algoritmo para o cálculo da iluminação e síntese de imagens.

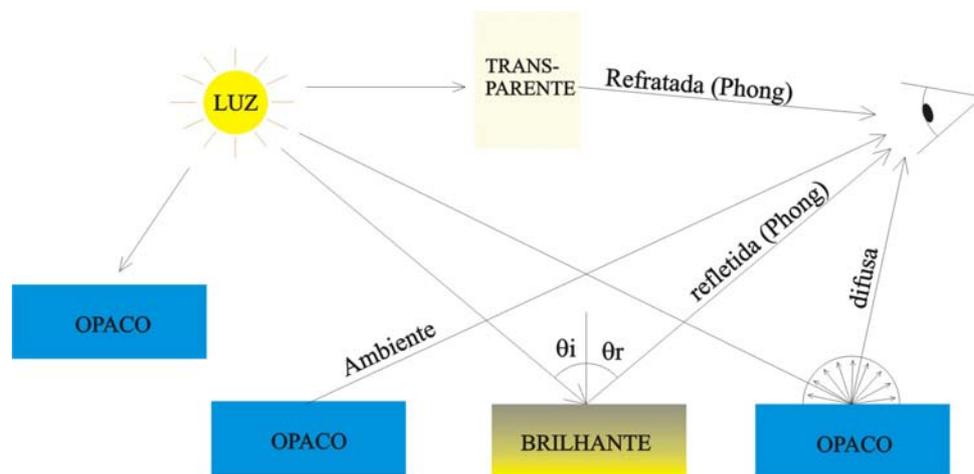


Figura 3.4 – Interações da luz no modelo de iluminação local⁵³

Os algoritmos de iluminação global calculam a intensidade, cor e distribuição luminosa das superfícies considerando não só os raios incidentes sobre elas, mas como as superfícies e objetos interagem com a luz e a maneira como a luz é transferida entre as superfícies do modelo. Dessa forma, a iluminação total do ambiente é resultado da incidência direta, proveniente das fontes luminosas, e indireta, proveniente das interreflexões que ocorrem entre os diferentes tipos de materiais.

⁵³ CARRARA, 2002: 13.

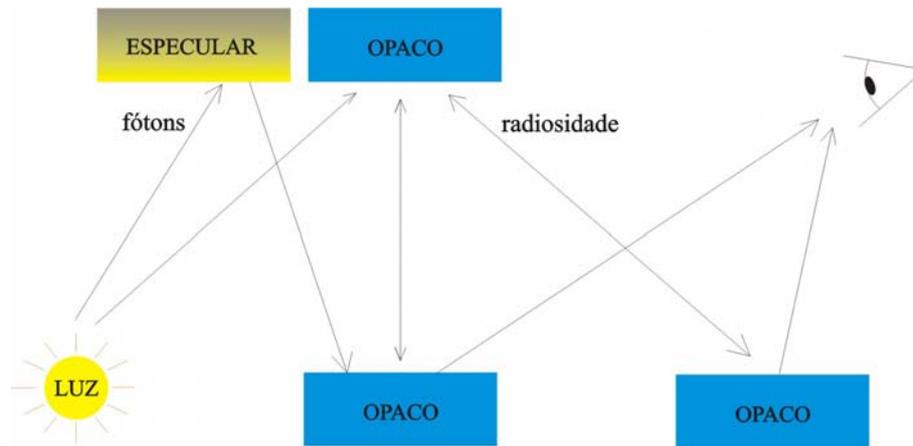


Figura 3.5 – Interações da luz no modelo de iluminação global⁵⁴

Os modelos de iluminação podem ser enquadrados em três categorias: modelos empíricos, modelos transicionais e modelos analíticos (AMORIM, 1999: 21).

Os modelos empíricos são caracterizados por realizar a iluminação local de forma a produzir imagens “similares” às que seriam vistas na realidade. São modelos que vêm sendo utilizados a mais tempo, onde podemos destacar os modelos de Bouknight, Gouraud e Phong.

- Modelo de Bouknight – modelo introduzido por Bouknight, também chamado de *Flat shading* ou tonalização constante, devido à aparência facetada da imagem resultante. Foi um dos primeiros modelos para iluminação local de uma superfície e inclui apenas os termos da iluminação ambiente e da reflexão difusa, com uma única fonte de luz posicionada no infinito e na direção do observador de modo a evitar o surgimento de sombras. A luz difusa é baseada no modelo de reflexão lambertiana, na qual o valor da intensidade é igual em todas as direções e a iluminação ambiente é uma fonte de luz difusa e não direcional, constante, produto das múltiplas reflexões da luz sobre as diversas superfícies do ambiente.

Esse modelo avalia a equação de reflexão uma única vez para cada face determinando a intensidade de um ponto, considerada constante, e que é aplicada para todos os outros pontos da face. Como consequência, pode se ter uma percepção clara da diferença de tonalidade nas arestas e não produz as variações de tonalização

⁵⁴ idem.

ao longo do polígono, o que pode resultar em um problema de descontinuidade de intensidade conhecido como efeito de *mach band*⁵⁵.

- Modelo de Gouraud – também conhecido como tonalização por interpolação de intensidades, consiste em interpolar as diferentes intensidades dos polígonos adjacentes. Este modelo considera cada vértice do polígono como uma “superfície” e define o valor luminoso desse ponto de acordo com o princípio lambertiano, onde todas as superfícies são difusoras, independente do material que visam simular. Os valores obtidos para cada vértice são interpolados linearmente e o valor resultante exprime a tonalidade do polígono (MACHADO, 2001). O método de cálculo consiste em quatro passos que consistem primeiramente no cálculo dos vetores normais às superfícies; numa segunda etapa onde se calculam os vetores normais aos vértices através da média das normais às superfícies de todas as faces que compartilham o mesmo vértice; em seguida são calculadas as intensidades dos vértices através da utilização dos vetores normais; e finalmente, cada polígono é sombreado por meio da interpolação linear das intensidades dos vértices do polígono (BERG, 2002a: 10). É um modelo que apresenta algumas deficiências tais como, não considerar a posição do observador, já que considera apenas a orientação da superfície em relação às fontes, e despreza a variação da normal no interior do polígono minimizando o efeito de *highlight*, um centro brilhante atenuado nas bordas, em que a cor da fonte de luz se sobrepõe à cor original da superfície, posicionado onde o vetor da fonte de luz se encontra com o vetor do observador (MACHADO, 2001).



Figura 3.6 – Imagem sintética obtida pelo modelo difuso de Gouraud⁵⁶

⁵⁵ Efeito descoberto por Mach em 1865 em que a intensidade ao longo das arestas é exagerada devido à descontinuidade de valores de intensidade, o que implica que faces escuras pareçam mais escuras e faces claras apareçam mais claras (FOLEY, 1997b: 493).

⁵⁶ SILVA, 2001: 194

- Modelo de Phong – também chamado de modelo de tonalização por interpolação dos vetores normais, foi desenvolvido por Phong Bui Tuong (PHONG, 1975), que introduziu uma forma de interpolação mais sofisticada que o anterior e que consiste em interpolar os vetores normais em cada polígono. O cálculo é efetuado para cada *pixel* da tela, o que possibilita simular degradês de tonalidade dentro do próprio polígono. Para cada ponto é calculada sua correspondente normal através da interpolação dos vértices do polígono e essa normal é comparada com o vetor da fonte de luz, quanto mais paralelos eles forem, maior a intensidade luminosa do ponto, do contrário, o ponto é proporcionalmente escurecido. Essa normal é comparada ao vetor que representa um observador e se um brilho pontual existir nesse ponto (*highlight*), ele é acrescentado, permitindo um melhor tratamento dos efeitos da reflexão especular. Esse modelo suporta três tipos de interação entre luz e objeto: a reflexão difusa, a reflexão especular e a reflexão da luz ambiente, e busca exibir suavidade em objetos com superfícies curvas quando representados por polígonos.



Figura 3.7 – Imagem sintética obtida pelo modelo de Phong⁵⁷

Os modelos transicionais incorporam os fenômenos físicos da luz reproduzindo as reflexões, refrações, transparências e sombras, buscando uma aparência mais realística da cena. São eles: o modelo de Blinn e Newell, o modelo de Blinn e o modelo de Whitted.

⁵⁷ SILVA, 2001: 194

- Modelo de Blinn e Newell – é um aprimoramento do algoritmo desenvolvido em 1974 por Edwin Catmull para mapeamento de imagem incorporando o mapeamento de texturas (*texture mapping* ou *pattern mapping*), onde um mapa de textura, uma imagem digitalizada ou sintetizada, é aplicado a uma superfície para adicionar detalhes que modificam os valores de intensidade da superfície. O mapeamento de textura afeta o sombreado da superfície, mas esta continua a parecer geometricamente suave. O principal problema é associar um ponto da superfície de um objeto tridimensional a um mapa de textura bidimensional. Segundo Hearn (1997), essa associação pode ser feita de duas maneiras: mapeando o padrão de textura nas superfícies dos objetos, no plano de projeção, ou mapeando áreas de *pixel* sobre as superfícies dos objetos, no espaço da textura. O mapeamento através de projeções é o mais utilizado, apesar de introduzir distorções na imagem projetada, podendo ser feito utilizando as seguintes projeções: a projeção plana, que projeta a imagem no objeto como se fosse um projetor de *slides*, a projeção cilíndrica, na qual a textura é aplicada à superfície de um cilindro por meio de equações de projeção cartográfica, e a projeção esférica, onde a textura é aplicada a uma esfera seguindo os mesmos princípios da projeção anterior.
- Modelo de Blinn – modelo conhecido como *Bump Mapping*, foi desenvolvido por Blinn para fornecer uma aparência de rugosidade à geometria da superfície de forma a simular os aspectos “táteis” do objeto, sem a necessidade de um modelamento geométrico dessa rugosidade. O conceito básico é “perturbar” os vetores normais ao longo das superfícies, ou seja, deslocar a posição real dos pontos da superfície, de forma a “enganar” o programa de iluminação. Isso se dá através do uso de quatro vértices definidores do *pixel*, como base para construir quatro normais para cada *pixel*, onde é aplicada uma equação que resulta na alteração ou “perturbação” das normais, mudando sua orientação em relação à posição original, produzindo uma textura de luz e sombra que simula o efeito de rugosidade nas superfícies.
- Modelo de Whitted ou *Ray Tracing* – o algoritmo de *ray tracing* (traçado de raios) é, atualmente, o mais utilizado para o cálculo da iluminação e geração de imagens, sendo uma extensão, segundo Hearn (1997), do método *Ray Casting* utilizado para determinar superfícies visíveis na cena. A base de todos os algoritmos de *ray tracing* está no trabalho de Appel em 1968 que tinha o intuito de determinar sombras e foi o

primeiro trabalho publicado sobre o assunto em Computação Gráfica. Entre 1968 e 1971, Goldstein e Nagel desenvolveram algoritmos para o cálculo de trajetórias balísticas de partículas nucleares que, junto ao algoritmo de Appel, foram posteriormente aplicados à síntese de imagens. Em 1979, Kay introduziu algumas modificações no algoritmo para o cálculo da iluminação especular e da refração da luz, o qual foi aperfeiçoado por Turner Whitted em 1980 (LOPES, 2002c:1).

A idéia básica é acompanhar cada raio do momento que é emitido pela fonte até sua extinção após ter sido refletido por objetos da cena. A extinção é dada pela absorção por obstáculos, raios perdidos em direção ao infinito ou dirigidos ao olho do observador. Essa idéia “baseia-se no conceito de que, para que um ponto de uma cena seja visível ao observador, o raio de luz transmitido, refletido ou emitido pelo ponto deve atingir o observador” (ZUFFO, 1992: 37).

Em geral os modelos de traçado de raios consideram um raio para cada *pixel* do sistema ou um para cada vértice do *pixel*, o que gera uma infinidade de raios que nem sempre são considerados na imagem, pois não chegam ao observador, gerando um desperdício de tempo de processamento para raios que não contribuirão para a constituição da imagem. A maior parte desse tempo é gasto no cálculo das interseções dos raios com os objetos da cena.

Devido a isso, Whitted inverteu o processo, surgindo o chamado *Backward Ray Tracing* (traçado inverso de raios), onde por cada *pixel* do espaço de tela passa um raio que parte do olho do observador até alcançar algum objeto da cena. O comportamento do raio em relação ao objeto é dado pelos coeficientes de reflexão, difusão, refração e absorção do objeto. Esse algoritmo é uma técnica de geração de imagens, que modela a interação luminosa entre os objetos da cena, permitindo bons resultados em relação à textura luminosa; remoção de superfícies ocultas, já que considera, para efeito de exibição, apenas a última superfície atingida pelo raio antes dele atingir o observador; refração; sombras; e reflexão especular, porém ainda precisa do uso de uma iluminação ambiente não direcional para representar todas as outras contribuições da iluminação global. O Ray Tracing possui ainda uma importante característica que é ser um algoritmo dito de vista dependente, pois depende da posição do observador para determinar os pontos no qual a equação de iluminação será aplicada. Devido a isso, trata com eficiência de fenômenos

especulares, altamente dependentes da posição do observador, mas necessita de maior processamento para tratar dos fenômenos difusos que mudam pouco sobre grandes áreas de uma imagem ou entre imagens produzidas de diferentes pontos de vista.

Elementos que constituem o algoritmo e são considerados no processo de cálculo:

- a) A luz é considerada como a soma da luz difusa, especular e ambiente, tendo sua intensidade atenuada com a distância percorrida pelo raio, equação (3.4).

$$I = \frac{(I_a + I_d + I_e)}{d^2} \quad (3.4)$$

onde: **I**; intensidade total;

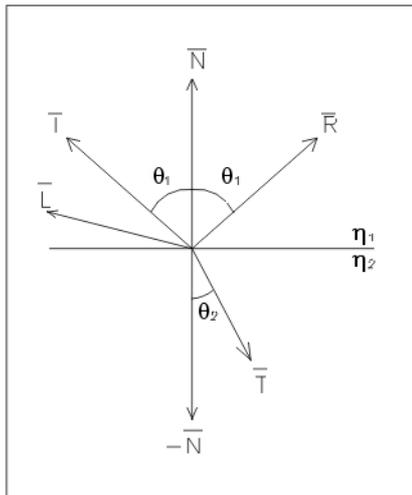
I_a; intensidade da luz ambiente;

I_d; intensidade da luz difusa;

I_e; intensidade da luz especular; e

D; distância.

- b) As fontes de luz utilizadas podem ser pontuais, direcionais ou extensas.
- c) Um objeto só será visível se for uma fonte de luz ou se refletir ou transmitir um determinado raio que incidiu sobre ele. Baseia-se na Lei de Snell-Decartes, equação (3.5), (ZUFFO, 1992: 39) que afirma que para a direção dos raios refletidos, o ângulo de incidência (θ_1) em relação à normal (**N**) é igual ao ângulo de reflexão (θ_1), e para a direção dos raios transmitidos, o seno do ângulo de incidência (θ_1) está para o seno do ângulo de transmissão (θ_2) na mesma razão que os coeficientes de refração (η_1, η_2) dos materiais onde o raio de luz está atravessando.



$$R = I + 2N \times \cos \theta_1$$

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

$$\eta = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

$$T = \frac{I}{\eta} \times I \left(\cos \theta_2 - \frac{I}{\eta} \times \cos \theta_1 \right) N \quad (3.5)$$

Figura 3.8 – Cálculo dos raios

refletido e transmitido⁵⁸

onde: **N**; vetor normal à superfície

I; vetor na direção da fonte luminosa

R; vetor da direção de reflexão

L; vetor da direção do observador

T; vetor da direção da luz transmitida

- d) Um objeto é considerado como sendo qualquer elemento que interfira na trajetória do raio de luz na cena.
- e) Sendo de vista dependente, o algoritmo depende da posição do observador e do plano de projeção onde será projetada a cena.
- f) Tem a desvantagem de necessitar de grande quantidade de processamento para a geração da imagem.
- g) Apresenta o problema de *aliasing* (serrilhamento), correspondente à perda de informação entre dois raios vizinhos.

⁵⁸ FREITAS, 2002: 6



Figura 3.9 – Imagem sintética obtida pelo modelo Ray Tracing⁵⁹

Os modelos analíticos modelam o comportamento da luz aplicando as técnicas de equilíbrio de energia através do cálculo de energia térmica (SILVA, 2001: 193) e são considerados como um dos principais métodos de simulação do comportamento da luz no ambiente físico. O principal exemplo desses modelos é o modelo de Radiosidade voltado para a simulação das interreflexões difusas em ambientes fechados.

- Modelo de Radiosidade – esse método é derivado do cálculo das trocas de radiação térmica entre superfícies utilizado em transmissão de calor adaptado à Computação Gráfica por Goral, Torrance, Greenberg e Bataille, em 1984, com a contribuição de Nishita e Nakamae, em 1985 (LOPES, 2002b: 1) e baseia-se no cálculo da radiosidade da superfície em um ambiente para calcular a iluminação, sendo a radiosidade a razão na qual a energia deixa a superfície, resultado da soma das razões nas quais a superfície emite energia e reflete-a ou transmite-a de uma superfície para outras (FOLEY, 1997b).

Como o cálculo de radiosidade é baseado na troca de energia entre superfícies planas elementares, a descrição da cena utilizando polígonos é mais vantajosa para o processo de cálculo. Essa troca de energia depende da quantidade de luz que incide sobre as superfícies, do espectro da luz incidente, das características direcionais e refletoras das superfícies, da distância entre as mesmas e da orientação relativa e das áreas.

⁵⁹ SILVA, 2001: 194

Para a utilização desse algoritmo para o cálculo da iluminação são feitas algumas simplificações de forma a reduzir a complexidade do problema:

- a) Todas as superfícies são consideradas totalmente difusas, ou seja não possuem reflexão especular;
- b) As equações consideram os chamados fatores de forma, termo matemático que descreve a transferência de energia de uma superfície para outra, ou seja, a fração da radiação difusa que deixa uma superfície e atinge a outra; e
- c) A radiosidade é definida como sendo a energia emitida mais a energia refletida, definida anteriormente.

O processo de cálculo consiste de duas fases: a inicialização, onde as superfícies dos objetos que compõem a cena são subdivididas em elementos menores, para descrever cada superfície a ser analisada. A outra etapa é chamada de processo de radiosidade propriamente dito, onde é calculado um fator de forma para cada par de elementos, de forma a balancear a luz que emana da fonte para os elementos. Isso é feito calculando-se a luz que cada elemento emite ou reflete e multiplicando a ela o fator de forma correspondente ao respectivo par, o que resulta no valor da luz incidente sobre o elemento adjacente.

A precisão dos resultados depende da divisão da malha considerada, do tamanho dessa malha e da sua adequação em reproduzir os gradientes de sombreamento existentes na realidade. Conforme o número de elementos aumenta, a carga computacional aplicada ao cálculo aumenta significativamente já que é proporcional ao quadrado do número de elementos em que a cena se encontra dividida (LOPES, 2002b: 3). Devido a isso, é preciso manter um número de elementos reduzido, o que nem sempre é possível, pois a dimensão destes devem ser suficientemente pequenas para reproduzir os sombreados. Como na transição entre zonas de luz e sombra é necessário um número maior de elementos, implicando em alta carga computacional, é utilizado um processo de otimização chamado de subdivisão adaptativa, que consiste em identificar áreas de maiores gradientes de radiosidade e subdividi-los em elementos menores à medida que esses gradientes se modificarem.

Esta subdivisão é controlada pelos parâmetros de controle do algoritmo definidos pelo usuário.

O algoritmo de refinamento progressivo é uma técnica desenvolvida posteriormente para otimizar a solução de radiosidade, onde esta é ajustada e refinada progressivamente, até que o resultado final seja armazenado. Nesse processo, o sistema calcula, inicialmente, as contribuições das fontes de luz direta e vai, progressivamente, considerando as interreflexões da luz entre as superfícies que ocorrem no ambiente. Esse recurso acelera os cálculos e reduz o armazenamento requerido para cada interação porque calcula a contribuição da radiosidade entre duas superfícies, e usando uma única, calcula todos os fatores de forma para dispersar a luz para todas as superfícies do ambiente (HEARN, 1997).

A radiosidade é calculada pela seguinte equação:

$$\boxed{B = E + \rho \times I} \quad (3.6)$$

Onde: **B** (radiosidade); energia radiante que abandona uma superfície por unidade de área da superfície;
E (poder emissivo); energia que uma superfície emite por unidade de área da superfície;
I (irradiação); energia incidente numa superfície por unidade de área da superfície; e
ρ (refletividade); fração da irradiação que é refletida por uma superfície e varia de **0** a **1**.

A equação do algoritmo de radiosidade é então representada por:

$$\boxed{B_i = E_i + \rho_i \times \sum (F_{j-i} \times B_j)} \quad (3.7)$$

Onde: **B_i** ; radiosidade da superfície **i**.
B_j; radiosidade da superfície **j**.
E_i; poder emissivo da superfície **i**
ρ_i; refletividade da superfície **i**.

F_{j-i} (fator de forma); fração da radiosidade total que abandona a superfície j e atinge a superfície i.

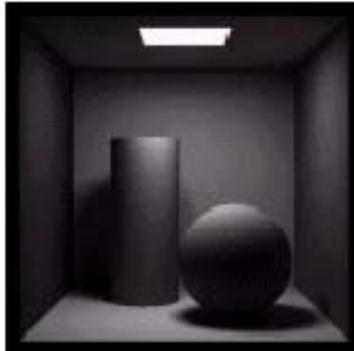


Figura 3.10 – Imagem sintética obtida pelo modelo de Radiosidade⁶⁰

Segundo Silva (2001: 193), existem ainda os chamados modelos ‘híbridos’, onde se integram técnicas dos modelos transicionais e dos modelos analíticos de forma a considerar, na simulação, os efeitos especulares e difusos. A autora destaca ainda, que para uma imagem ser resultado de uma simulação correta do fenômeno de interação da luz e da matéria, é preciso que seja feita a partir de modelos físicos, onde a distribuição luminosa é calculada considerando os efeitos de especularidade e difusão ideal e direcional, agrupadas numa técnica chamada “Radiância Avançada”.



Figura 3.11 – Imagem sintética obtida pelo modelo de Radiância⁶¹

⁶⁰ SILVA, 2001: 194

⁶¹ SILVA, 2001: 194

3.4 Elementos complementares

Para um melhor entendimento de como as superfícies interagem com a luz, é necessária a determinação dos atributos físicos, das superfícies e das fontes de luz, que irão ser considerados no cálculo durante o processo de simulação de iluminação.

3.4.1 A cor

Sendo a geração de imagens resultado da simulação, é preciso estudar os fundamentos da cor nesse processo para o entendimento das diferenças que ocorrem nas simulações devido às configurações de *hardware*.

A sensação de cor é dada pela presença ou ausência de luz e depende da interação da luz com o sistema visual humano, sendo portanto um fenômeno psicofísico (GOMES, 1994). Dessa forma, a cor de um objeto não depende somente dele, mas também da fonte de luz que o ilumina, da cor da área em torno do objeto e do sistema visual humano.

Assim, para entender a cor é preciso compreender a natureza da luz. A teoria ondulatória da Física estabeleceu que um raio luminoso é constituído de partículas, chamadas fótons, e estas, em movimento, determinam uma onda cuja intensidade em cada ponto é igual à probabilidade de se encontrar o fóton nesse ponto (GOMES, 1994).

Dessa forma, consideramos a luz como a sensação que as ondas eletromagnéticas produzem sobre o sistema visual humano, que são caracterizadas por um comprimento de onda e por uma frequência. O sistema visual humano interpreta como luz visível a energia eletromagnética em forma de ondas de comprimento entre 380 a 780 nanômetros, que do ponto de vista perceptual estão associadas às diferentes cores.

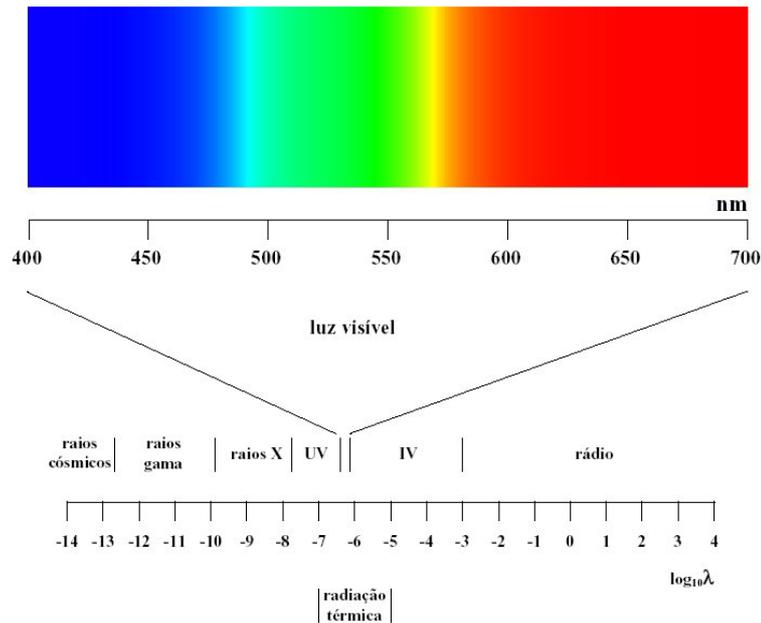


Figura 3.12 - Espectro eletromagnético mostrando as bandas de comprimento de onda principais e a banda correspondente à luz visível⁶²

Segundo Gomes (1994), a cor é percebida quando a luz é refletida por um objeto, transmitida por um filtro ou emitida diretamente por um corpo que possui luz própria, o que define os sistemas físicos de cor em sistemas refletivos e sistemas emissivos.

- Sistemas refletivos – são aqueles que não emitem energia luminosa, usando a luz de outra fonte para produzir a informação de cor e consistem em um número finito de sensores que funcionam como filtros do sinal luminoso;
- Sistemas emissivos – são fontes de energia radiante e assim produzem diretamente a informação de cor.

Além do comprimento de onda, outros parâmetros são necessários para descrever as várias características da cor. São eles:

- brilho (*brightness*) – intensidade percebida da fonte de luz, ou seja, a luminância da fonte emitida por unidade de tempo, por unidade de ângulo sólido e por unidade de área projetada.

⁶² LOPES, 2002a: 4

- luminosidade (*lightness*) – expressa a intensidade percebida de um objeto refletindo a luz, ou seja, a percepção da luminância refletida por esse objeto quando iluminado por uma fonte luminosa ou pela luz refletida a partir de outro objeto.
- matiz ou tonalidade (*hue*) – representa a cor propriamente dita, ou seja, o comprimento de onda monocromático que quando combinado com o branco resulta na cor.
- saturação (*saturation*) – medida do grau em que a cor pura é diluída pelo branco. Quanto menor a quantidade de branco mais saturada a cor está.

Esses parâmetros são definidos do ponto de vista de uma análise perceptual, tendo outras denominações quando analisadas do ponto de vista da Colorimetria⁶³.

Colorimetria	Termo Perceptivo
Comprimento de onda dominante	Matiz, tonalidade, <i>hue</i>
Pureza	Saturação
Luminância	<i>Lightness</i> (objetos refletivos) <i>Brightness</i> (objetos luminosos)

Tabela 3.1 - Comparativo entre termos da Colorimetria e termos perceptivos

Do ponto de vista perceptual, o olho humano, segundo sistema Young-Helmholtz (*Tristimulus Color Theory*), percebe as cores através do estímulo de moléculas fotossensíveis, localizadas nos cones, na parte central do olho, que interpretam o nível de radiação através da mistura de 3 cores com pico de sensibilidade para comprimentos de onda por volta de 630 nm (vermelho), 530 nm (verde) e 450 nm (azul) (GOMES, 1994; HEARN, 1997).

Em 1931, a *Comission Internationale de L'Éclairage* (CIE) adotou esse sistema para definir um modelo de cor padrão, chamado de modelo CIE-RGB, muito usado em síntese de imagem para a atribuição de cores às superfícies.

⁶³ Campo da Física que estuda a cor usando como base o processo de formação aditivo.

A computação gráfica destaca alguns sistemas importantes de cor que são usados para definir cores baseadas nos modelos de cor. O modelo de cor é uma especificação do conjunto visível de cores no espaço tridimensional de cor que constitui o universo das cores, sendo cada uma delas especificada por um ponto através de suas coordenadas no sistema de coordenadas tridimensionais deste espaço. O objetivo desse modelo é permitir uma especificação das cores dentro de qualquer *gamut*⁶⁴ de cor ou espaço de cor. Este espaço é considerado como o universo de cores que podem ser reproduzidas por um sistema, sendo a representação visual do modelo de cor. Esses sistemas podem ser definidos como (GOMES, 1990: 105-107):

- sistema padrão:

Criado para estabelecer sistemas universais de cor de maneira a especificar as cores de uma forma independente do dispositivo utilizado ou das peculiaridades de determinadas aplicações. Esse sistema é definido pelo CIE. Os três modelos de cor orientados para *hardware* são:

- CIE – RGB: definido em 1931, define um espaço de representação tricromático, baseado na teoria dos três estímulos, que toma como base de cores primárias três cores nas faixas de baixa, média e alta frequência, respectivamente o vermelho (*R-red*), o verde (*G-green*) e o azul (*B-blue*), que são adicionadas para produzir outras cores. Baseia-se no sistema de coordenadas cartesianas e cada cor pode ser representada através das três cores (figura 3.13). Esse modelo é usado em monitores de tubo de raios catódicos (CRT).
- CIE – XYZ: sistema aditivo que descreve as cores através de três cores primárias imaginárias chamadas X, Y e Z, definidas matematicamente. Foi criado pelo CIE devido à inexistência de um conjunto finito de cores primárias que produzissem todas as cores visíveis possíveis, sendo usado para transmissão de sistemas de televisão colorida.
- CMY: modelo definido com as cores primárias sendo o *cyan* (C), o magenta (M) e o amarelo (Y) que são as complementares das primárias do modelo CIE-RGB,

⁶⁴ Conjunto de cores que podem ser exibidas.

vermelho (R-red), verde (G-green) e azul (B-blue). São ditas complementares, pois quando combinadas aditivamente, em proporções adequadas, produzem a cor acromática⁶⁵. Quando usadas como filtros para subtrair uma cor da luz branca são chamadas primárias subtrativas. Usado por certos dispositivos de impressão colorida.

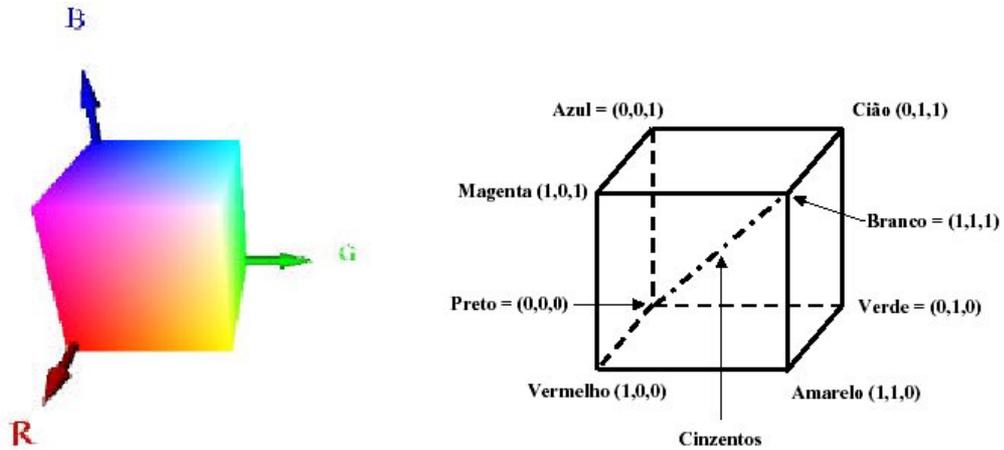


Figura 3.13 - Espaço de cor RGB⁶⁶

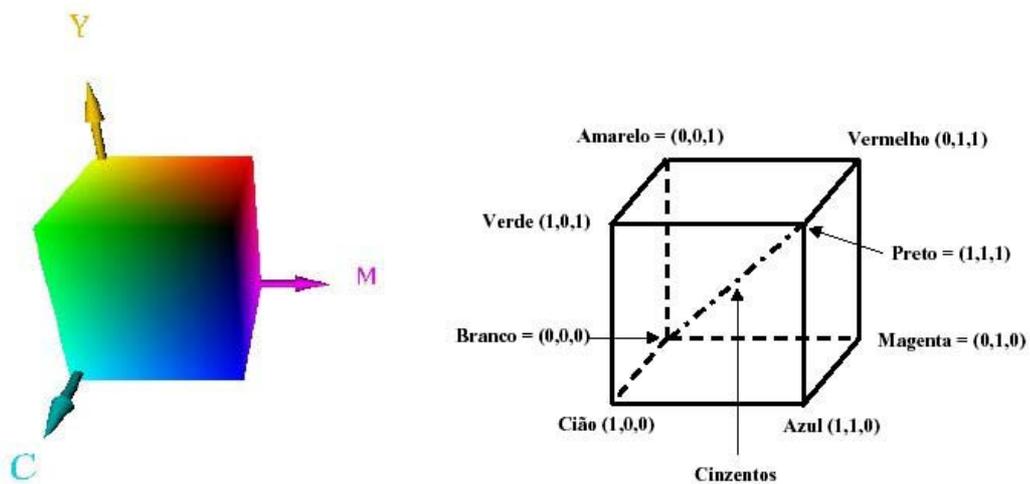


Figura 3.14 - Espaço de cor CMY⁶⁷

Esses modelos são difíceis de usar, pois não relatam diretamente as noções intuitivas de cor de matiz, saturação e brilho.

⁶⁵ Cor que possui apenas a informação de luminância.

⁶⁶ LOPES, 2002a: 17

⁶⁷ LOPES, 2002a: 19

- sistemas de interface de cor - Tem por objetivo permitir uma especificação da informação de cor por parte do usuário de forma mais fácil.
- modelo *Hue, Saturation, Value*⁶⁸ (HSV): modelo orientado ao usuário, sendo baseado numa descrição intuitiva da cor, onde a cor é especificada através de uma cor espectral e das quantidades de branco e preto que serão adicionadas para a obtenção de *tints*⁶⁹, *shades*⁷⁰ e *tones*⁷¹.

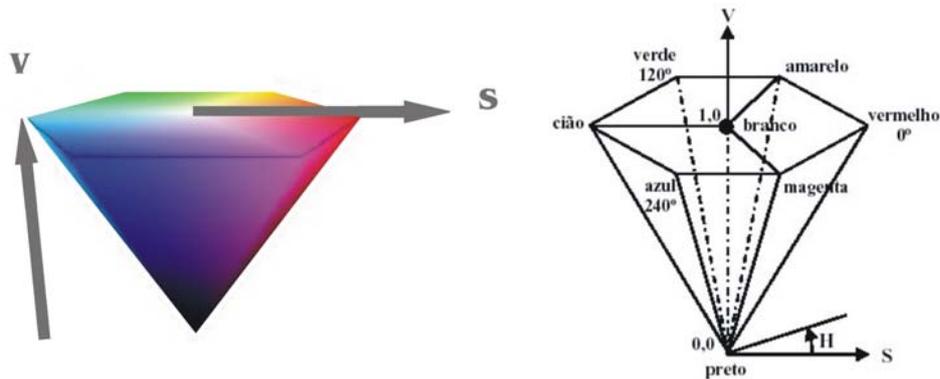


Figura 3.15 - Espaço de cor HSV⁷²

- modelo *Hue, Saturation, Lightness* (HSL): modelo baseado em parâmetros intuitivos de cor. O branco tem *lightness* = 1 e o preto tem *lightness* = 0.

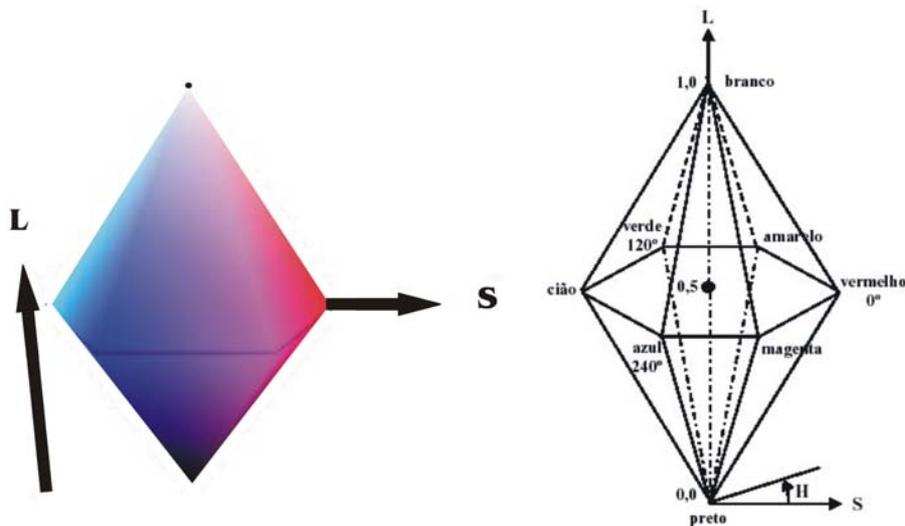


Figura 3.16 - Espaço de cor HSL⁷³

⁶⁸ regula o brilho da cor determinada por Hue e Saturation.

⁶⁹ *Tint*: resulta quando pigmento branco é adicionado a um pigmento puro diminuindo a saturação.

⁷⁰ *Shade*: vem da adição de pigmento preto a um pigmento puro, diminuindo a sua luminosidade.

⁷¹ *Tone*: é consequência da adição de pigmentos preto e branco em pigmento puro.

⁷² LOPES, 2002a: 20

⁷³ LOPES, 2002a: 22

A imagem digital *raster* é constituída das coordenadas dos *pixel* (posição) e da informação de cor de cada *pixel*, que estão relacionados com a resolução espacial e a resolução de cor radiométrica da imagem.

Como os dispositivos de exibição gráfica de cenas realísticas são em cores e os modelos de iluminação consideram somente efeitos de iluminação monocromáticos, é preciso incorporar a cor nos cálculos de intensidade como função das propriedades de cor das fontes de luz e superfícies dos objetos. A cor determina o modo como as superfícies dos objetos se comportam quando interagindo com a luz, sendo portanto necessário uma correta especificação desse atributo para determinar a luminância percebida das superfícies simuladas.

Uma grande parte dos programas de simulação de iluminação utiliza os sistemas de cores RGB e HSV para definir a cor da superfície, o que significa que essa definição será aproximada, visto que é muito difícil encontrar uma especificação de cores baseada nesses modelos para os objetos do mundo real. Assim, é preciso determinar as características de cor do material considerando a refletância do mesmo de forma a definir com maior precisão esse atributo. No que pese aos resultados encontrados, a determinação desses atributos de forma aproximada não caracteriza distorções significativas, podendo ser considerados para a resolução do problema proposto.

3.3.2 Atributos dos materiais

Para uma descrição realista da cena em estudo é preciso que materiais sejam atribuídos às superfícies dos objetos e sejam definidos através de seus atributos físicos, de forma a aproximar o resultado da simulação ao que ocorre na realidade. Esses atributos determinam como o material interage com a luz e são caracterizados da seguinte maneira:

- cor - determina quais frequências de luz são refletidas pela superfície e, portanto, qual cor é percebida;

- rugosidade - determina o aspecto do material e a quantidade de luz difusa que irá ser refletida quando o material é iluminado;
- transparência - determina a quantidade de luz que passa através do material, determinada pelo coeficiente de transmissão, especular e difuso;
- brilho - afeta a aparência da reflexão especular vista no material determinando os realces causados pela incidência da luz sobre os objetos;
- índice de refração - determina o comportamento da luz na interface entre dois materiais, ou seja, o quanto o percurso do feixe de luz é desviado ao atravessar meios diferentes; e
- refletância ou índice de reflexão (ρ) - é a quantidade de luz refletida pelo material, determinada pela relação entre o fluxo luminoso refletido (ϕ_r) por uma superfície e o fluxo luminoso incidente (ϕ) sobre esta mesma superfície. É dada pela equação:

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi} (\%) \quad (3.8)$$

A cor e a transparência determinam a iluminação difusa, direta e indireta, que é calculada durante a simulação. O índice de refração e o brilho determinam os realces (*highlights*) e as reflexões especulares nas superfícies do modelo.

3.3.3 Grandezas luminosas

Os sistemas voltados para a simulação de iluminação são baseados na simulação física da propagação da luz através do ambiente possibilitando resultados quantitativos expressos em termos de medidas da distribuição da luz na cena. As principais grandezas fotométricas utilizadas para expressar essas medidas segundo o Sistema Internacional de Unidades são:

- fluxo luminoso (ϕ) – quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa, sendo a sua unidade o lúmen;

- iluminância ou iluminamento (**E**) – fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área da superfície. No Sistema Internacional (SI) a unidade é o lux e no Sistema Americano (AS) é o footcandle;
- intensidade luminosa (**I**) – é o fluxo luminoso emitido por uma fonte numa direção particular, a candela (cd) é sua unidade; e
- luminância (**L**) – é a luz refletida de uma superfície numa direção particular, cuja unidade é candela por metro quadrado (cd/m²).

3.4 As ferramentas para simulação de iluminação

O estudo das ferramentas computacionais para simulação da iluminação não envolve somente a simulação da aparência do espaço, ou seja, as condições qualitativas para a representação precisa do projeto de iluminação, mas envolve também as questões quantitativas, referentes aos níveis de iluminação das superfícies, para a determinação da melhor solução de projeto. Além disso, as ferramentas propiciam a visualização dos efeitos de lâmpadas e luminárias, a distribuição luminosa, a iluminação natural e seu comportamento durante os períodos do dia e do ano, e o estudo da influência dos materiais nas condições de iluminação no espaço projetado.

O estudo da aplicação do programa de simulação da iluminação pode ser dividido em 4 critérios principais, segundo Inanici (2002: 2), utilizados como base para a avaliação dos programas empregados neste trabalho:

- dados de entrada

O passo inicial para a simulação em projeto de iluminação é a construção do modelo geométrico e definição das características dos materiais e fontes luminosas, considerados aqui como dados de entrada para a simulação.

A geometria do modelo deve ser construída de maneira a representar as superfícies do espaço, principalmente, aquelas que interagem com as fontes de luz. Devem ser utilizadas as técnicas disponíveis nos programas de modelagem geométrica, com a

preocupação de avaliar quais as técnicas aceitas pelas ferramentas de simulação na importação dos dados.

Os materiais devem ser especificados em termos de sua cor, refletância e transmissão luminosa para que o modelo esteja fisicamente fundamentado. Apesar de não haver um conjunto de parâmetros padrão que defina as características de um material para diferentes programas, a maioria deles utiliza definições tais como brilho, transparência, refletividade e cor, como atributos físicos dos mesmos. As definições de cor, baseados nos modelos RGB ou HSV variam de um programa para outro gerando algumas diferenças no resultado final da simulação.

Outro dado de entrada para a simulação é a definição dos parâmetros da iluminação artificial, onde as luminárias e lâmpadas são especificadas através das suas grandezas fotométricas, podendo ser utilizados arquivos no formato IES para especificar os dados, e da iluminação natural, definida a partir dos modelos de céu, normalmente usando-se os padrões CIE, e da luz solar cuja direção e intensidade pode se calculada a partir de parâmetros tais como a altura e o azimute do Sol ou a latitude, a longitude, a hora, o dia e o mês da simulação.

- algoritmos

Os programas de simulação da iluminação são ditos fisicamente fundamentados, pois utilizam os algoritmos de iluminação global para descrever a interação da luz na cena e simular seus efeitos sobre as superfícies dos objetos.

Os algoritmos utilizados são o de radiosidade, para o cálculo da propagação da luz difusa do ambiente e *ray tracing*, que calcula as contribuições da reflexão especular.

O *ray tracing* é um algoritmo versátil porque pode representar efeitos de iluminação como a iluminação direta, sombras, reflexões especulares (espelho e superfícies polidas) e refração através de materiais transparentes. A técnica da radiosidade não produz uma imagem texturizada, sendo portanto usada somente para o cálculo da iluminação, por isso é preciso usar o *ray tracing* ou outro método para produzir uma imagem final.

- saída dos resultados

Os resultados do processo de simulação podem ser dados por meio da exibição de relatórios numéricos descrevendo os níveis de iluminação do ambiente, imagens estáticas, formas mais utilizadas, ou através de animação e *walkthrough*.

Para a simulação qualitativa, existem limitações técnicas nas imagens que dificultam a avaliação da iluminação, tais como, as diferenças no processo de geração de imagens nos programas; as diferenças que ocorrem com o uso de diferentes equipamentos de exibição, e principalmente, a adequação do sistema visual humano aos níveis de luminância. Estas limitações dificultam os estudos comparativos entre ambientes simulados e ambientes reais, causando uma sensação diferente quando visualizado o projeto simulado e o espaço após sua execução.

Os dados quantitativos são apresentados na forma de um *grid* de valores de iluminação, níveis de iluminância ou luminância definidos através da escolha de pontos na tela ou por meio de métodos gráficos representando os gráficos isolux ou diagramas de falsa cor, emulando estas curvas. Esses dados podem estar disponíveis para visualização em tela ou impressão em relatório de análise.

- ferramentas de análise

Em programas específicos para a simulação de iluminação, além da visualização dos espaços iluminados, é preciso obter informações numéricas sobre a iluminação do ambiente projetado para estabelecer parâmetros de análise quantitativa e verificar se os níveis existentes no ambiente são coerentes com os valores necessários para o desempenho das atividades a serem desenvolvidas.

A maioria dos programas disponibilizam ferramentas de análise quantitativa, tais como a exibição de imagens em falsa cor (técnica *pseudo-color*), onde faixas de cor entre a cor azul e a cor vermelha são atribuídas aos valores de distribuição de iluminação ou luminância, emulando as linhas de isolux, o que facilita a análise da distribuição luminosa no ambiente.

Além disso, pode-se avaliar a iluminação através da análise dos valores de luminância ou iluminância apresentados como resultado das simulações e dispostos em forma de tabelas de valores.

Maiores detalhes sobre as ferramentas estudadas podem ser encontrados no Apêndice A – Programas Analisados.

3.5 Ferramentas existentes

Na prática projetual, segundo Ashmore (2000: 1), tem-se utilizado os *software* que executam *rendering* para gerar apenas imagens que traduzam a forma e a estética do projeto, sem considerar que eles possam produzir resultados fisicamente precisos dos projetos de iluminação. Isso porque, muitos dos programas para geração de imagens não consideram as propriedades físicas dos materiais e fontes luminosas, não produzindo, portanto, resultados fotometricamente corretos e imagens fotorealísticas.

Muitas ferramentas já têm sido desenvolvidas para produzir esses resultados, porém ainda são utilizadas nas práticas arquitetônicas por se acreditar que são de difícil aprendizado e requerem equipamentos caros, não disponíveis nos escritórios de projetos. Isso não mais corresponde à realidade, pois muitas destas ferramentas já estão disponíveis para uso em computadores pessoais, com interfaces similares às dos programas CAD e, alguns deles, com versões gratuitas na rede. Dentre eles podemos destacar:

Luz do Sol 1.1: desenvolvido pelo Professor Maurício Roriz, do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de São Carlos. É um programa que fornece tabelas e gráficos com estimativas das intensidades da radiação solar incidente sobre o plano horizontal ou vertical com qualquer orientação, conforme a latitude e para todas as horas e dias do ano, além de gerar projeções dos raios solares, luz solar direta, através de uma janela, descrevendo geometricamente a incidência do Sol em ambientes definidos.

Máscaras 1.0: desenvolvido pelo Professor Anderson Claro do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. É um programa na área de conforto luminoso dos edifícios para a geração das máscaras de sombra para uma determinada latitude.

Sunpath 1.0: programa desenvolvido pelo professor Maurício Roriz da Universidade Federal de São Carlos, para a visualização do movimento relativo entre o Sol e a Terra.

Photolux⁷⁴: *Software* desenvolvido no Brasil pela HN Luz e Tecnologia, São Paulo, Brasil, para tratar dados fotométricos, gerar relatórios, desenhar curvas fotométricas e gerar arquivos fotométricos em padrão internacional IES⁷⁵, que podem ser utilizados por programas de cálculo luminotécnico para a simulação da iluminação.

Adeline⁷⁶ (*Advanced Day and Electric Lighting Integrated New Environment*) é um programa desenvolvido por uma equipe de pesquisa internacional com o apoio da *International Energy Agency* (IEA), *SH&C Task 12 e Task 21*, para projeto de iluminação e que simula o comportamento e a performance da iluminação natural e artificial em ambientes internos, simples ou complexos. Produz resultados processando dados geométricos, fotométricos, climáticos e ópticos para melhorar a simulação da iluminação e produzir informações gráficas e numéricas precisas.

Radiance Synthetic Imaging System⁷⁷: é um sistema de ferramentas para análise e visualização do projeto de iluminação, utilizado em plataforma UNIX, disponível gratuitamente, para o uso não comercial, que foi desenvolvido inicialmente pelo *U.S. Department of Energy*, com direitos reservados à Universidade da Califórnia.

Desktop Radiance⁷⁸: *Software* de simulação e *rendering*, integrado ao ambiente do AutoCAD, desenvolvido pela LBNL - *Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA*, que oferece cálculos de iluminação e análise quantitativa e qualitativa do resultado da simulação através da exibição dos níveis de iluminação obtidos, que podem ser analisados selecionando os pontos na imagem, por meio de linhas isolux ou da técnica de falsa cor, onde os níveis são exibidos através de uma graduação de cores.

Lightscape⁷⁹: Aplicativo para o estudo de iluminação e *rendering*⁸⁰, da *Autodesk Inc, San Francisco, USA*, que simula as propriedades da luz e dos materiais segundo suas propriedades e comportamentos físicos, produzindo imagens fotorealísticas. Tem como

⁷⁴ <http://www.hnluz.com.br/photolux.htm>

⁷⁵ Illuminating Engineering Society

⁷⁶ <http://radsite.lbl.gov/adeline/HOME.html>

⁷⁷ <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>

⁷⁸ <http://radsite.lbl.gov/deskrad/dradHOME.html>

⁷⁹ <http://www.lightscape.com>

⁸⁰ Processo de síntese de imagem, onde são atribuídas as características de cor e textura aos materiais e definida as posições e características das fontes de luz.

principais aplicações, a simulação dos efeitos da iluminação, análise fotométrica quantitativa, *rendering* e animação.

Lumen Micro⁸¹: Programa de simulação de iluminação artificial e natural, desenvolvido pela *Lighting Technologies Inc, Colorado, USA*, para criar e simular *layouts* de iluminação interna e externa, possuindo uma biblioteca com uma grande variedade de luminárias, além de alguns objetos, tais como divisórias, paredes, cadeiras, entre outros. A saída dos resultados pode ser avaliada por meio de valores de iluminação para cada ponto, através de curvas isolux ou de áreas sombreadas ou por meio de texturizações. Para uma geração de imagens mais realísticas, possui um programa tradutor que permite a exportação de arquivos para o **Lightscape**.

Simply Lighting⁸²: Conjunto de programas para iluminação da *Lighting Technologies Inc, Colorado, USA* que contém ferramentas para análise e projeto, compostos de módulos que trabalham individualmente em cálculos de iluminação externa, interna e iluminação pública. Gera relatórios que incluem desenhos em escala, imagens texturizadas em tons de cinza e curvas isolux.

Autodesk Viz4⁸³: programa da *Autodesk Inc, San Francisco, USA*, que integra os recursos do **3D Studio VIZ** e do **Lightscape** para criar soluções de visualização considerando a iluminação global e gerando imagens fotorealísticas.

Accurender⁸⁴: aplicativo para geração de imagens realísticas através do algoritmo de *ray tracing*, que possui uma vasta biblioteca de materiais e luminárias, assim como recursos para a simulação da luz solar e animação de luzes, câmeras e objetos. Permite gerar imagens em falsa cor mostrando os níveis de iluminação da cena. Foi desenvolvido por Robert McNeel & Associates, funcionando como *plug-in* do **AutoCAD**.

⁸¹ <http://www.lighting-technologies.com>

⁸² <http://www.lighting-technologies.com>

⁸³ <http://www.autodesk.com>

⁸⁴ <http://www.accurender.com>

AGI 32⁸⁵: programa para desenvolvimento de sistemas de iluminação, da *Lighting Analysts, Inc.*, que executa cálculo de iluminação, modelamento e *rendering* de projetos de iluminação artificial e natural.

Microstation⁸⁶: programa da *Bentley Systems Inc, Exton, Pennsylvania, USA*, que permite, além da geração de imagens fotorealísticas, a visualização da incidência da luz natural e das sombras projetadas através do recurso “estudo solar” onde é possível gerar um filme onde a câmera fica parada e o Sol se movimenta com o tempo. Para isso é preciso definir a latitude, a longitude, o dia do ano e os horários de início e fim da simulação.

Specter⁸⁷: pacote de programas para a simulação da iluminação da *Integra Inc, Japan* para gerar imagens de alta qualidade e realizar cálculos de iluminação, fornecendo os resultados através de tabelas numéricas com os valores da distribuição de luminância e iluminância, e gráficos retratando o nível de iluminação do ambiente estudado.

Leso-Dial⁸⁸: *software* para projetos de iluminação natural, desenvolvido pelo *Laboratoire d'énergie solaire et de physique do bâtiment, Lausanne, Switzerland* que calcula o fator de luz do dia e fornece ferramentas para otimizar a performance da iluminação natural aplicada ao projeto.

Os aplicativos **Luz do Sol**, **Máscaras** e **Sunpath** não produzem imagens fotorealísticas, mas podem ser utilizados na fase de definição da implantação da edificação já que tratam da visualização da incidência solar e criação do percurso aparente do Sol e máscara de sombra, favorecendo estudos de iluminação natural.

O **Autodesk VIZ 4**, o **Accurender** e o **Microstation** produzem imagens fotorealísticas, porém não possibilitam o estudo qualitativo dos níveis de iluminação existentes. É possível visualizar a incidência dos raios solares nos diversos períodos do ano e produzir animações.

Software como o **Specter**, o **Radiance** e o **Desktop Radiance**, o **Adeline**, o **Lumen Micro** e o **Lightscape** são mais completos, permitindo estudos quantitativos e

⁸⁵ <http://www.lightinganalysts.com/Products/AGI32/agi32.htm>

⁸⁶ <http://www.bentley.com>

⁸⁷ <http://www.integra.co.jp/eng/products/specter/index.htm>

⁸⁸ http://lesowww.epfl.ch/anglais/Leso_a_frame_sof.html

qualitativos do projeto de iluminação, proporcionando uma análise mais precisa das condições de projeto.

3.6 As ferramentas empregadas

O critério para a seleção dos programas estudados baseou-se no uso das ferramentas que estavam disponíveis no LCAD – Laboratório de Computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia, onde a pesquisa foi desenvolvida.

Foram avaliados os programas: **Lightscape Visualization System** da *Autodesk*, **Lumen Micro** da *Lighting Technologies Inc* e **Desktop Radiance** da *Environmental Energy Technology Division, Building Technologies Program at Lawrence Berkeley National Laboratory*.

O **Lightscape** é um aplicativo para o estudo de iluminação e texturização, que simula as propriedades das fontes luminosas e dos materiais, realçando efeitos luminosos dificilmente obtidos em programas convencionais de *rendering*, gerando imagens fotorealísticas. Possui uma interface de rápido aprendizado, com comandos de fácil assimilação, porém não é uma ferramenta para modelagem tridimensional. Por isso, o modelo deve ser construído em outro programa e importado para o **Lightscape**.

Após a importação do modelo deve-se estabelecer a orientação das superfícies, que devem estar posicionadas de forma que sua normal esteja voltada para o local onde a simulação será realizada (interior ou exterior). Esse trabalho é difícil nos modelos de maior complexidade.

O programa possui uma biblioteca de materiais, dispostos em 16 padrões, especificados através de propriedades físicas, transparência, refletância, brilho e índice de refração. É possível criar outras configurações a partir dos padrões existentes, com texturas aplicadas e cores definidas a partir dos modelos de cor RGB ou HSV.

As fontes luminosas artificiais são definidas, a partir da biblioteca de luminárias existente, onde a fotometria real pode ser aplicada através do padrão de dados fotométricos IES disponíveis, ou importados de outras bibliotecas. As fontes de luz

natural são o Sol e o céu, modelados, respectivamente, como uma fonte de luz distante, de emissão de raios paralelos, e como um domo de raio infinito convencionado para as condições de céu limpo, parcialmente encoberto ou encoberto.

O processo de simulação se dá em três etapas: a primeira é a configuração dos parâmetros de simulação, a segunda é a subdivisão das superfícies numa malha de elementos finitos e a terceira, o processamento propriamente dito, é onde o modelo de radiosidade de refinamento progressivo é aplicado para o cálculo da iluminação.

Após a simulação, os resultados numéricos podem ser visualizados graficamente em imagens de falsa cor ou escala de cinza, ou através da análise de pontos simples ou em um *grid*. A análise qualitativa é feita através da visualização do modelo simulado em vários pontos de vista ou em imagens texturizadas com o uso do modelo de iluminação *ray tracing*. O programa ainda possibilita a criação de animações, mas somente com o cálculo da radiosidade.

O **Lumen Micro** é um programa para análise da iluminação que permite a visualização dos ambientes e a análise do seu desempenho, possuindo uma interface amigável e de fácil aprendizado.

O modelo é definido no próprio programa, com a restrição de modelar apenas ambientes ortogonais, não sendo possível utilizar elementos inclinados ou curvos. Há a possibilidade de importar arquivos DXF ou DWG, mas estes são utilizados apenas como *background* para visualização.

Os materiais são definidos pela cor através dos modelos RGB ou HSV, ou pelo valor de refletância, tendo alguns materiais pré-definidos armazenados. Possui uma biblioteca de blocos, com elementos de geometria simples, e de fontes luminosas para serem inseridos no modelo geométrico, permitindo ainda importar arquivos no formato IES com definições da fotometria das luminárias.

Antes de processar a simulação no programa, é preciso definir um *grid* de cálculo no qual os valores obtidos serão armazenados e inserir as aberturas, caso haja a consideração da luz natural. Feito isso, são escolhidos os ambientes a serem simulados, se existirem mais de um, configurada a fonte de luz natural, através da orientação do

modelo, hora, dia e mês da simulação e condição do céu, e definido o processo de texturização a partir do cálculo da radiosidade e *ray tracing*.

Como resultados, é possível visualizar imagens texturizadas, coloridas ou em escala de cinza, diagramas isolux e relatórios numéricos com os valores dos níveis de iluminação no *grid* anteriormente definido.

O **Desktop Radiance** é um aplicativo que auxilia o projeto e análise da iluminação de edificações, criado a partir do original **Radiance Synthetic Imaging System**, opera no sistema **Windows**, como um *plug-in* do **AutoCAD**, o que possibilita a utilização de seus recursos para o modelamento tridimensional.

Os materiais são atribuídos a partir da biblioteca existente, divididos em dois grupos, material opaco refletor (metal ou plástico) e material transparente. O material opaco é definido pela sua cor, no sistema RGB, especularidade e rugosidade, e o material transparente por sua especularidade, cor, rugosidade e transparência.

As fontes luminosas artificiais ficam restritas às existentes na biblioteca do programa, não sendo permitido a inserção de arquivos fotométricos no formato IES. A luz natural é especificada pelos parâmetros de orientação, hora e dia da simulação, e condição do céu, podendo este ser limpo, parcialmente nublado, nublado ou uniforme⁸⁹.

Para o cálculo da iluminância é preciso especificar um ponto ou *grid* de análise, e para gerar a texturização da cena é preciso definir uma câmera. A simulação é processada usando o modelo de *ray tracing*. Sendo calculado para cada câmera ou ponto de análise estabelecidos e uma vez definidos, não podem ser modificados. Com o processamento da simulação, os cálculos são realizados ou a texturização criada, a depender da escolha feita anteriormente.

O processo de geração de imagens pode ser feito de duas maneiras: no modo interativo, onde a imagem é visualizada na tela durante o processo, iniciando de uma imagem grosseira, que vai sendo refinada progressivamente, ou no modo *batch processing*, que é uma forma mais rápida, onde a simulação é processada em “*background*” para posterior visualização.

⁸⁹ Um céu uniforme não é uma condição comum da natureza, mas é, algumas vezes, usado para analisar o modelo. Gera sombras e luz difusa como o céu nublado, mas com destaques especulares fracos.

Os resultados obtidos podem ser analisados através de pontos de referência únicos, *grid* de pontos, imagens texturizadas, imagens em falsa cor ou com curvas isolux, oferecendo ainda uma análise humana sensitiva traduzida numa variedade de filtros não lineares e lineares de emulação da visão humana.

* * *

A partir do estudo dessas três ferramentas, foram desenvolvidos os experimentos descritos no próximo capítulo.



EXPERIMENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO

“Esse processo de adequação da prática arquitetônica passa não somente pela aquisição de tecnologias, mas também pelo treinamento e conhecimento aprofundado das mesmas a fim de que seja possível explorá-las em todo o seu potencial” .

(REGO, 2000: 6)

4.0 EXPERIMENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO

Os experimentos realizados inicialmente, foram definidos de forma a avaliar os programas em estudo quanto às suas facilidades de uso, interface com o usuário, modos de utilização e algoritmos de cálculo da iluminação para o uso na simulação da iluminação natural e artificial em ambientes internos.

A validação das ferramentas foi feita utilizando-se dois processos de análise:

- um estudo comparativo, quantitativo e qualitativo, entre os dados simulados nos programas e os dados coletados em uma situação real de forma a verificar quão coerentes e precisos os resultados obtidos na simulação computacional seriam; e
- um estudo comparativo entre os dados simulados com os dados obtidos a partir dos cálculos tradicionais utilizados no projeto de iluminação. Esse estudo fornece apenas, em nível de comparação, os dados quantitativos dos níveis de iluminação no ambiente, não sendo possível avaliar de forma qualitativa o ambiente estudado, apesar das ferramentas possibilitarem a geração de imagens do ambiente.

A partir daí, foram desenvolvidos novos experimentos que possibilitaram a verificação do uso da simulação computacional no desenvolvimento de projetos de iluminação através de estudos sobre a **interferência da iluminação no ambiente**; sobre as características da iluminação natural com a **modificação das dimensões, posicionamento e tipo das aberturas**; sobre as conseqüências da especificação **de materiais com diferentes atributos** para um mesmo espaço; e sobre o **uso integrado da iluminação natural e artificial** em ambientes internos.

Dessa forma, foi possível verificar os resultados obtidos e compará-los com os valores encontrados nos ambientes reais ou nos cálculos tradicionais, de forma a avaliar o uso dos programas de simulação do ponto de vista da sua aplicação no processo projetual de iluminação, descrevendo as possibilidades, vantagens e desvantagens das ferramentas analisadas no decorrer da pesquisa, bem como da sua perspectiva de uso como ferramenta auxiliar para o ensino das disciplinas de conforto luminoso.

Foram feitos um total de 9 experimentos que são mostrados e discutidos a seguir.

4.1 Materiais e métodos

O método empregado foi desenvolvido em três etapas, definidas a partir das necessidades existentes, no decorrer dos ensaios, para o desenvolvimento dos estudos comparativos e para a verificação da aplicação da simulação.

A primeira etapa caracterizou-se pela escolha dos programas a serem avaliados e seu aprendizado. Foram considerados os aspectos relacionados à finalidade, às principais aplicações, à operacionalidade, à metodologia para execução das tarefas, a eficácia e eficiência dos algoritmos implementados, aos recursos disponíveis e aos resultados fornecidos.

A segunda etapa, desenvolvida para a validação dos programas, constou da escolha de um ambiente existente, de fácil acesso, de modo a facilitar o cadastro e o levantamento do mobiliário, a obtenção das informações sobre os materiais, lâmpadas e luminárias empregadas e para que pudessem ser feitas medições dos níveis de iluminação encontrados para a iluminação natural e artificial, além da tomada de fotografias para posterior comparação com os resultados obtidos nos programas de simulação. As fotos foram tiradas com o uso de uma máquina digital Kodak DC 200, com resolução de 1152 x 864 *pixels* e distância focal de 37 mm. As medições foram feitas com um luxímetro Panlux Electronic 2 Gossen.

A terceira etapa, em ambiente computacional, caracterizou-se pela construção dos modelos geométricos tridimensionais que reproduzissem as características dos espaços usados para as medições físicas e sua utilização nos programas, para o desenvolvimento do processo de simulação da iluminação propriamente dito e a obtenção dos resultados para posterior análise e discussão.

A partir do estudo dos programas e o desenvolvimento dos experimentos, foi elaborado um roteiro de trabalho para aplicação das ferramentas de simulação computacional na análise da iluminação descrito a seguir e resumido no quadro 4.1.

Etapas:

- 1) Definição do ambiente arquitetônico a ser simulado - o ambiente escolhido pode ser uma proposta do projeto de iluminação em fase de desenvolvimento ou um espaço real para a avaliação da iluminação existente.

- 2) Caracterização do ambiente – antes de iniciar o uso das tecnologias computacionais é preciso definir as características principais do ambiente que irão influenciar diretamente na proposta de iluminação.
 - a) Finalidade do espaço – a atividade a ser exercida no ambiente irá definir o nível de iluminação necessário para a execução da tarefa visual, que por sua vez é definida pela NBR 5413 (1982);
 - b) *Layout* (arquitetura e mobiliário) – as medidas do ambiente devem ser estabelecidas, assim como as dimensões do mobiliário proposto;
 - c) Escolha dos materiais a serem utilizados – os materiais devem ser especificados de acordo com seus atributos de cor, refletância, transparência e rugosidade, principalmente aqueles aplicados nas paredes, no teto e no piso; e
 - d) Definição das lâmpadas, luminárias e da sua distribuição e posicionamento – a definição correta das fontes luminosas é essencial para a simulação da iluminação tanto quantitativa quanto qualitativamente.

- 3) Definição dos parâmetros de iluminação – os parâmetros a seguir devem ser conhecidos já que fazem parte dos dados de entrada nos programas de simulação necessários para o processamento do cálculo.
 - a) Iluminação natural – parâmetros necessários para o cálculo da incidência da luz natural no espaço, proveniente da incidência direta do sol ou da reflexão pela abóbada celeste.
 - i) Orientação – posicionamento do ambiente em relação ao Norte verdadeiro;
 - ii) Latitude e longitude – especificação das coordenadas geográficas do local, o que irá definir a incidência solar sobre o mesmo;
 - iii) Condição da abóbada celeste – padronização definida pela CIE para a caracterização do céu, podendo ser especificado como céu claro, parcialmente nublado ou nublado;
 - iv) Horários – determinação da hora solar para a simulação; e

- v) Dia e mês - especificação do período do ano.
- b) Iluminação Artificial – parâmetros necessários para o cálculo das fontes artificiais de iluminação.
- i) Posicionamento das fontes luminosas – localização dos pontos de luz no ambiente; e
 - ii) Caracterização das fontes luminosas – determinação dos atributos das lâmpadas e luminárias, tais como o tipo, a cor e o fluxo luminoso da lâmpada e a distribuição luminosa da luminária, que pode ser atribuída através de arquivos no formato IES.
- 4) Modelagem geométrica tridimensional do ambiente – descrição do ambiente através de uma representação tridimensional.
- 5) Importação do modelo geométrico para o ambiente de simulação – se a ferramenta de simulação não possui recursos para o modelamento, é necessário importar o modelo construído em outro programa para o simulador utilizado, tomando-se o cuidado de verificar os tipos de representação, técnica de modelagem e estrutura de dados, e os formatos de arquivo suportados.
- 6) Processo de simulação – preparação do modelo geométrico para processar a simulação computacional.
- a) Atribuição de materiais – definição dos atributos dos materiais e aplicação dos mesmos às superfícies do ambiente;
 - b) Posicionamento e ajustes das fontes luminosas – inserção das luminárias no modelo, especificação das aberturas e janelas e definição dos parâmetros para a iluminação artificial e natural, anteriormente citados;
 - c) Processamento do modelo proposto – cálculo da iluminação estabelecida através dos algoritmos implementados nas ferramentas e a definição dos parâmetros de simulação; e
 - d) Saída dos resultados – obtenção dos resultados dos cálculos realizados através de dados numéricos ou visualização do espaço iluminado.

7) Análise dos dados de saída – avaliação dos resultados obtidos considerando os aspectos quantitativos e qualitativos

a) Aspectos quantitativos:

i) Nível de iluminamento – quantidade de iluminação do ambiente em determinado ponto ou em média que deverá satisfazer às necessidades da atividade para qual o espaço foi projetado; e

ii) Diagramas isolux e técnica de falsa cor – visualização da distribuição lumínica através de linhas de igual iluminamento ou através da gradação de cores emulando tais curvas.

b) Aspectos qualitativos:

i) Qualidade das imagens produzidas – visualização do aspecto da iluminação calculada para o espaço considerando a reprodução da proposta de iluminação; e

ii) Análise “subjetiva” – avaliação das imagens geradas em relação à percepção visual e às sensações produzidas pela iluminação projetada.

Para o desenvolvimento de estudos comparativos com ambientes existentes, além do roteiro especificado, foi preciso fazer medições com o luxímetro em pontos pré-definidos e tomada de fotos do ambiente iluminado tendo a preocupação de estipular parâmetros tais como a altura e ângulo de abertura da câmera e a qualidade do equipamento, para a posterior comparação com os resultados simulados. É importante considerar as possíveis diferenças encontradas devido às configurações dos equipamentos utilizados, ao processo de execução das tarefas e à manipulação dos dados.

Com o roteiro estabelecido foi possível executar simulações na maioria dos programas, embora devamos considerar as características particulares de cada um, principalmente no que tange a modelagem geométrica tridimensional, a atribuição dos materiais e a especificação das fontes luminosas.

Tabela 4.1 - Roteiro de trabalho para aplicação da simulação computacional em projetos de iluminação

ITEM	SUB – ITEM 1	SUB – ITEM 2
1. Caracterização do ambiente	a) Finalidade do espaço	
	b) <i>Layout</i> (arquitetura e mobiliário)	
	c) Escolha dos materiais a serem utilizados	
	d) Definição das lâmpadas e luminárias aplicadas e da distribuição e posicionamento das mesmas	
2. Definição dos parâmetros de iluminação	a) Iluminação natural	i. Orientação ii. Latitude e longitude iii. Condição do céu iv. Horários v. Dia e mês
	b) Iluminação artificial	i. Posicionamento e dimensão das fontes luminosas ii. Caracterização das fontes luminosas
4. Modelagem geométrica tridimensional do ambiente		
5. Importação do modelo geométrico para o ambiente de simulação (se necessário);		
6. Processo de simulação	a) Atribuição de materiais	
	b) Posicionamento e ajustes das fontes luminosas	
	c) Processamento do modelo	
	d) Saída dos resultados	
7. Análise dos resultados	a) Aspectos quantitativos	i. Nível de iluminamento ii. Diagramas isolux
	b) Aspectos qualitativos	i. Qualidade das imagens produzidas ii. Análise “subjetiva”.

4.2 Descrição dos ensaios, análises e discussão

Os ensaios descritos a seguir, foram realizados em ambientes internos utilizando-se os programas selecionados. Estes experimentos foram condicionados a partir das características dos espaços e dos recursos disponíveis nas ferramentas utilizadas, não sendo possível testar alguns dos experimentos nos 3 programas estudados.

Para todas as simulações realizadas, os ambientes foram localizados em Salvador, tendo como referência a latitude 12,95° Sul e longitude 38,50° Oeste. Os modelos geométricos tridimensionais foram construídos no programa **AutoCAD R14** e exportados para o programa **Lightscape** para posterior desenvolvimento dos testes. No caso do programa **Desktop Radiance**, o modelo não precisou ser exportado porque, sendo o simulador um *plug-in* do **AutoCAD**, a simulação é executada no próprio ambiente do programa. Para as simulações no aplicativo **Lumen Micro**, por não suportar a importação dos modelos, estes foram construídos no próprio programa, com recursos limitados, gerando diferenças na visualização dos mesmos.

Cada experimento realizado possibilitou um estudo específico da iluminação e permitiu uma análise dos recursos das ferramentas empregadas para a visualização do ambiente simulado e para a determinação dos níveis de iluminação propostos.

Com essas análises, foi possível desenvolver uma “metodologia de trabalho” para o uso das ferramentas de simulação computacional de iluminação, além de procedimentos para sua aplicação no processo de projeção arquitetônica.

A - Iluminação artificial

Como primeiro experimento, foi desenvolvido um estudo para a validação do programa **Lightscape** como ferramenta de análise quantitativa e qualitativa para o projeto de iluminação artificial de um ambiente real, o que permitiu analisar as características desse programa em relação às diversas fases do processo de simulação: modelagem, definição e atribuição dos materiais, caracterização das fontes luminosas, algoritmos implementados e saída dos resultados. O programa foi escolhido porque, além de calcular os níveis de iluminância para a proposta simulada, é voltado para a geração de imagens fotorealísticas.

Assim, tomou-se uma sala de 25,90 m² de um apartamento residencial, com pé direito de 2,74 m, composto de ambiente de estar, jantar e varanda fechada com esquadria de alumínio e vidro, com uma iluminação geral indireta, produzida por lâmpadas fluorescentes instaladas em sanca, e uma iluminação direta com luminária de embutir tipo *spot*, para lâmpadas incandescentes, na varanda e no nicho da estante.

Para o desenvolvimento da parte experimental do trabalho, foram tiradas fotos do ambiente (figura 4.1) e feitas medições do nível de iluminamento em pontos pré-definidos (figura 4.2), para que se pudesse realizar um estudo comparativo entre a situação real e a simulada. As medições foram feitas durante a noite, com todas as luminárias acesas.



Figura 4.1 – Ambiente com iluminação artificial

Foi escolhido um local de fácil acesso, onde se pudesse fazer medições de iluminamento, cadastro e verificação de medidas a qualquer hora, sendo especificadas para o modelo de simulação as lâmpadas, luminárias e materiais de acordo com os existentes no ambiente real.

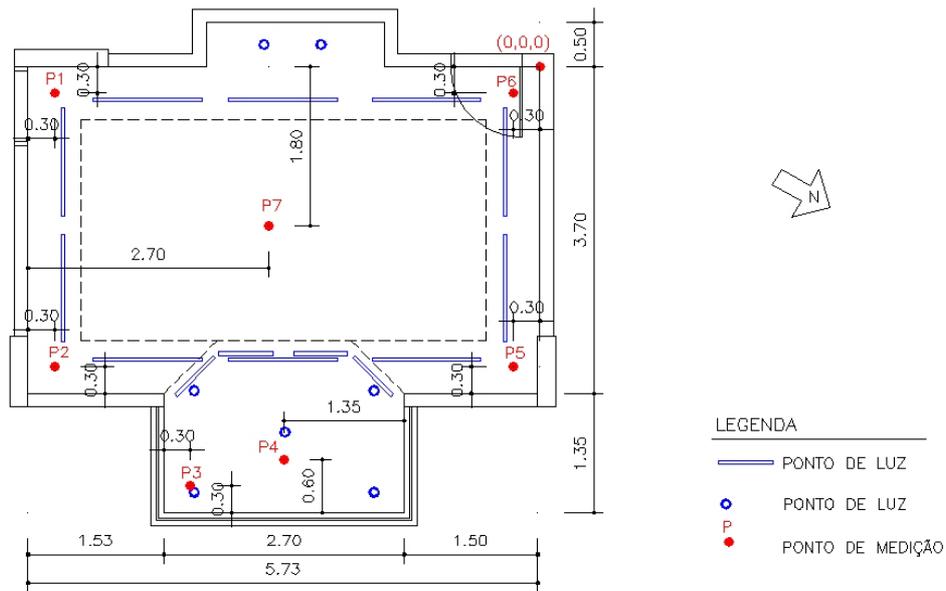


Figura 4.2 – Indicação dos pontos de medição e das fontes de luz artificial

O modelo tridimensional (figura 4.3) foi exportado para o programa **Lightscape**, onde foram aplicados os materiais, definidas as fontes luminosas e simulada a iluminação. Após finalizado o processo de texturização do ambiente simulado, foi feita uma comparação visual entre as imagens obtidas e as fotos tiradas, e também uma análise dos valores de iluminamento obtidos comparados aos valores medidos no local.

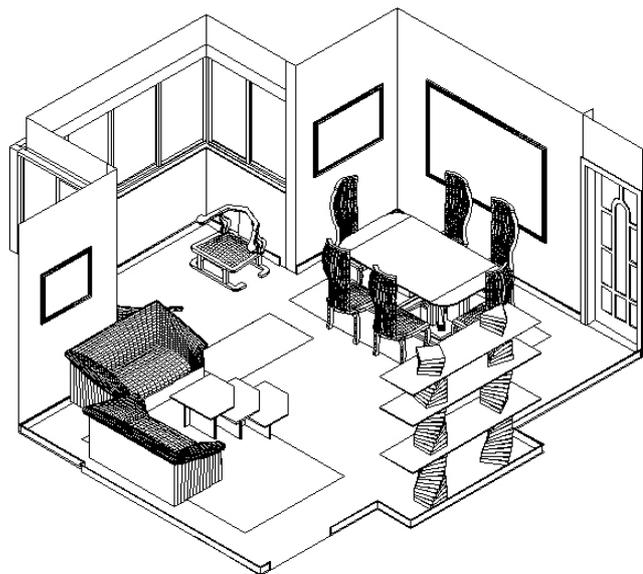


Figura 4.3 – Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

Através da simulação da iluminação artificial do ambiente no **Lightscape**, foi possível determinar os valores de iluminância para os 7 pontos pré-definidos, para posterior comparação com os valores medidos no ambiente real, além de permitir a obtenção de valores para pontos em diversas superfícies, possibilitando avaliar as áreas de menor nível de iluminação.

Os valores encontrados, e descritos na tabela 4.2, foram agrupados na figura 4.4, onde é evidenciada uma boa correlação dos resultados da simulação e das medições em alguns pontos, sendo a divergência máxima de 13,33 % e a mínima de -12,66 % em relação aos valores medidos, tendo um ponto uma discrepância maior, de 35,17 %. Isso se deve à dificuldade de determinação dos pontos através da ferramenta, posicionados por distâncias aproximadas. O **Lightscape** não disponibiliza recursos de precisão para essa tarefa.

Tabela 4.2 – Valores medidos no local e valores obtidos na simulação

PONTOS	LUXÍMETRO (LUX)	SIMULAÇÃO (LUX)	VARIAÇÃO (%)
1	52,00	52,63	1,21
2	72,00	71,00	-1,39
3	158,00	138,00	-12,66
4	150,00	170,00	13,33
5	60,00	53,00	-11,67
6	62,00	67,73	9,24
7	145,00	196,00	35,17

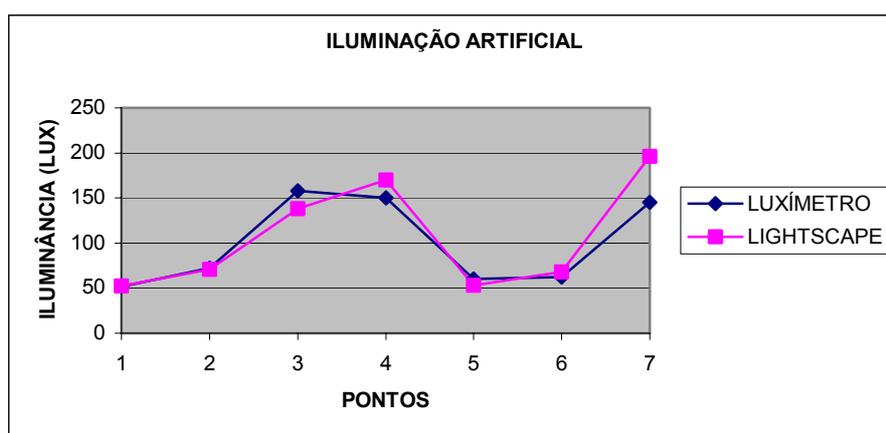


Figura 4.4 – Valores medidos e valores obtidos na simulação

A partir dos valores encontrados, a análise quantitativa conclui que as diferenças encontradas nos pontos 1 a 6 têm uma variação aceitável (se considerarmos os recursos

do programa e a dificuldade em descrever as propriedades físicas dos materiais de forma mais precisa), gerando algumas distorções em relação à cor do material, definida pelos sistemas de cores RGB ou HSV, (difícil de ser especificada para os materiais do ambiente real), e à refletância dos mesmos, o que necessita de equipamentos específicos para sua definição.

A avaliação da intensidade da iluminação pode ser feita também pela técnica *pseudo-color*, disponível no programa, que emula as curvas isolux através de uma gradação de cores que vai do azul ao vermelho, correspondendo respectivamente às áreas de menor e maior iluminância, conforme pode ser visualizado na barra de intensidades da figura 4.5. A visualização mostrou que há uma grande concentração de luz no teto, próximo a sanca, deixando muitos pontos do ambiente mal iluminados.

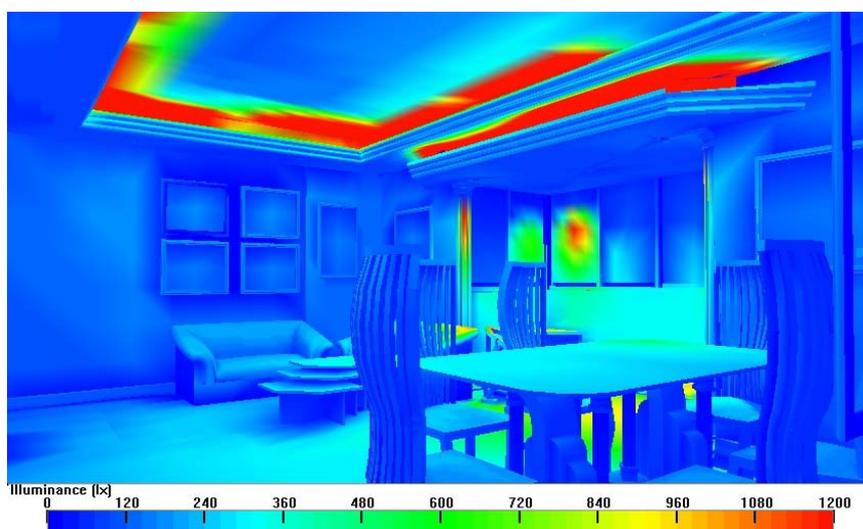


Figura 4.5 – Imagem do ambiente simulado em falsa cor

A análise qualitativa do ambiente foi feita a partir da comparação entre as imagens geradas (figura 4.6) e as fotos tiradas no local (figura 4.7), o que evidenciou uma diferença quanto aos contrastes de claro-escuro e a percepção da iluminação do ambiente, sendo mais escura na imagem simulada.

Em relação à percepção da iluminação no ambiente real, este é percebido com uma sensação de que a luminosidade é maior do que no ambiente simulado, principalmente devido à adaptação do sistema visual humano, embora as fontes luminosas na simulação tenham sido descritas com as mesmas características das fontes existentes.

A comparação entre as imagens é prejudicada devido à forma de definição do ângulo de abertura da câmera no programa de simulação, que não permitiu obter a mesma visualização que as fotografias.

Um outro ponto a ser destacado, é a diferença resultante das características dos equipamentos utilizados para a simulação e para a tomada de fotos que não permitem uma aproximação do real com o simulado, gerando resultados diferentes para uma mesma situação.



Figura 4.6 – Ambiente real iluminado artificialmente



Figura 4.7 – Simulação da iluminação artificial no Lightscape

Observa-se dessa forma, que muitas diferenças podem ser detectadas, porém a percepção visual do espaço simulado permite uma caracterização geral da iluminação do ambiente, sendo possível detectar os contrastes existentes e as regiões de maior e menor iluminância.

Foi possível verificar as possibilidades, vantagens e desvantagens do programa utilizado, colaborando para um melhor entendimento dos recursos disponibilizados, e avaliá-lo do ponto de vista quantitativo e qualitativo quando aplicado ao projeto de iluminação artificial.

B - Iluminação natural

Para o estudo da iluminação natural, foi escolhido um ambiente residencial sem mobiliário, onde foi simulada a incidência solar durante algumas horas e feita medições dos níveis de iluminação neste período.

O ambiente examinado é uma sala de estar de 19,55 m² de um apartamento com pé direito de 2,82 m, abertura lateral com orientação 70° SE (figura 4.8), onde foram feitas as medições de iluminância em 10 pontos previamente definidos (figura 4.9).

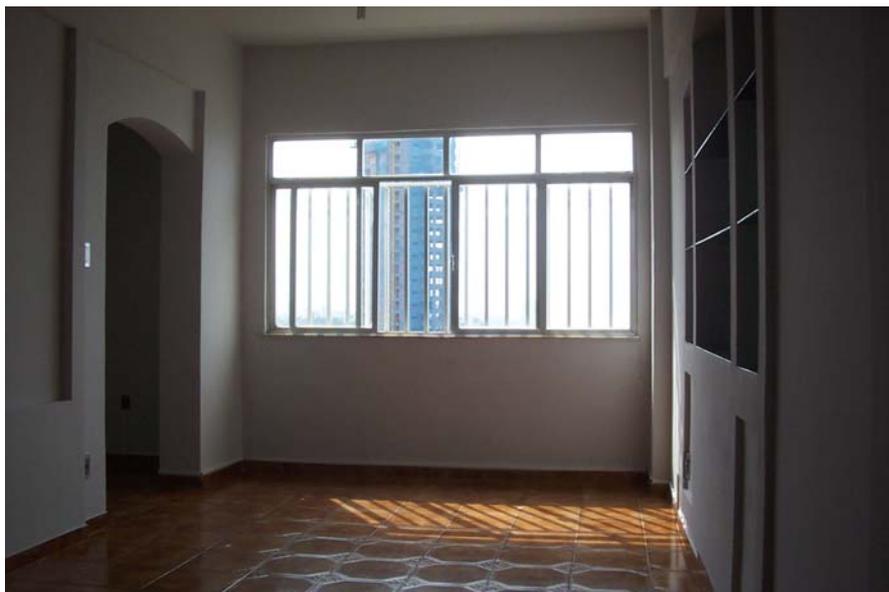


Figura 4.8 –Ambiente com iluminação natural

As medições foram feitas sob condições de céu parcialmente nublado e nublado, em 25 de setembro, as 9:00 e 10:00 horas, horários nos quais ocorria incidência solar direta no ambiente, de forma a possibilitar, além da análise quantitativa, através da comparação dos níveis de iluminação no ambiente, uma análise visual da quantidade de luz incidente sobre o mesmo, com a visualização das projeções dos raios solares através da janela.

As simulações foram executadas nos programas **Lightscape**, **Lumen Micro** e **Desktop Radiance**. Foram atribuídos os materiais e definida a fonte luminosa, o sol, em relação à orientação, período da simulação, posição geográfica do ambiente, além da cor e condições da abóbada celeste, de forma a avaliar como as ferramentas tratam a simulação da iluminação natural do ponto de vista quantitativo e qualitativo.



Figura 4.9 – Pontos de medição dos níveis de iluminamento natural

Na tabela 4.3, é possível verificar os valores encontrados nas medições *in loco* da iluminância dos pontos e os valores obtidos na simulação que demonstram uma grande divergência, principalmente nas áreas mais afastadas da abertura.

Tabela 4.3 – Valores medidos no local e valores obtidos na simulação para iluminação natural às 9:00 horas

PONTOS	LUXÍMETRO (LUX)	LIGHTSCAPE (LUX)	LUMEN MICRO (LUX)	DESKTOP RADIANCE (LUX)
1	2000	2191,16	44036	430,02
2	27000	2983,62	46413	514,59
3	1240	1687,12	12915	422,79
4	1750	1806,45	13984	474,52
5	750	1180,07	11288	322,44
6	970	1080,78	11632	338,14
7	465	787,63	10483	268,16
8	550	751,76	10610	270,53
9	340	562,47	10230	223,21
10	355	552,86	10258	220,09

Com esses valores foi possível gerar o gráfico da figura 4.10, observando-se discrepâncias significativas nos valores simulados. Para a simulação da iluminação natural, em condições de céu parcialmente nublado, os valores destoam significativamente. Isso ocorre, provavelmente, pela forma como o algoritmo de cálculo é implementado e pelas condições de variabilidade da nebulosidade da abóbada celeste no momento da medição. A nebulosidade dificulta a determinação do tipo de configuração de céu a ser utilizado nos programas de simulação. Os programas utilizam um padrão, estabelecido pela CIE, de modelo de céu ideal que, segundo Ward (2002: 3), não é adequado para prever os valores de iluminação interna.

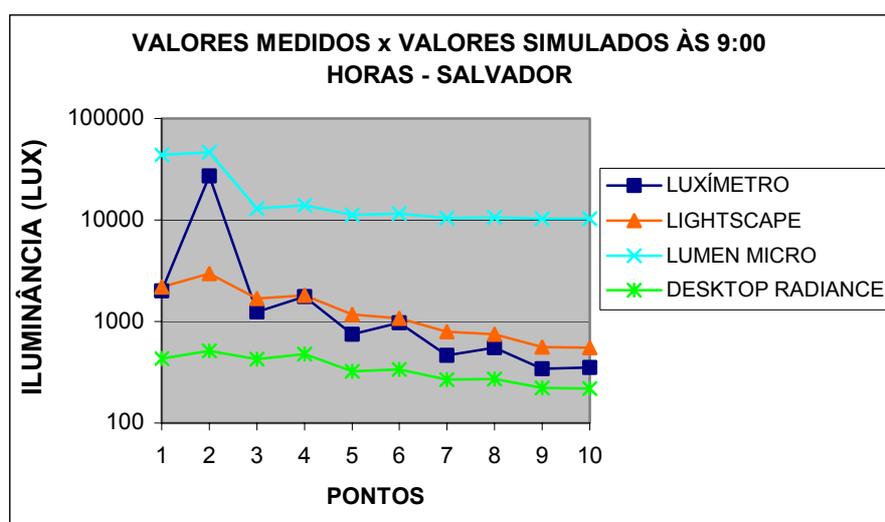


Figura 4.10 - Valores medidos e obtidos na simulação da iluminação natural às 9:00 horas

A análise qualitativa feita a partir da foto (figura 4.11) e da imagem sintética (figura 4.12), fornece subsídios para se verificar quão próximo da percepção humana é o resultado visual da simulação da iluminação natural nestes programas. Possibilita ainda a visualização da projeção da incidência da luz solar sobre as superfícies comparada à projeção real.

A simulação visual foi feita com o programa **Lightscape** porque retrata realisticamente as características visuais do ambiente. Os outros programas não geraram bons resultados visuais, sendo que o **Lumen Micro**, não permitiu representar o ambiente com a qualidade requerida, descrevendo-o como uma caixa retangular, não possibilitando a inclusão das grades na janela e das reentrâncias nas paredes, assim como a atribuição de alguns materiais às superfícies, como o espelho do nicho e o piso cerâmico.

O **Desktop Radiance 1.02**, apesar de utilizar o mesmo modelo simulado no **Lightscape**, não permite retratar com precisão os materiais existentes, assim como não possibilitou a interpretação das particularidades da geometria do modelo, gerando uma visualização totalmente diferente do ambiente real.



Figura 4.11 - Ambiente às 9:00 horas

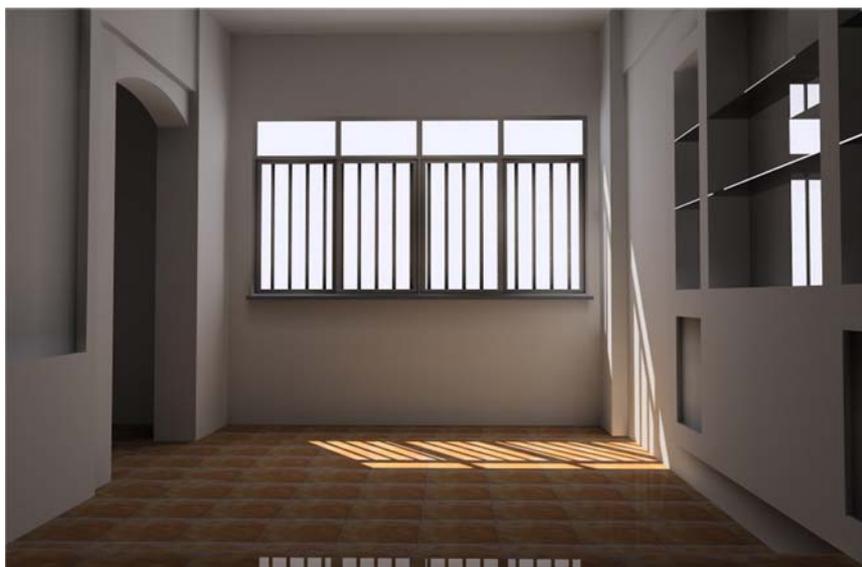


Figura 4.12 – Simulação da iluminação natural às 9:00 horas através do Lightscape

C - Uso integrado da iluminação natural e artificial

Neste estudo, foi construído o modelo geométrico de um ambiente existente cuja iluminação é feita somente com o uso de meios artificiais, que demanda gastos com energia. O estudo foi desenvolvido para verificar a possibilidade do uso da iluminação natural de forma integrada, para diminuir o consumo de energia elétrica e melhorar os níveis de conforto visual.

Para o desenvolvimento do experimento, foi escolhida uma sala de escritório, com área de 19,22 m² e pé direito de 2,67 m, abertura lateral com orientação de 50° SE e iluminação artificial promovida pelo uso de duas luminárias com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 40 W. As paredes e o teto são pintadas na cor branca, sendo o piso em cerâmica fosca na cor cinza, não havendo concentração de mobiliário (figura 4.13).

O teste foi feito no programa **Lightscape 3.2**, cujos recursos permitiram o cálculo da iluminação natural e artificial, utilizando o processo da iluminação global, onde são consideradas, além da incidência direta dos raios, as interreflexões ocorridas entre as várias superfícies. No programa, foram atribuídos os materiais ao modelo geométrico, especificadas as fontes luminosas e definidos os parâmetros de cálculo que incluem a orientação do modelo, a posição geográfica, as condições da abóbada celeste e o dia e

horário para a simulação. Este programa foi escolhido por retratar a geometria do modelo e possibilitar um estudo quantitativo e de percepção visual.

Através do método dos lúmens, chegou-se a conclusão de que o nível de iluminância estava baixo, menos de 500 lux para ambiente de escritório, segundo a NBR 5413 (1982).



Figura 4.13 – Simulação da situação existente

Foram calculadas alternativas de projeto para se chegar ao nível de iluminamento prescrito para o ambiente, e escolhida a opção de 3 luminárias Philips modelo TCH 751 com 2 lâmpadas fluorescentes modelo TLRS 40 W, com fluxo luminoso de 3250 lúmens, para se atingir o iluminamento necessário (figura 4.14).

Para o cálculo da iluminação natural, foi considerado o solstício de verão (22 de dezembro) e calculada a incidência solar, às 10:00 horas, com céu parcialmente encoberto, época de pior insolação para este ambiente.

No cálculo da iluminação natural pelo método das iluminâncias, encontrou-se o nível de iluminação médio dentro do que prescreve a norma NBR 5413. O valor médio não condiz com a situação real do ambiente, pois determinadas áreas são mais escuras que outras, havendo áreas com alto nível de iluminância devido à entrada direta dos raios solares.

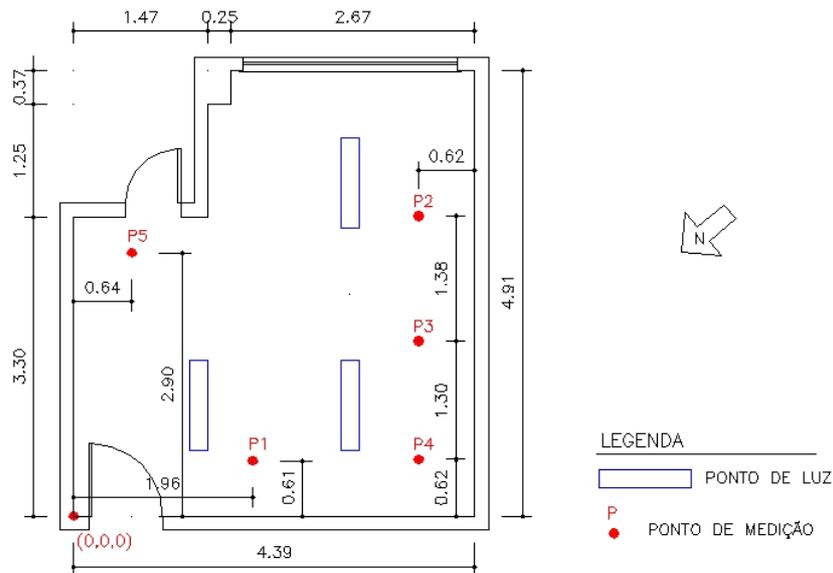


Figura 4.14 –Indicação das fontes de luz artificial e dos pontos de medição

Medições feitas no local, com o uso de um luxímetro, demonstram que existe uma diferença de iluminância, maiores nas áreas mais próximas à janela e menores nas áreas próximas à parede oposta à janela. Isso ocorre porque as aberturas laterais não geram uma distribuição uniforme em todo o ambiente, deixando algumas áreas mais iluminadas do que outras.

Devido a isso e ao fato do nível de iluminância proporcionado pela iluminação natural ser variável, provocando alterações na uniformidade e constância, em função do tipo de clima, condições da abóbada celeste e época do ano, é necessário o uso de uma iluminação complementar de forma a proporcionar níveis adequados de iluminação.

Em relação à incidência direta dos raios solares, é possível diminuir seus efeitos com o uso de elementos de redirecionamento, aproveitando a luz natural por meio das reflexões sobre estes elementos e da componente luminosa proveniente da abóbada celeste.

Foram simuladas, no programa **Lightscape**, 5 alternativas para avaliar o ambiente:

- Alternativa 1 - Ambiente conforme as condições atuais (figura 4.15)

O ambiente, nas suas condições atuais, utiliza a iluminação artificial durante todo o dia, não considerando os aspectos da iluminação natural. São utilizadas persianas na janela para evitar a incidência direta dos raios solares.



Figura 4.15 - Simulação da iluminação artificial existente

- Alternativa 2 - Iluminação artificial proposta (figura 4.16)

Considerando o uso da iluminação artificial, esta alternativa melhora os níveis de iluminamento, se comparado às condições existentes no local, e atinge o nível recomendado pela norma NBR 5413 (1982).



Figura 4.16 - Simulação da iluminação artificial proposta

- Alternativa 3 – Iluminação natural (figura 4.17)

Simulando a iluminação natural, em 22 de dezembro às 10:00 horas, percebe-se a incidência direta do sol, que aumenta a carga térmica e atinge a área de trabalho, sendo necessário o uso de um dispositivo de sombreamento e controle que diminui a incidência direta, os efeitos térmicos e aproveita as reflexões geradas.



Figura 4.17 - Simulação da iluminação natural às 10:00 horas

- Alternativa 4 - Iluminação natural e o uso de persiana (figura 4.18)

Optou-se pelo uso das persianas verticais posicionadas com um ângulo que impede a incidência direta dos raios solares, mas permite a contribuição da abóbada celeste para o cálculo do nível de iluminação do ambiente.

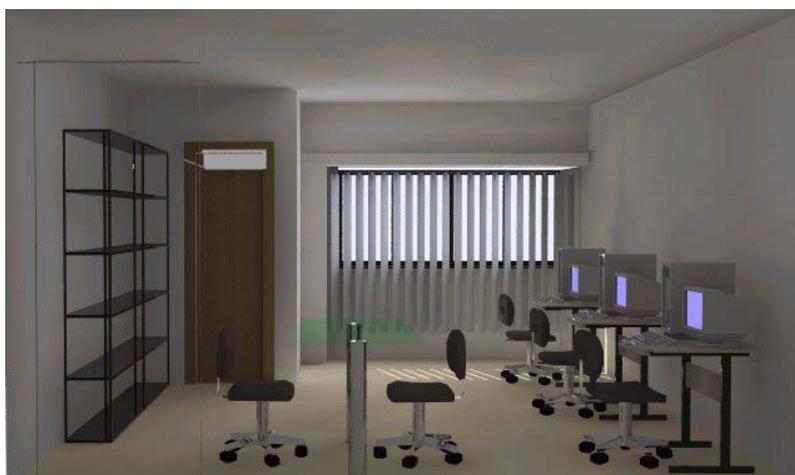


Figura 4.18 - Simulação da iluminação natural com uso de persianas

- Alternativa 5 - Iluminação natural e artificial – solução integrada (figura 4.19)

Foi simulada a alternativa do uso integrado da iluminação natural e artificial.



Figura 4.19 - Simulação da iluminação natural, com uso de persiana, integrada à iluminação artificial

A partir dos resultados das simulações para as 5 alternativas estudadas, foram determinados os níveis de iluminamento nos pontos pré-definidos, descritos na tabela 4.4 e no gráfico da figura 4.20, onde pode-se avaliar comparativamente os resultados obtidos.

Tabela 4.4 - Comparação dos níveis de iluminamento das várias alternativas, em lux

PONTOS	ALT. 1	ALT. 2	ALT. 3	ALT. 4	ALT. 5
1	538,64	957,71	1980,14	337,46	1109,58
2	331,22	710,45	2593,94	524,86	717,72
3	281,01	748,63	1673,04	289,53	773,95
4	316,29	696,51	1533,81	268,53	834,61
5	259,97	404,60	1252,02	183,12	436,80

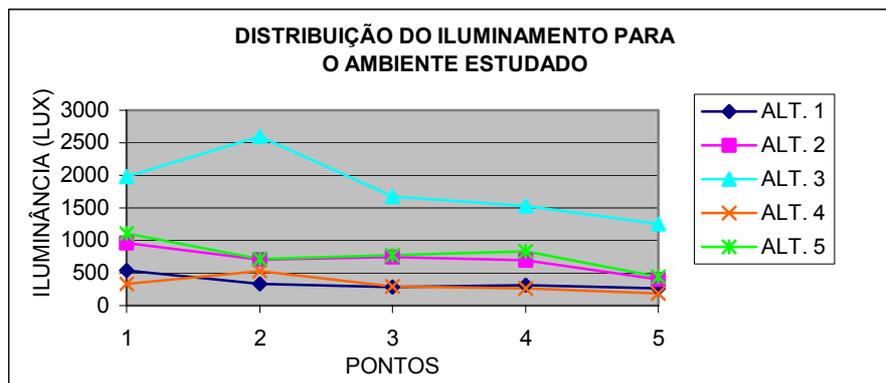


Figura 4.20 – Distribuição do iluminamento para o ambiente estudado

A simulação computacional permite especulações projetuais em arquitetura, sendo possível desenvolver uma solução sem modificações físicas desnecessárias no espaço, minimizando gastos e melhorando seu desempenho em relação à iluminação.

D - Modificação das dimensões e posicionamento das aberturas

No projeto de iluminação natural de interiores, além das condicionantes locais (clima, orientação, época do ano e hora do dia), outras variáveis interferem na quantidade e distribuição da luz natural no ambiente projetado, como a forma, o tamanho e o posicionamento das janelas, que influenciam na uniformidade da iluminação resultante e na incidência dos raios solares no interior do ambiente.

Para avaliar diversas opções, foram feitas simulações no programa **Lightscape**, onde foram modificadas as características das fachadas e simuladas as alternativas gerando as imagens para a visualização da proposta e os dados da distribuição luminosa para um *grid* especificado.

O modelo geométrico criado para esse estudo é uma sala de aula hipotética, onde as aberturas para iluminação estão localizadas em uma parede com orientação Norte, onde foram testadas alternativas de dimensionamento das aberturas para se obter a distribuição luminosa (figura 4.21).

O ambiente analisado possui 70,00 m² (10,00 x 7,00 m), pé direito de 3,00 metros, paredes e teto na cor branca, piso na cor bege, plano de trabalho a uma altura de 0,75 m,

em relação ao piso, e janelas transparentes, sem o caixilho. A influência do entorno foi desconsiderada no cálculo.

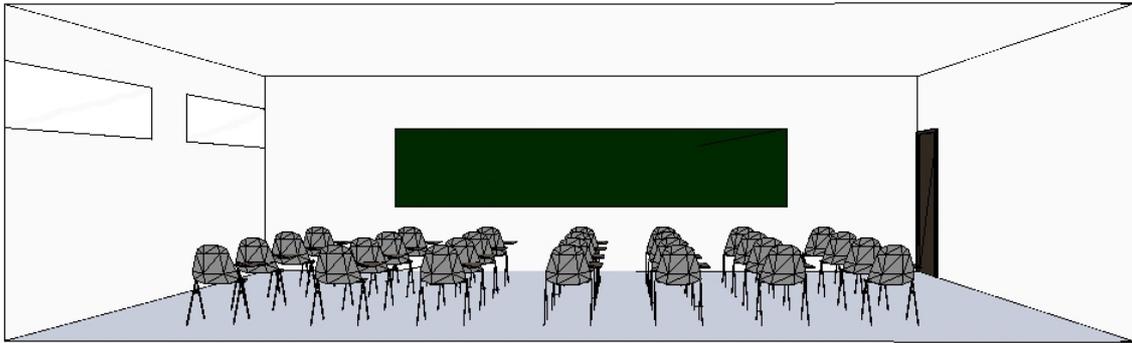


Figura 4.21 – Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

O nível de iluminância geral necessário para uma sala de leitura é 500 lux (NBR 5413, 1982). A simulação foi feita considerando o céu parcialmente nublado, em 01/05 (equinócio) às 9:00 e às 17:00 horas.

Foram verificados os níveis de iluminamento de pontos posicionados no plano de trabalho em 6 posições, conforme figura 4.22, gerando tabelas e gráficos comparativos para o ambiente usando a luz natural.

Para as situações em que não foram alcançados os níveis de iluminância necessários para a finalidade do local (sala de leitura), foi simulada a opção integrada de iluminação natural e artificial.

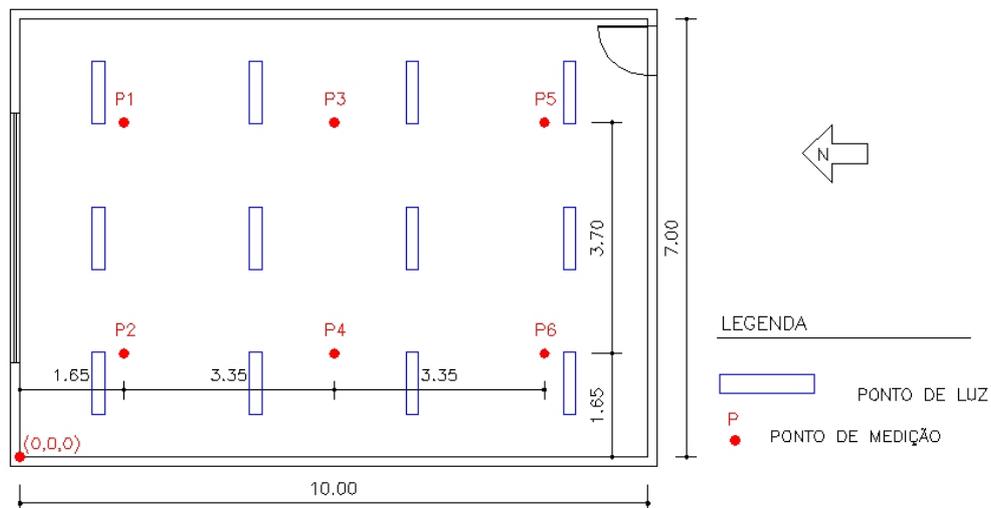


Figura 4.22 – Indicação das fontes de luz artificial e dos pontos de medição

Na simulação foram utilizadas as seguintes condições de projeto (figura 4.23):

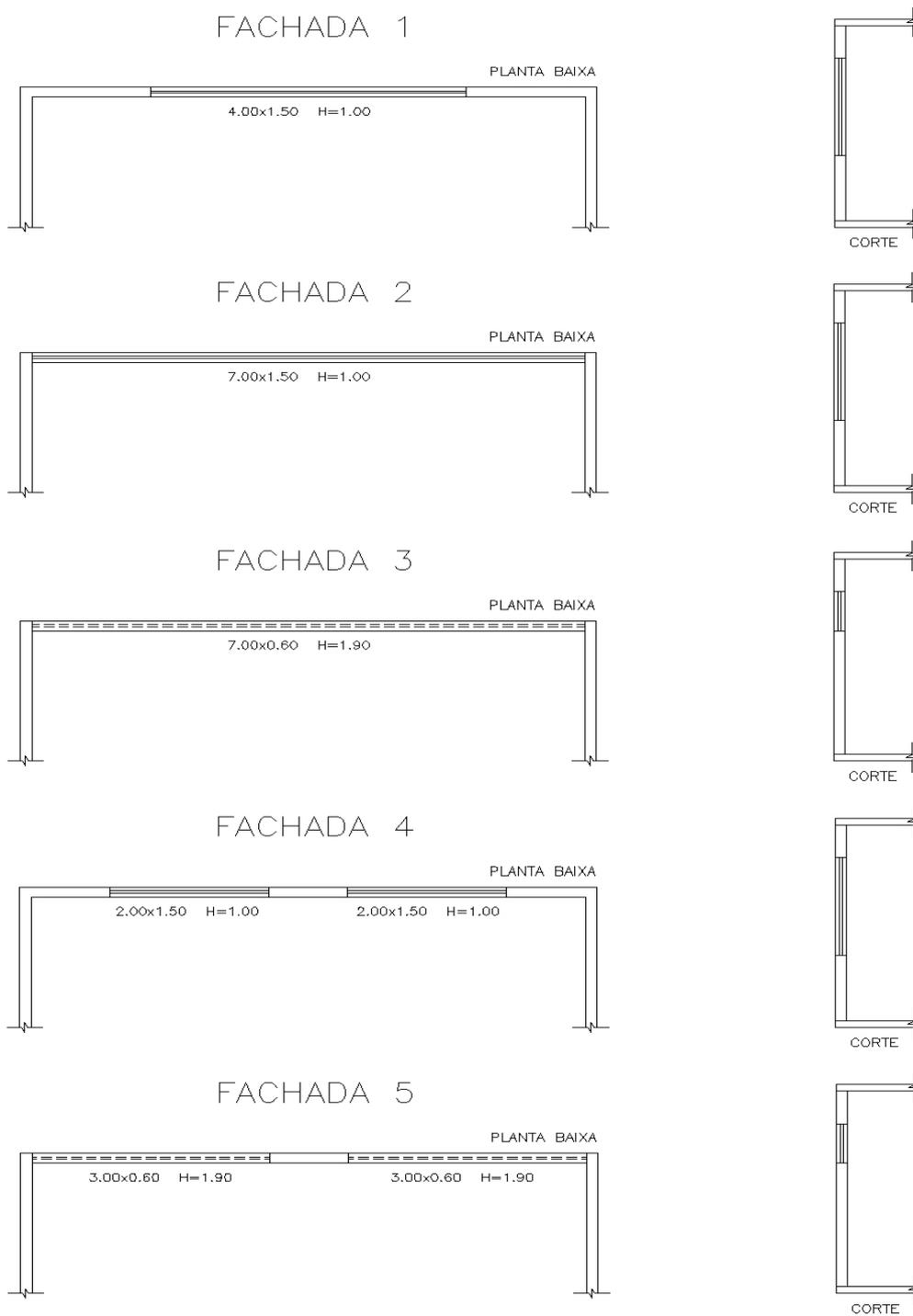


Figura 4.23 – Dimensões e distribuição das aberturas propostas no experimento

Com as simulações processadas chegou-se aos seguintes resultados para as cinco alternativas de fachada analisadas:

- Fachada 1 - uma janela com dimensões de 4,00 x 1,50 m e altura de peitoril de 1,00 m, centralizada na fachada, condição de posicionamento padrão em muitas construções (figuras 4.24 e 4.25). Esta opção causa uma alta incidência da luz solar direta sobre o ambiente atingindo o observador na altura do seu campo de visão podendo causar ofuscamento.



Figura 4.24 - Simulação da iluminação – Fachada 1 às 9:00 horas

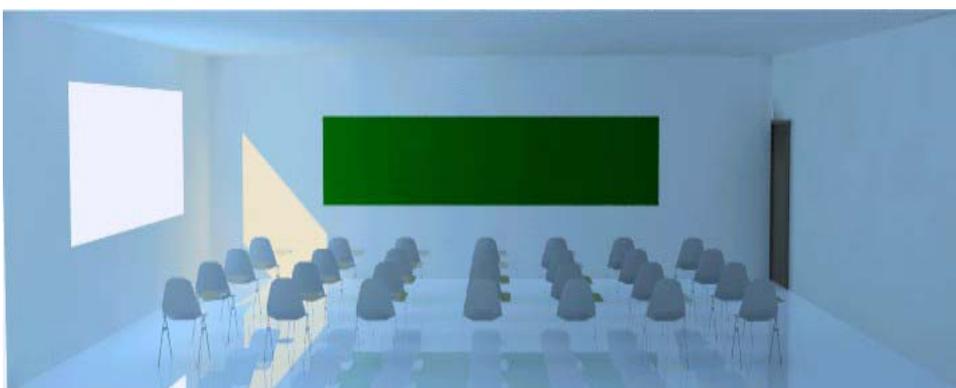


Figura 4.25 - Simulação da iluminação – Fachada 1 às 17:00 horas

- Fachada 2 – uma janela com dimensões de 7,00 x 1,50 m e altura de peitoril de 1,00 m, tomando toda a largura da parede na qual está posicionada, aumenta o nível de iluminação em todos os pontos, mas também cria uma área maior de incidência da luz solar direta sobre o plano de trabalho, atingindo o campo de visão do usuário, podendo causar ofuscamento (figuras 4.26 e 4.27). Este tipo de janela necessita do uso de elementos de redirecionamento para aproveitar a luz difusa, diminuindo a incidência direta dos raios.



Figura 4.26 - Simulação da iluminação – Fachada 2 às 9:00 horas

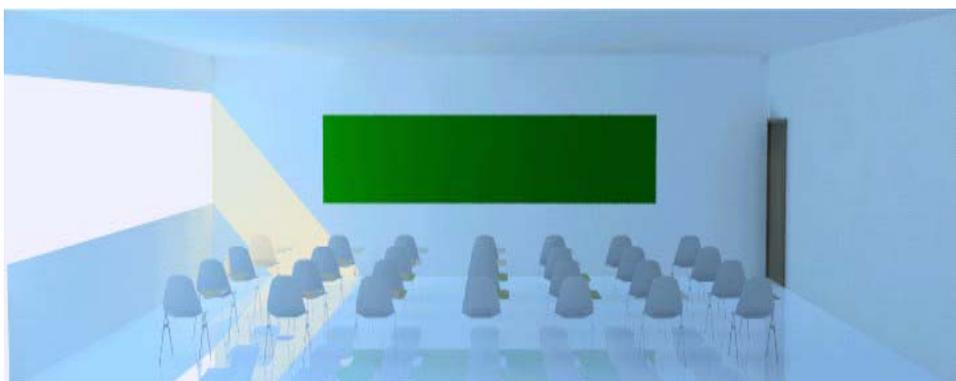


Figura 4.27 - Simulação da iluminação – Fachada 2 às 17:00 horas

- Fachada 3 - uma janela com dimensões de 7,00 x 0,60 m e altura de peitoril de 1,90 m, o que possibilita uma diminuição da luminância nas áreas próximas à janela, pois restringe a admissão da luz solar direta, melhora a uniformidade da iluminação no ambiente (figuras 4.28 e 4.29). Esta opção diminui o ofuscamento já que concentra a zona de máxima luminância acima do campo de visão do usuário.



Figura 4.28 - Simulação da iluminação – Fachada 3 às 9:00 horas



Figura 4.29 - Simulação da iluminação – Fachada 3 às 17:00 horas

- Fachada 4 - duas janelas com dimensões de 2,00 x 1,50 m e altura de peitoril de 1,00 m, posicionadas de forma simétrica, com áreas iguais, obtendo níveis de iluminação muito próximos à solução da fachada 1 com área equivalente (figuras 4.30 e 4.31). Causa os mesmos problemas analisados nas opções de fachada 1 e 2, sendo indicado o uso de elementos de redirecionamento para melhorar as condições de iluminação do ambiente.

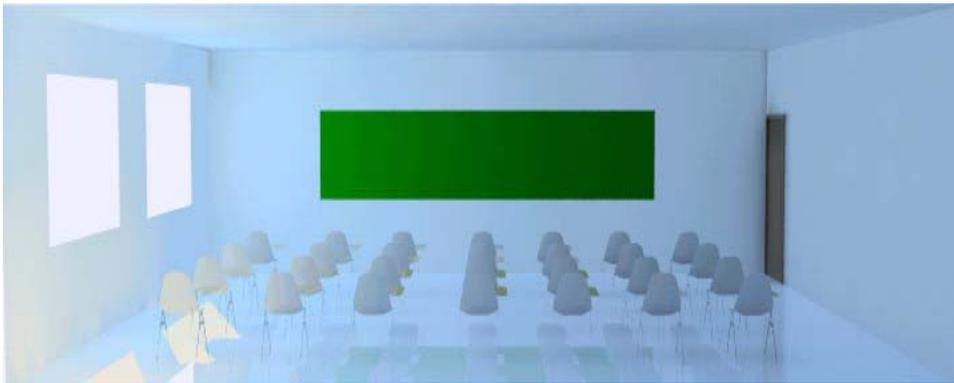


Figura 4.30 - Simulação da iluminação – Fachada 4 às 9:00 horas



Figura 4.31 - Simulação da iluminação – Fachada 4 às 17:00 horas

- Fachada 5 - duas janelas com dimensões de 3,00 x 0,60 m e altura de peitoril de 1,90 m, com área útil menor que a opção da fachada 3, mas possibilitando um nível de iluminamento muito próximo (figuras 4.32 e 4.33). Esta opção aumenta a uniformidade da iluminação do ambiente, porém diminui o iluminamento geral, necessitando de uma iluminação complementar para os horários quando o sol está mais baixo.

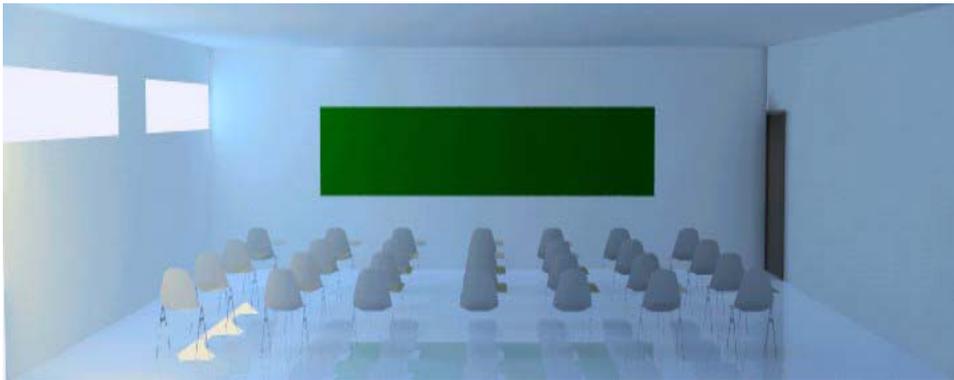


Figura 4.32 - Simulação da iluminação – Fachada 5 às 9:00 horas

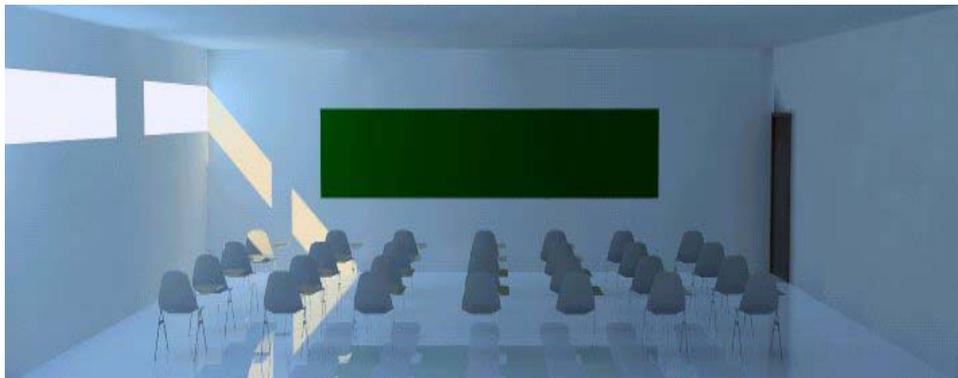


Figura 4.33 - Simulação da iluminação – Fachada 5 às 17:00 horas

Nas tabelas 4.5 e 4.6 estão os níveis de iluminamento encontrados nos pontos definidos para cada situação simulada, gerando os gráficos das figuras 4.34 e 4.35 onde estão as diferenças entre os iluminamentos nas diversas alternativas.

Tabela 4.5 – Valores de iluminância para a iluminação natural às 9:00 horas

PONTOS	FACHADA 1 (LUX)	FACHADA 2 (LUX)	FACHADA 3 (LUX)	FACHADA 4 (LUX)	FACHADA 5 (LUX)
1	2729,95	4400,96	1910,62	2954,98	1771,75
2	9303,26	10758,23	7766,33	9243,12	7478,79
3	1454,16	2135,01	1028,50	1443,60	908,41
4	1729,36	2426,44	1142,32	1658,75	998,30
5	1042,35	1456,76	715,93	1025,95	645,75
6	1134,02	1562,26	760,24	1099,31	668,37

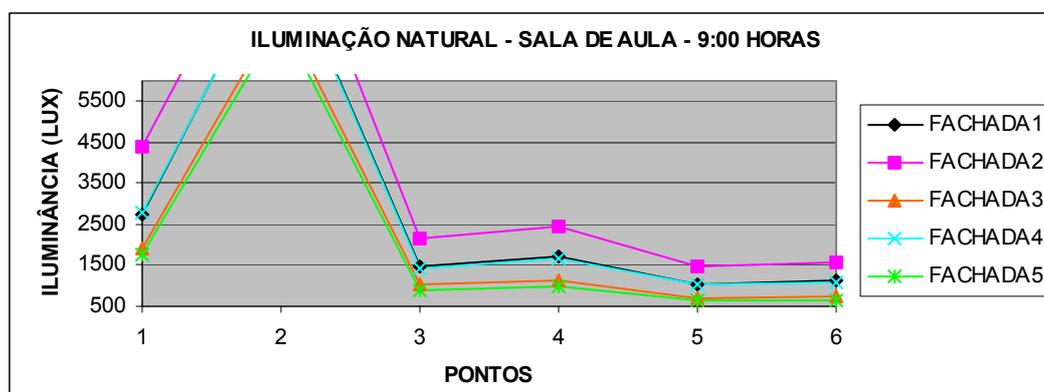


Figura 4.34 – Iluminação natural às 9:00 horas

Tabela 4.6 – Valores de iluminância para a iluminação natural às 17:00 horas

PONTOS	FACHADA 1 (LUX)	FACHADA 2 (LUX)	FACHADA 3 (LUX)	FACHADA 4 (LUX)	FACHADA 5 (LUX)
1	2246,15	5962,36	1503,78	3568,89	1336,20
2	1815,90	2728,57	1112,86	1832,77	957,45
3	1034,95	1592,62	719,71	997,40	621,87
4	1033,31	1571,47	698,21	985,06	605,56
5	678,41	1048,23	460,12	629,49	416,63
6	690,70	1047,41	464,12	652,91	414,55

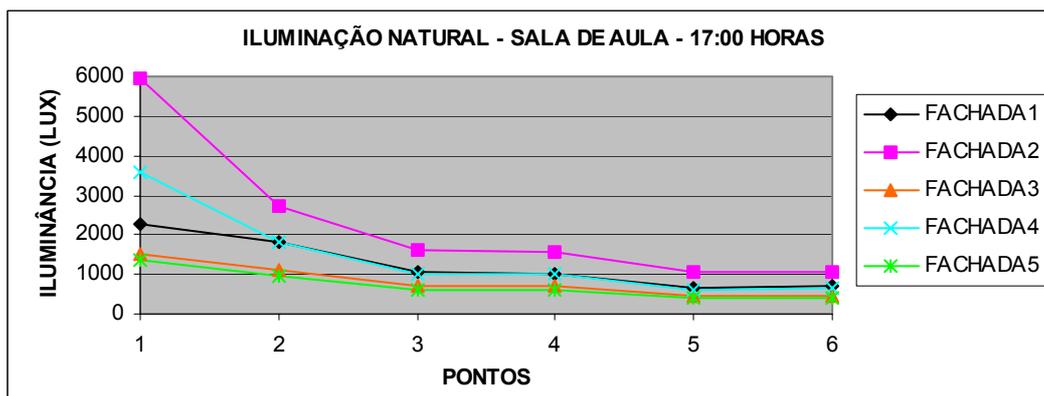


Figura 4.35 Iluminação natural às 17:00 horas

Como se percebe, às 17:00 horas, as opções de fachada 3 e 5 geraram um baixo nível de iluminância nos pontos 5 e 6, necessitando o uso de uma iluminação artificial complementar. Para isso, foi ligada apenas a primeira linha de luminárias do projeto de iluminação artificial de forma a simular seus efeitos e verificar o resultado do seu uso conjunto com a iluminação natural, que pode ser verificado através da tabela 4.7 e da figura 4.36.

Tabela 4.7 – Comparativo entre a simulação da iluminação natural às 17:00 horas e a solução integrada no mesmo horário

PONTOS	FACHADA 3 (LUX)	FACHADA 3 INTEGRADA (LUX)	FACHADA 5 (LUX)	FACHADA 5 INTEGRADA (LUX)
1	1503,78	1767,78	1336,20	1579,82
2	1112,86	1373,10	957,45	1203,51
3	719,71	1112,50	621,87	1020,05
4	698,21	1110,48	605,56	1019,82
5	460,12	1258,63	416,63	1192,81
6	464,12	1260,39	414,55	1192,12

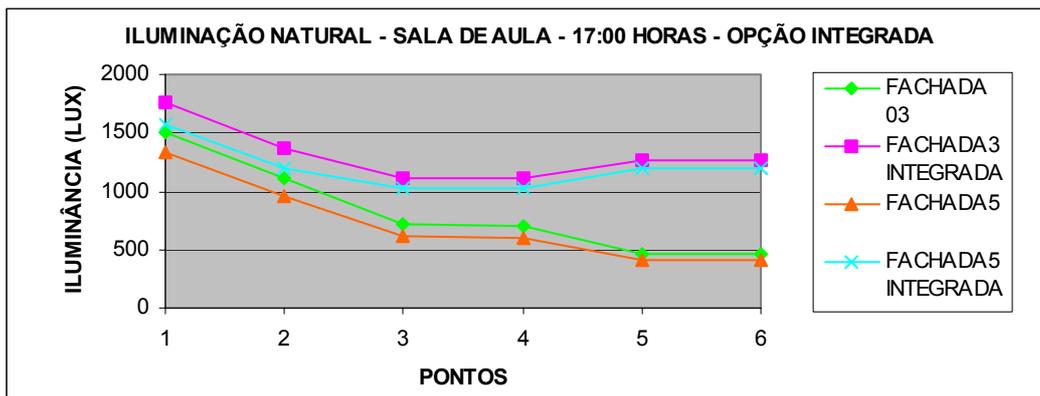


Figura 4.36 - Simulação da iluminação natural às 17:00 horas e a solução integrada no mesmo horário

As imagens geradas mostram a iluminação, às 17:00 horas, com a luz natural e com a solução integrada (figuras 4.37 e 4.38).

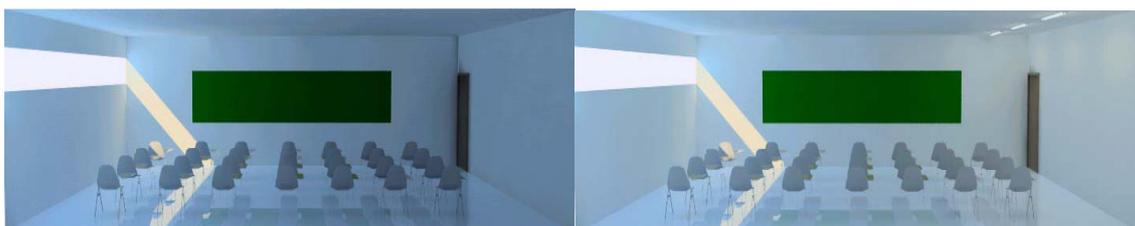


Figura 4.37 – Imagens simuladas da iluminação natural da fachada 3 às 17:00 horas e a solução integrada de iluminação artificial e natural no mesmo horário, respectivamente

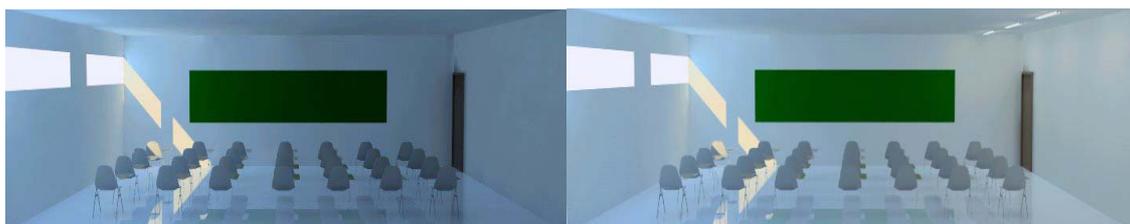


Figura 4.38 – Imagens simuladas da iluminação natural da fachada 5 às 17:00 horas e a solução integrada de iluminação artificial e natural no mesmo horário, respectivamente

Para a iluminação natural de interiores, a janela pode ser considerada como uma fonte de luz primária, já que todas as superfícies do ambiente irão refletir a luz que passa através dela, sendo que a quantidade de luz natural incidente no interior de um ambiente está relacionada com a área livre de janela disponível e seu posicionamento.

Com base nisto, os experimentos apresentados, avaliaram a relação nível de iluminação e dimensões das janelas, influenciando a quantidade e distribuição da iluminação natural.

As alternativas simuladas com o **Lightscape** possibilitam, a partir dos valores de iluminação para pontos definidos, a visualização dos mesmos, favorecendo a escolha da alternativa mais adequada para a solução do problema proposto.

Em relação à geração de imagens, percebe-se problemas na qualidade. A visualização do ambiente simulado não é precisa e coerente, apresentando uma imagem saturada em tom de azul, que não corresponde à percepção visual de um espaço com os atributos dos materiais que foram especificados. Isso provavelmente ocorreu devido ao cálculo da luminância das superfícies refletoras, que considera as mesmas refletindo a luz impregnada da cor original da superfície, no caso específico, a cor do piso.

E - Aberturas laterais e zenitais

O projetista ao definir soluções para o projeto de iluminação natural se confronta com alguns problemas que influenciam diretamente no nível de conforto visual e térmico do ambiente. Dentre esses problemas, podemos destacar o sistema de aberturas a ser utilizado e suas implicações na intensidade e na uniformidade do iluminação resultante.

Para avaliar as possíveis soluções para esse problema, foram feitas simulações, no **Lightscape**, onde o modelo geométrico do ambiente foi analisado segundo os resultados quantitativos decorrentes da mudança no sistema de iluminação utilizado, lateral ou zenital, e o uso de elementos de redirecionamento para diminuir a incidência direta dos raios solares. Foi testada a mudança nas dimensões do ambiente de modo a investigar quais as conseqüências decorrentes para o nível de iluminação resultante.

O ambiente, uma carpintaria, cujo iluminação necessário é de 500 lux, possui 32,00 m² (8,00 x 4,00 m), pé direito de 5,00 metros, paredes e teto na cor branca, piso na cor cinza e o plano de trabalho a uma altura de 0,75 m, em relação ao piso. As aberturas possuem fechamento em vidro transparente, orientadas para o Oeste (figura 4.39). A iluminação natural foi simulada em 21 de dezembro (verão), às 15:00 horas, sob

condições de céu claro. Foram verificados os níveis de iluminação em 12 pontos posicionados no plano de trabalho, conforme figura 4.40.

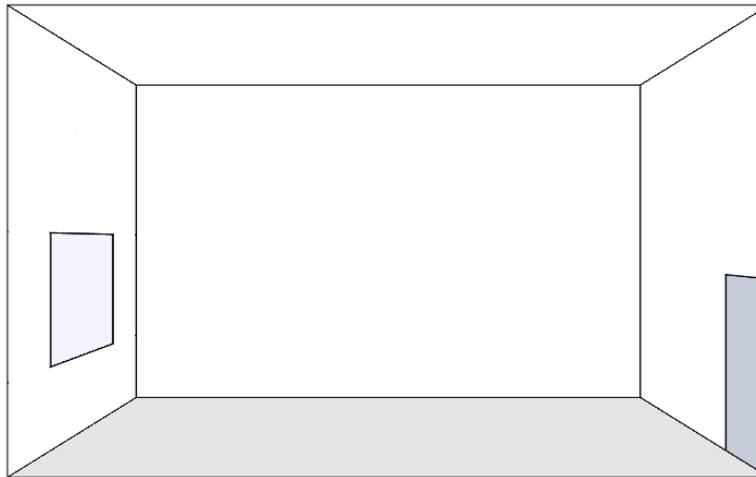


Figura 4.39 - Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

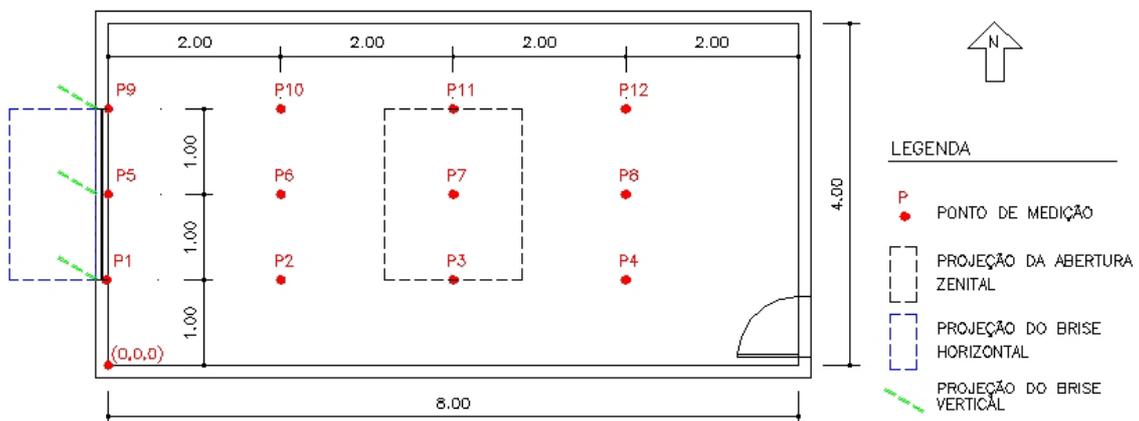


Figura 4.40 - Posicionamento dos pontos de medição dos níveis de iluminância

As seguintes alternativas foram analisadas:

- Alternativa 1 – abertura lateral de 2,00 x 1,60 m, $h = 1,00$ m, com as dimensões originais do ambiente;

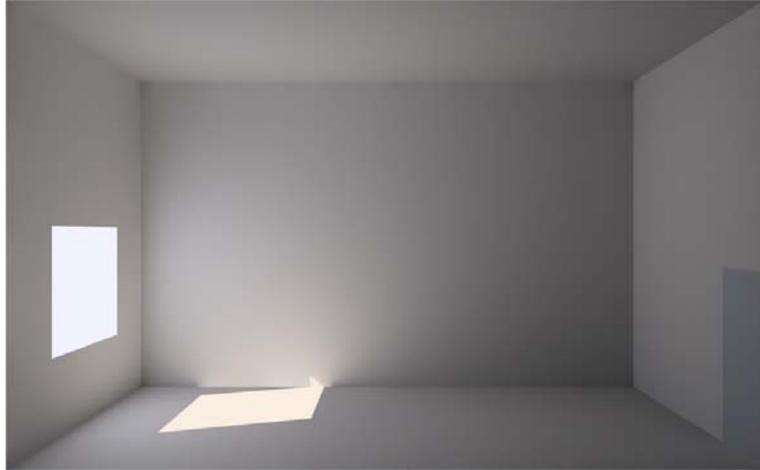


Figura 4.41 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 1

- Alternativa 2 – abertura lateral de 2,00 x 1,60 m, $h = 1,00$ m, modificando a comprimento do ambiente para 6,00 m;

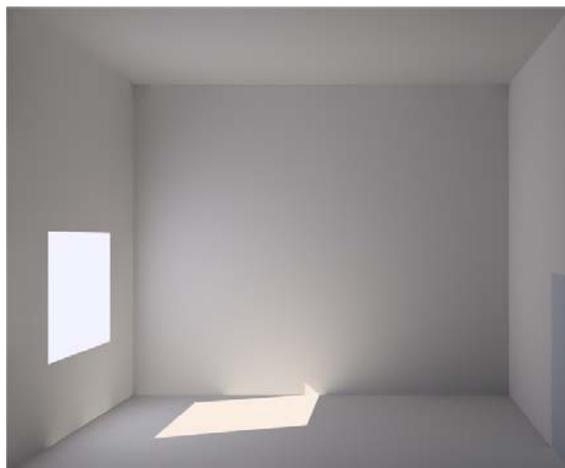


Figura 4.42 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 2

- Alternativa 3 – abertura lateral de 2,00 x 1,60 m, h = 1,00 m, com utilização de brise horizontal;

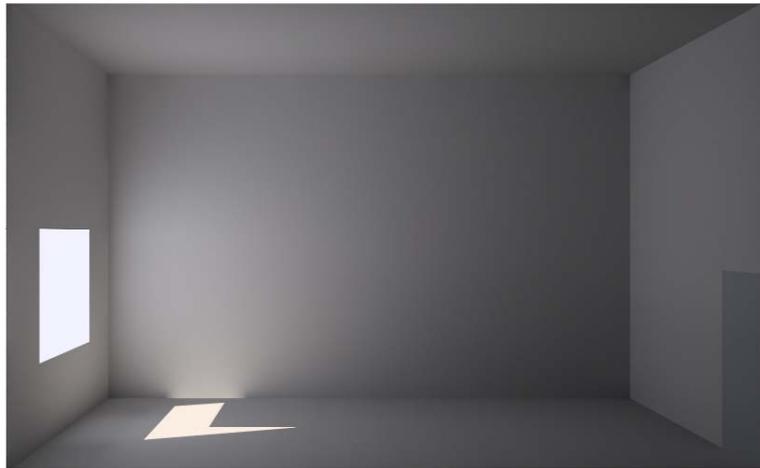


Figura 4.43 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 3

- Alternativa 4 – abertura lateral de 2,00 x 1,60 m, h = 1,00 m, com utilização de um *lightshef*;

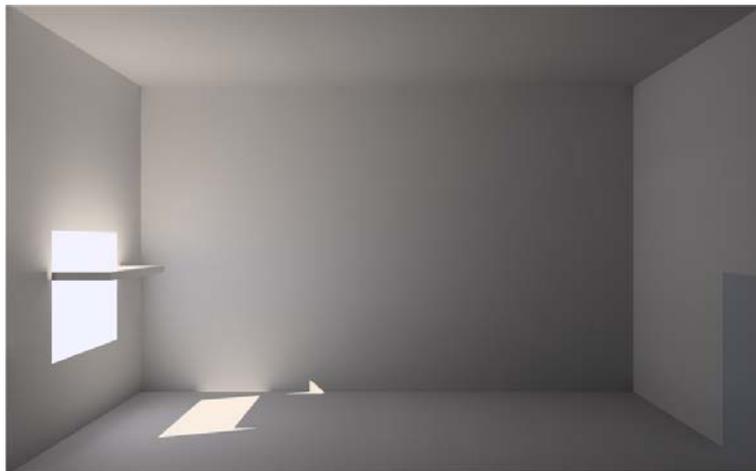


Figura 4.44 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 4

- Alternativa 5 – abertura zenital de 2,00 x 1,60 m, tipo 1 (superfície horizontal), ambiente com pé direito de 5,00 m;

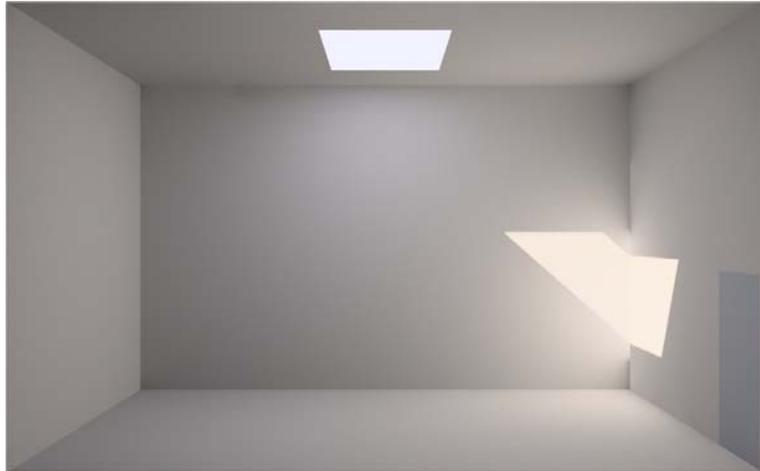


Figura 4.45 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 5

- Alternativa 6 – abertura zenital de 2,00 x 1,60 m, tipo 1 (superfície horizontal), ambiente com redução do pé direito para 3,00 m;



Figura 4.46 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 6

- Alternativa 7 – duas aberturas zenitais horizontais de 2,00 x 1,60 m;

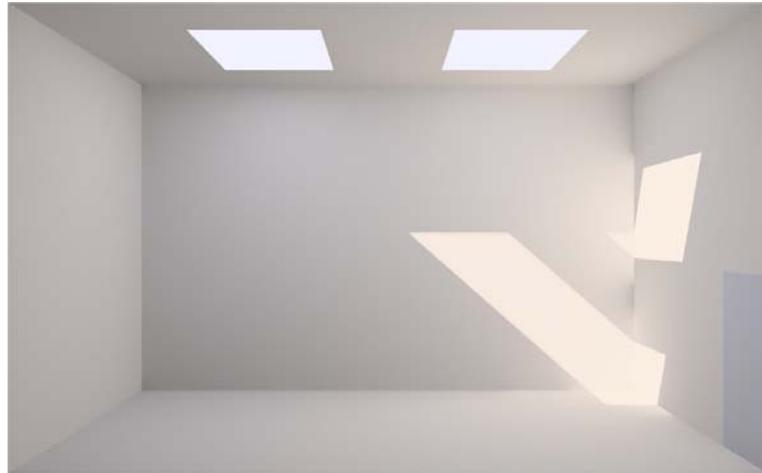


Figura 4.47 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 7

- Alternativa 8 – abertura zenital de 2,00 x 1,60 m, tipo *shed*, ambiente com pé direito de 5,00 m;

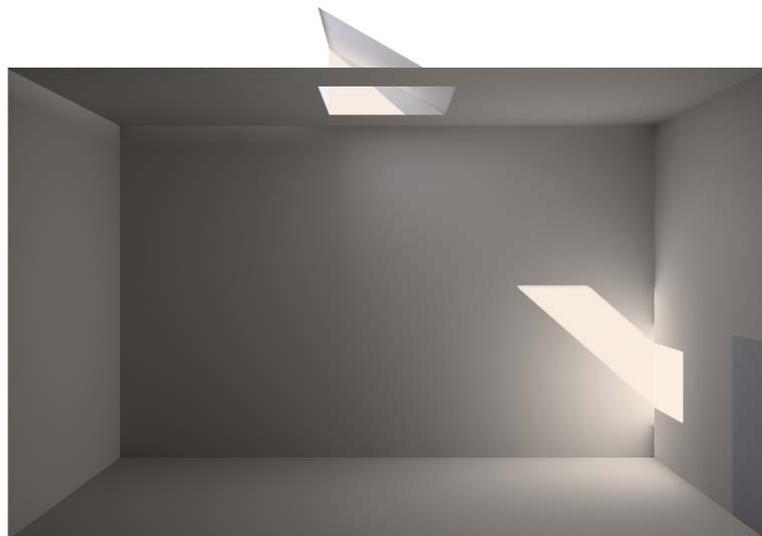


Figura 4.48 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 8

- Alternativa 09 – uso conjunto de iluminação lateral e zenital.

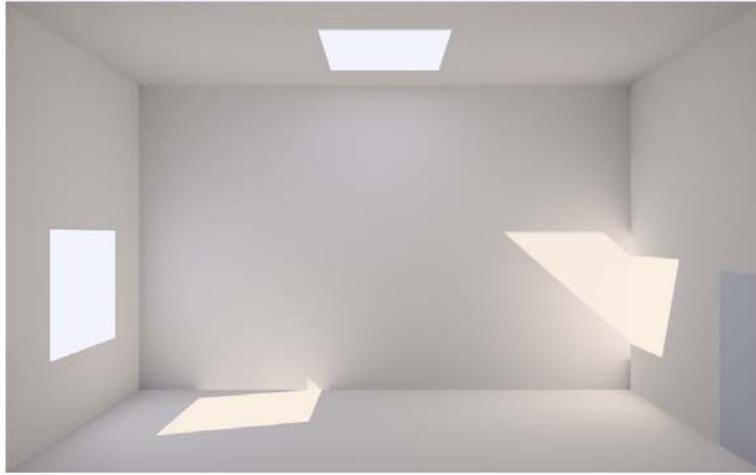


Figura 4.49 - Simulação da iluminação natural – Alternativa 9

Com base na análise da figura 4.50, podemos concluir que, para o caso das aberturas laterais, a redução da profundidade do ambiente (alternativa 2) gerou um acréscimo no nível de iluminamento, e a maior parcela de intensidade que chega à parede do fundo influencia na parcela da iluminação refletida no ambiente, principalmente nos pontos P4, P8 e P12, onde a variação foi maior. Isso ocorre porque o nível de iluminação lateral decresce com o aumento da distância em relação à abertura, ou seja, quanto menor a profundidade do ambiente, maior o nível de iluminamento na parede oposta à janela.

Em relação ao uso de elementos sombreadores (alternativa 3), o brise horizontal possibilitou a redução no nível de iluminamento do ambiente e na incidência direta dos raios solares.

A utilização do dispositivo de controle da luz solar, o *lightshelf* (alternativa 4), permitiu reduzir a incidência direta dos raios solares, bem como aumentou o nível de distribuição luminosa nos pontos P1, P5 e P9, próximos à janela, devido a reflexão ocasionada pelo elemento. Em relação aos pontos mais afastados da janela, para a orientação e horário simulado, houve uma redução na iluminação, não satisfazendo a função desse elemento de controle, que é o de aumentar os níveis nestes pontos devido à reflexão no teto.

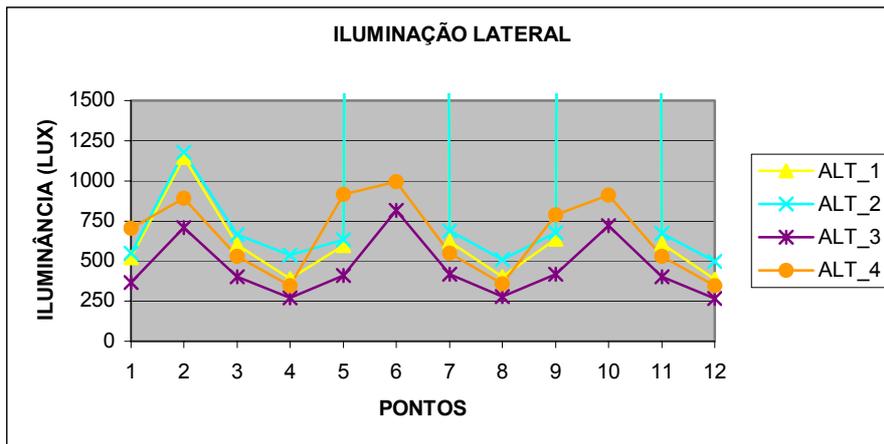


Figura 4.50 – Alternativas com abertura lateral

O gráfico 4.51, referente às alternativas para a iluminação zenital, permite inferir que o uso do pé direito alto (alternativa 5) possibilitou uma maior uniformidade luminosa ao ambiente, e o aumento do número de aberturas (alternativa 7), com mesma área da alternativa 5 e distribuídas de forma centralizada no ambiente, trouxe modificações significativas para o nível de iluminamento resultante. O tipo de abertura utilizado, horizontal e *shed*, influenciou no iluminamento do ambiente, sendo que o *shed* (alternativa 8) proporcionou uma redução maior na distribuição de iluminação devido à diminuição da área iluminante e inclinação da superfície refletora.

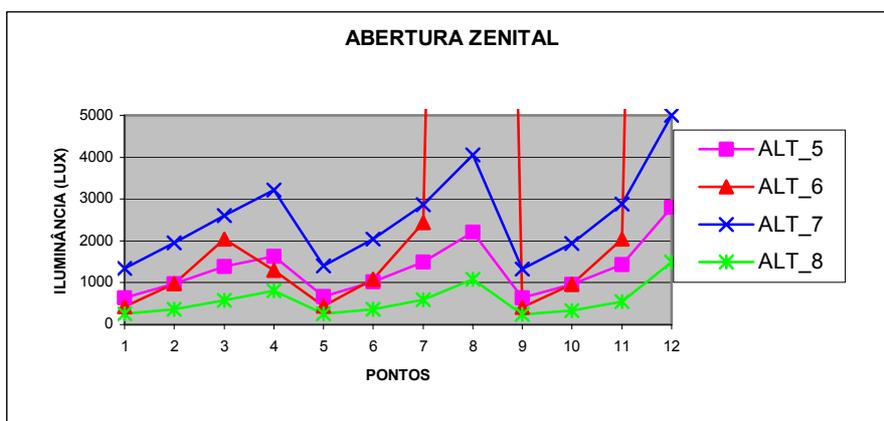


Figura 4.51 – Alternativas com abertura zenital

No que pese à diferenciação do nível de distribuição luminosa dos três sistemas de iluminação natural (figura 4.52), a iluminação zenital (alternativa 5) se mostrou mais efetiva que a iluminação lateral (alternativa 1) e o sistema combinado (alternativa 9) gerou acréscimo no nível de distribuição luminosa, principalmente nos pontos próximos à parede oposta à janela, contribuindo para uniformizar a luminosidade do ambiente.

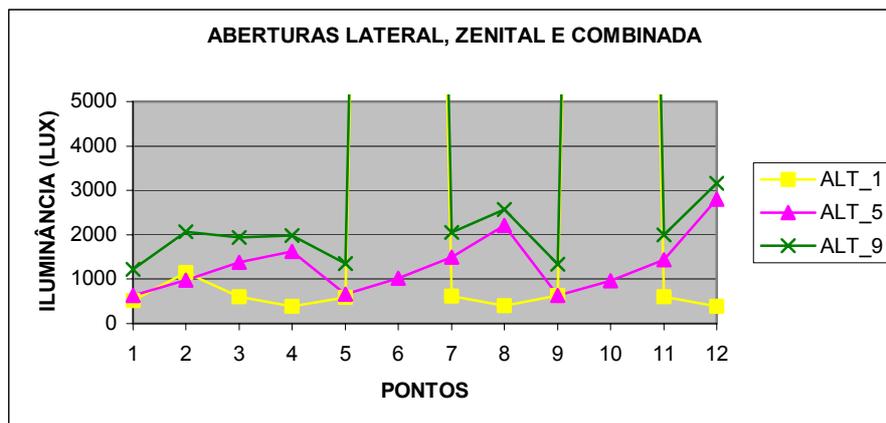


Figura 4.52 –Abertura lateral, zenital e combinada

É importante salientar que os pontos do gráfico que tiveram iluminância alta devido à incidência direta dos raios solares não foram representados de modo a permitir uma escala que destacassem as variações ocorridas nos demais pontos.

F - Simulação da iluminação natural e artificial nos 3 programas avaliados

Para comparar os três programas estudados, foi simulada a iluminação natural e artificial de um ambiente usado como escritório numa residência, o qual deveria ter um nível luminoso de 300 lux na mesa de trabalho e uma distribuição luminosa uniforme para melhor desempenho das atividades.

A sala possui 9,00 m² (3,00 x 3,00 m), pé direito a 2,60 m, plano de trabalho a 0,75 m, com nível de iluminação geral de 150 lux, e de 300 lux, na mesa de trabalho (figura 4.53). As paredes são pintadas na cor creme, o teto e o piso na cor branca. O ambiente possui uma janela com orientação 30° NE e a iluminação artificial é feita através de uma luminária com duas lâmpadas fluorescentes tubulares, com fluxo luminoso de 3150 lúmens cada. A iluminação natural foi simulada para as datas de 21 de março, 22 de

junho e 22 de dezembro, às 9:00 horas, de forma a verificar a incidência da luz solar nas diferentes épocas do ano sob céu claro.

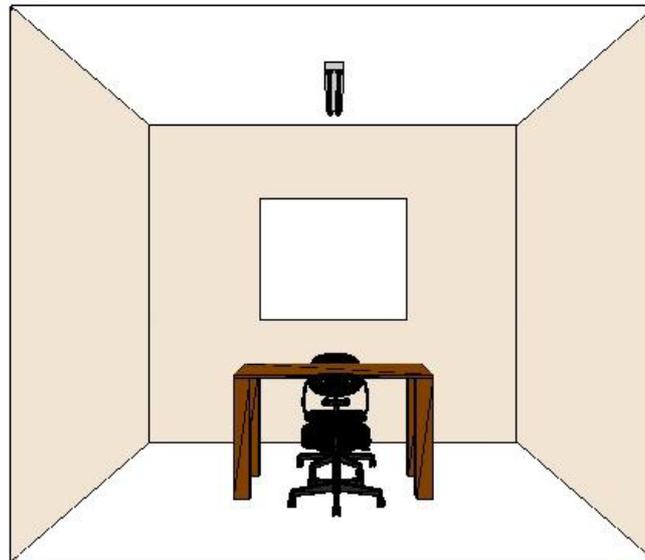


Figura 4.53 – Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

Foram feitos os cálculos dos níveis de iluminação artificial, através do método dos lúmens e das cavidades zonais, e para o projeto de iluminação natural, através do cálculo das iluminâncias.

Com o cálculo, foi verificado um iluminamento médio de 268,80 lux para o ambiente iluminado artificialmente e de 1515,27 lux com iluminação natural, sendo que no ponto P5, sobre a mesa, foi calculado nível de iluminamento, através do método do ponto por ponto, tendo como resultado o valor de 265,77 lux.

A verificação dos níveis de iluminação para as diversas situações foi feita em 9 pontos, situados conforme a figura 4.54, na altura do plano de trabalho, a 0,75 m do piso do cômodo.

Com as simulações executadas nos programas, obteve-se os resultados possíveis para cada aplicativo em particular, tentando-se retratar o ambiente de forma semelhante em todos os programas.

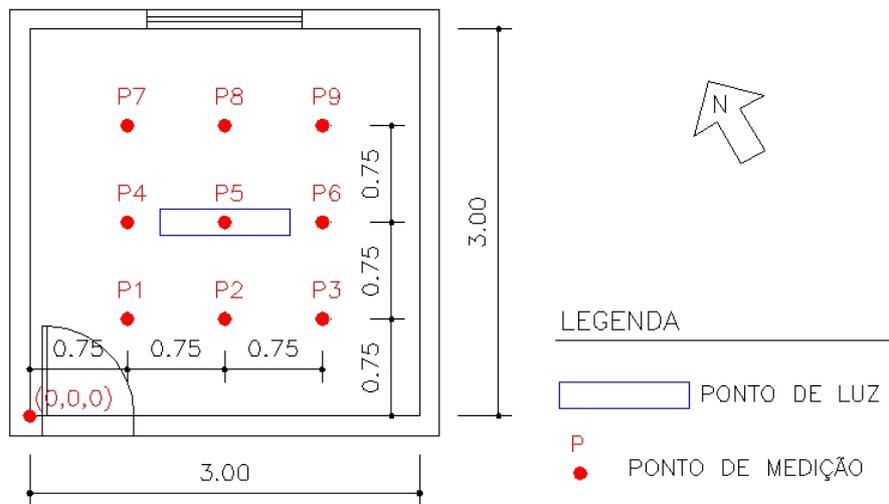


Figura 4.54 –Indicação dos pontos de medição da iluminação natural e artificial

Para a avaliação quantitativa, as três ferramentas disponibilizaram a utilização de um *grid* de pontos para a determinação das iluminâncias, cujos valores estão nas tabelas 4.8 e 4.9 para a iluminação natural e artificial, respectivamente.

Tabela 4.8 – Valores de iluminância na simulação da luz artificial

PONTOS	LUMEN MICRO (LUX)	LIGHTSCAPE (LUX)	DESKTOP RADIANCE (LUX)
1	427,70	444,83	191,66
2	458,20	507,01	201,29
3	445,60	477,58	206,96
4	464,40	498,35	199,20
5	521,20	578,35	197,26
6	471,10	511,24	202,27
7	426,40	445,84	191,64
8	420,50	464,87	179,48
9	429,20	452,83	194,16

Tabela 4.9 – Valores de iluminância na simulação da luz natural
21 de março as 9:00 horas

PONTOS	LUMEN MICRO (LUX)	LIGHTSCAPE (LUX)	DESKTOP RADIANCE (LUX)
1	4128,00	3489,60	1030,76
2	3472,00	3324,31	854,34
3	4134,00	3477,91	750,49
4	4864,00	4194,46	1434,81
5	4270,00	4121,07	1282,69
6	4364,00	3846,48	1023,92
7	62443,00	69657,00	45268,17
8	6306,00	4694,49	1958,09
9	4640,00	4231,68	1202,99

Com esses valores, foi possível analisar os níveis encontrados para os mesmos pontos e comparar os resultados dos três programas entre si e em relação ao cálculo tradicional. Esses valores foram também reunidos em gráficos (figuras 4.55 e 4.56) para melhor discussão dos resultados encontrados.

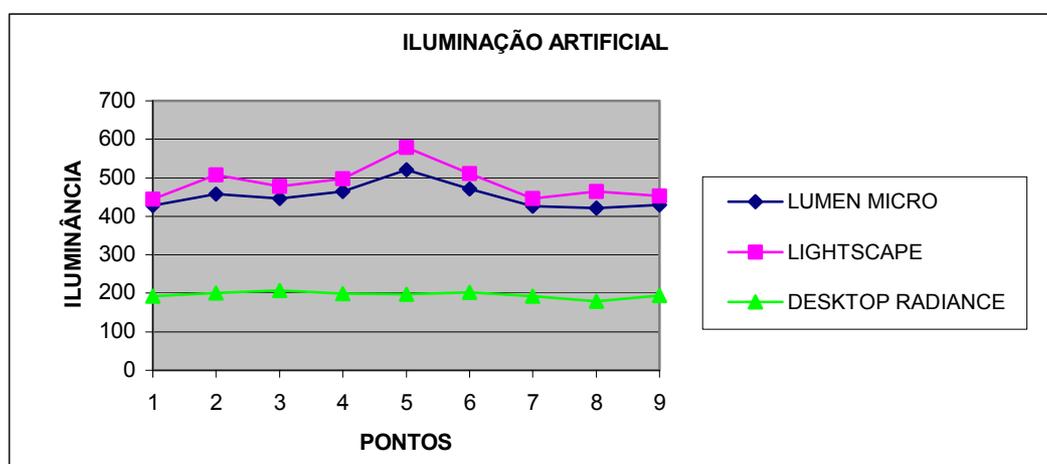


Figura 4.55 –Valores de iluminância na simulação da luz artificial

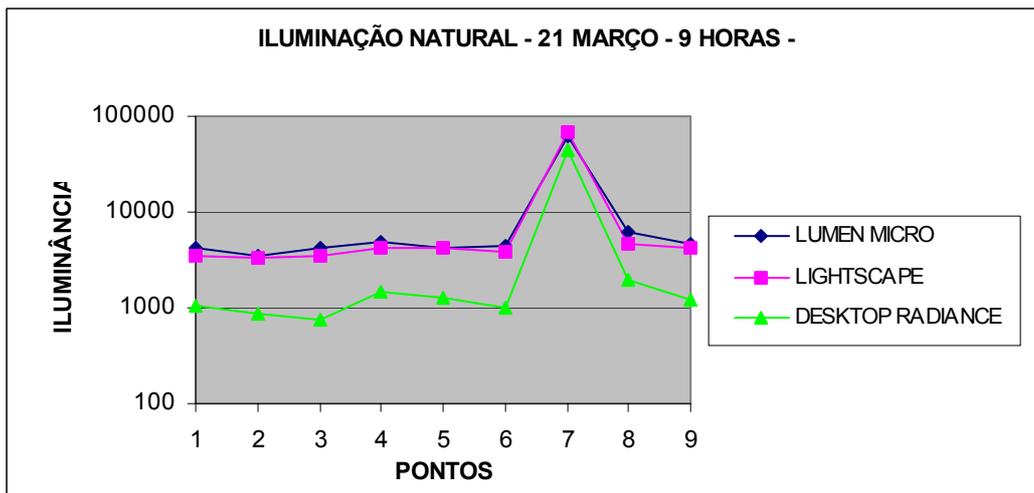


Figura 4.56 – Valores de iluminância na simulação da luz natural

Como ferramenta de análise quantitativa, os programas permitem a obtenção dos valores numéricos para pontos do ambiente, mas os representam de forma variada:

O **Lightscape** permitiu obter valores de iluminância em um *grid* de pontos definidos pela sua posição de origem e espaçamento para as superfícies selecionadas, posicionado a altura do plano de trabalho (figura 4.57).

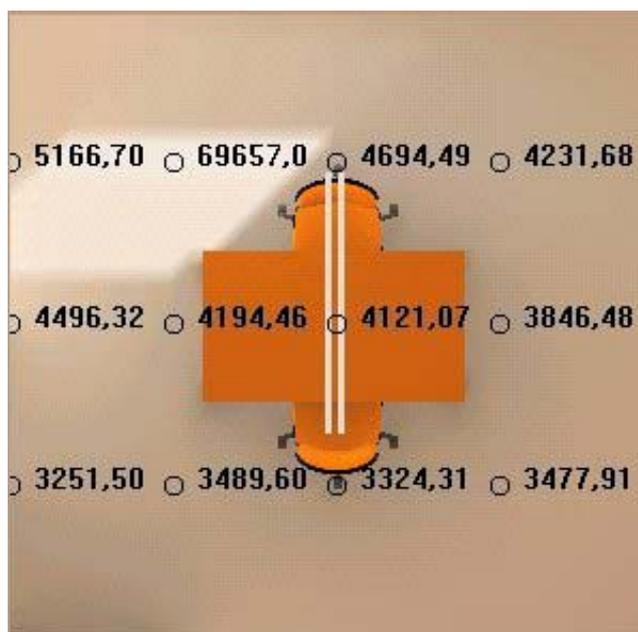


Figura 4.57 – Vista em planta do modelo com indicação do *grid* de análise

Para uma visualização da distribuição luminosa, o programa forneceu também a técnica de falsa cor que descreveu a distribuição em termos de iluminância numa escala linear, através de uma gradação de cores do vermelho para o azul e em tons de cinza (figuras 4.58 e 4.59).

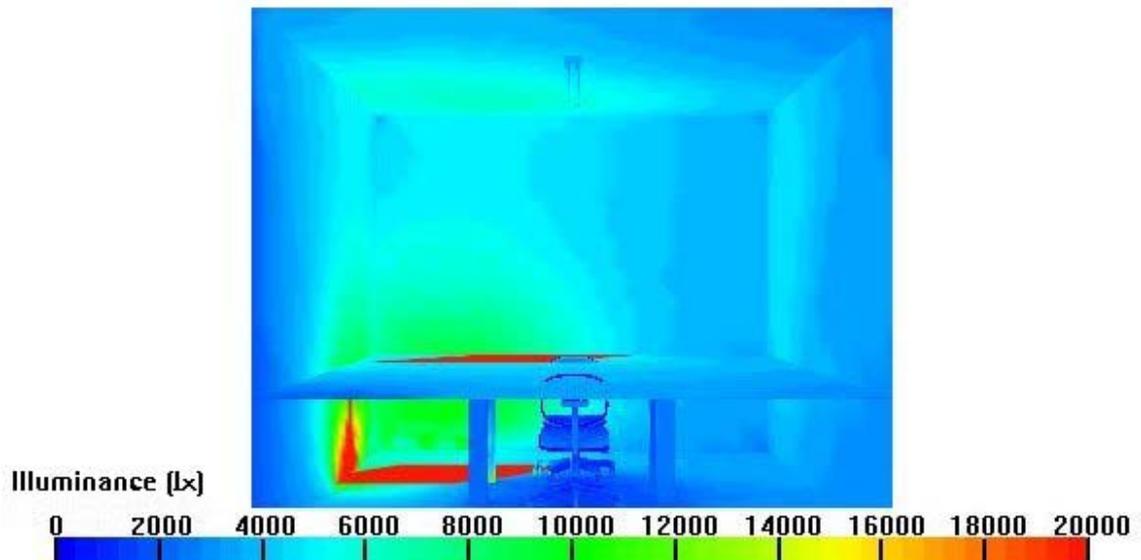


Figura 4.58 – Simulação da distribuição luminosa em falsa cor

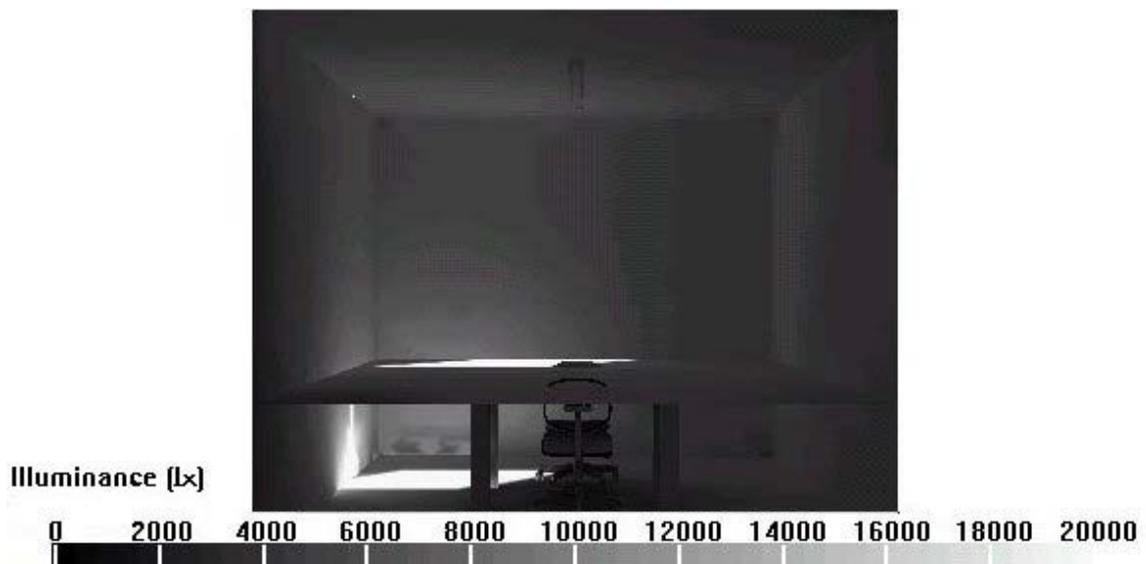


Figura 4.59 – Simulação da distribuição luminosa em escala de cinza

O **Lumen Micro** disponibilizou os resultados através de uma tabela de valores de iluminância referente ao *grid* definido antes da simulação (figura 4.60) e, graficamente, através de curvas isolux (figura 4.61).

Grid Name: Whole Room Horizontal Grid	Grid Origin: (0.00, 0.00)	Grid Surface: n/a			
Grid Type: Horizontal Illuminance	Grid Orient:	Grid Hinge: 0			
Grid Units: Lux	Grid Elev.: 0.75	Grid Azimuth: 0			
0.00	0.75	1.50	2.25	3.00	
3.00	164.0	265.9	275.6	267.0	164.8
2.25	253.7	426.4	420.5	429.2	256.3
1.50	262.6	464.4	521.2	471.1	268.5
0.75	244.8	427.7	458.2	445.6	259.4
0.00	158.4	256.3	291.5	271.2	164.2

Figura 4.60 – Valores de iluminância para o ambiente simulado

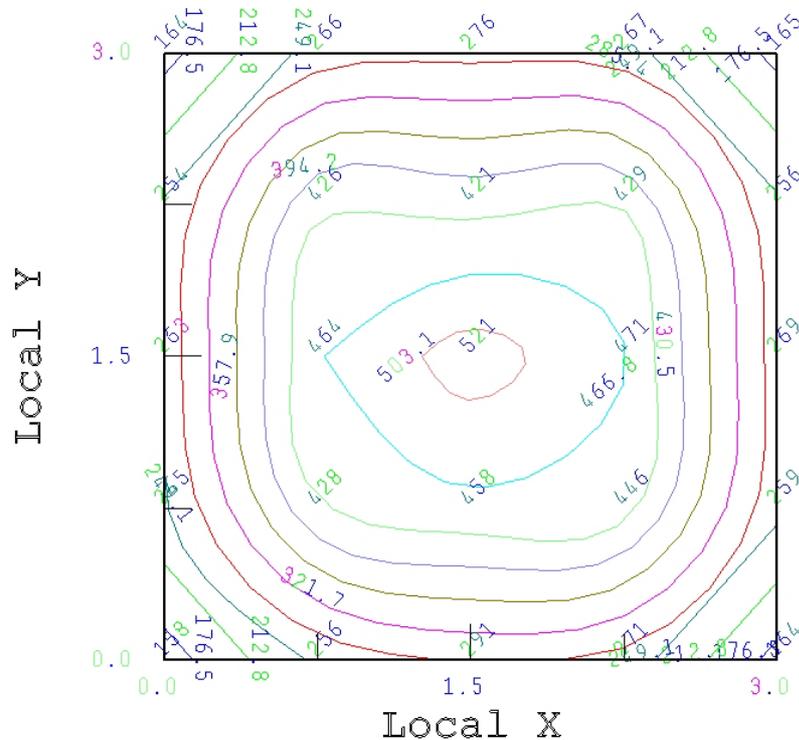
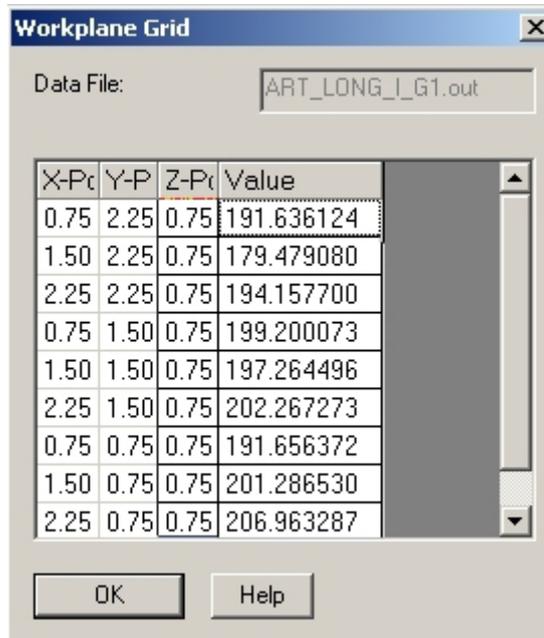


Figura 4.61 – Gráfico isolux para o ambiente simulado

O **Desktop Radiance** forneceu uma tabela com valores de iluminância (figura 4.62) e imagens texturizadas com indicação das curvas isolux (figura 4.63) e em falsa cor (figura 4.64).



X-Pos	Y-Pos	Z-Pos	Value
0.75	2.25	0.75	191.636124
1.50	2.25	0.75	179.479080
2.25	2.25	0.75	194.157700
0.75	1.50	0.75	199.200073
1.50	1.50	0.75	197.264496
2.25	1.50	0.75	202.267273
0.75	0.75	0.75	191.656372
1.50	0.75	0.75	201.286530
2.25	0.75	0.75	206.963287

Figura 4.62 – Valores de iluminância para o ambiente simulado

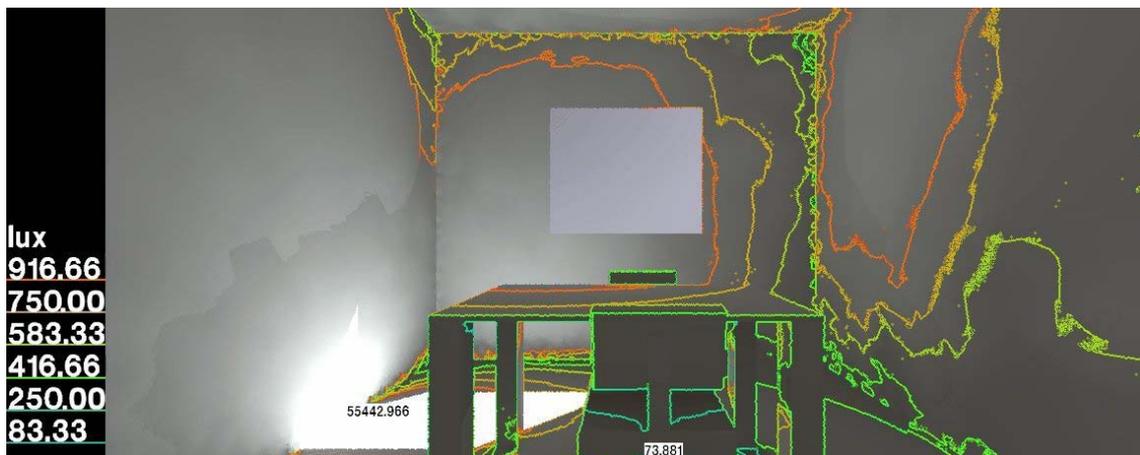


Figura 4.63 – Simulação da distribuição luminosa com indicação das curvas isolux

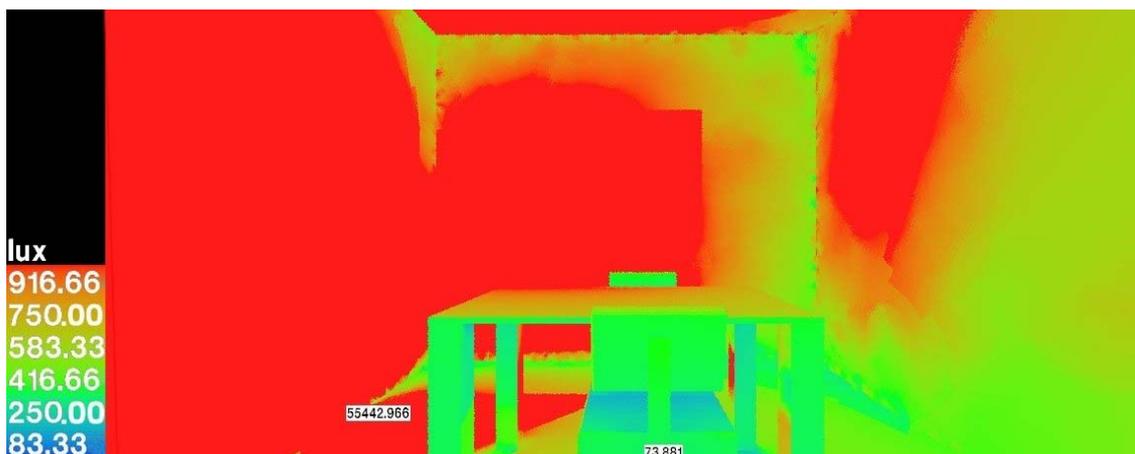


Figura 4.64 Simulação da distribuição luminosa em falsa cor

Assim, após essa análise verificou-se que os valores encontrados para a iluminação artificial ficaram bem próximos nos programas **Lightscape** e **Lumen Micro**, destoando dos valores encontrados no **Desktop Radiance** (ver figura 4.55). Para a iluminação natural, ocorreu o mesmo, porém com os valores variando na mesma proporção em todos os programas gerando linhas de representação muito parecidas embora os valores absolutos tenham diferenças significativas (ver figura 4.56).

A análise qualitativa foi feita através das imagens texturizadas nos três programas (figura 4.65), sendo que o **Desktop Radiance** ainda possibilita a geração de uma imagem com *human sensitivity*⁹⁰ (figura 4.66).



Figura 4.65 – Imagens do ambiente simulado nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente

⁹⁰ Imagem que emula a percepção humana, através de uma variedade de filtros lineares e não-lineares que comprimem a escala da imagem de modo que a maioria dos detalhes possa ser indicado simultaneamente como ocorre com a experiência visual no espaço real.



Figura 4.66 - Distribuição da intensidade visualizada com *human sensitivity* no Desktop Radiance

G - Especificação de materiais com atributos diferenciados

Este teste permitiu verificar as conseqüências das mudanças nos atributos dos materiais (cor e refletância) para modificar os níveis de distribuição luminosa do ambiente e testar as alternativas de solução para um mesmo ambiente sem precisar substituir o sistema de iluminação ou o *layout* do espaço, além de possibilitar a visualização do comportamento dos diversos tipos de materiais em relação à incidência luminosa.

Para a definição do projeto de iluminação artificial, foi calculado, através do método dos lúmens, o nível de iluminamento médio encontrado com a utilização das lâmpadas e luminárias especificadas, de forma a verificar se os valores encontrados nos programas de simulação estavam de acordo com os resultados dos cálculos tradicionais.

O ambiente simulado é uma sala de trabalho comercial, cujo iluminamento necessário segundo a NBR 5413 (1982) é de 500 lux, tendo uma área de 15,00 m² (5,00 x 3,00 m) e pé direito de 2,80 m, duas janelas com orientação Norte e com o uso de luminárias modelo FT 1411/232 da Lumini⁹¹, com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 32 W, cujo fluxo luminoso é de 2443 lúmens (figura 4.67).

⁹¹ Fabricante de aparelhos de iluminação - www.lumini.com.br.

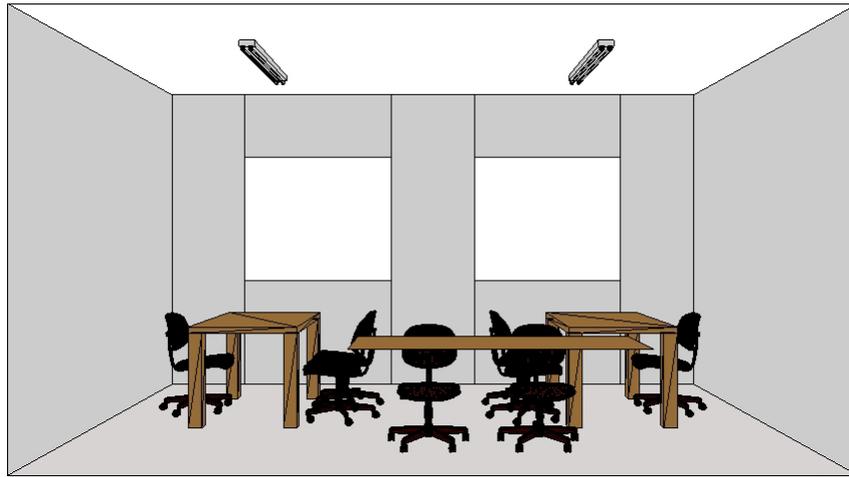


Figura 4.67 – Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

Para este estudo, foram especificadas cinco diferentes situações onde os atributos dos materiais do piso, parede e teto foram modificados de modo a permitir a simulação com diferentes características para a avaliação de como os diversos materiais se comportam perante a incidência luminosa e de que forma seus atributos influenciam na quantidade de iluminação resultante e na visualização do espaço projetado.

Foram medidos os níveis de iluminação em 9 pontos posicionados conforme a figura 4.68, com a iluminação artificial calculada pelo método tradicional que indicou a necessidade da utilização de 3 luminárias com 2 lâmpadas fluorescentes de 32 W com fluxo luminoso de 2443 lúmens por lâmpada.

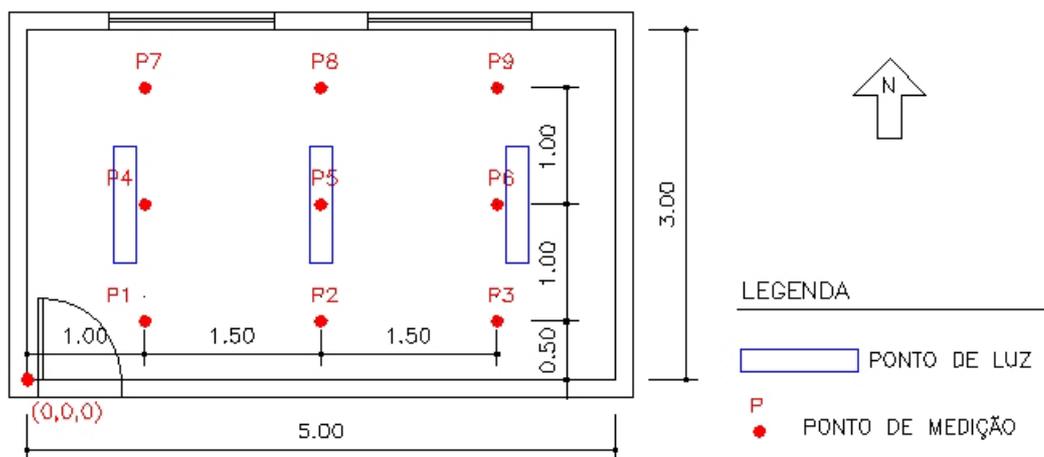


Figura 4.68 – Posicionamento dos pontos de medição para verificação dos níveis de iluminância artificial

Esse estudo é uma forma de verificar como os algoritmos implementados nas ferramentas computacionais de simulação tratam os materiais e suas características e suas capacidades quando retratando a interação da luz com as superfícies dos objetos.

Assim, foram consideradas as seguintes situações para a simulação nos programas **Lightscape**, **Lumen Micro** e **Desktop Radiance**:

- Alternativa 1 – paredes na cor cinza, piso na cor cinza e teto na cor branca;
- Alternativa 2 – paredes na cor cinza, piso na cor marrom e teto na cor branca;
- Alternativa 3 – paredes na cor branca, piso na cor creme e teto na cor branca;
- Alternativa 4 – paredes na cor cinza, piso na cor cinza e teto na cor cinza;
- Alternativa 5 – paredes na cor branca, piso na cor cinza e teto na cor branca.

Os resultados quantitativos obtidos nos 3 programas estudados foram tabelados, gerando os gráficos das figuras 4.69, 4.70 e 4.71. Pela análise desses gráficos, podemos concluir que os 3 programas consideram a refletância e cor dos materiais na determinação do nível de iluminação do ambiente, sendo que o **Lightscape** e o **Desktop Radiance** misturam a cor que está sendo refletida para as outras superfícies com um grau de intensidade muito maior, o que nem sempre ocorre na realidade. Isso pode ser visualizado nas imagens geradas pelos programas, dispostas lado a lado conforme a figura 4.72.

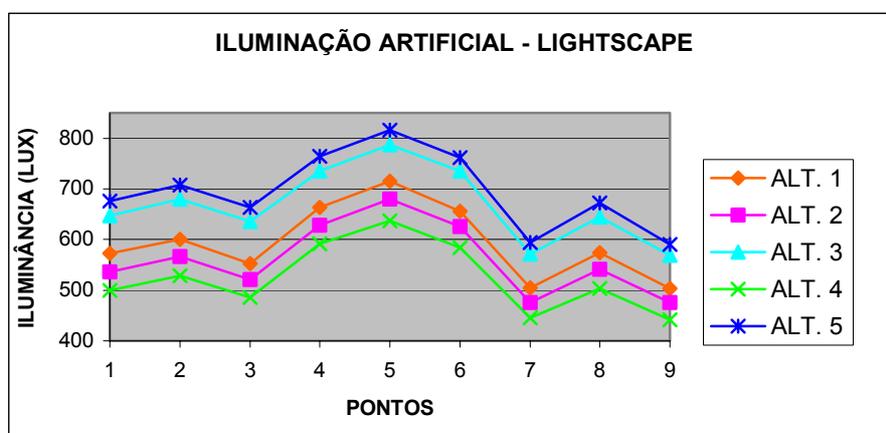


Figura 4.69 – Valores de iluminância para a simulação da luz artificial no Lightscape

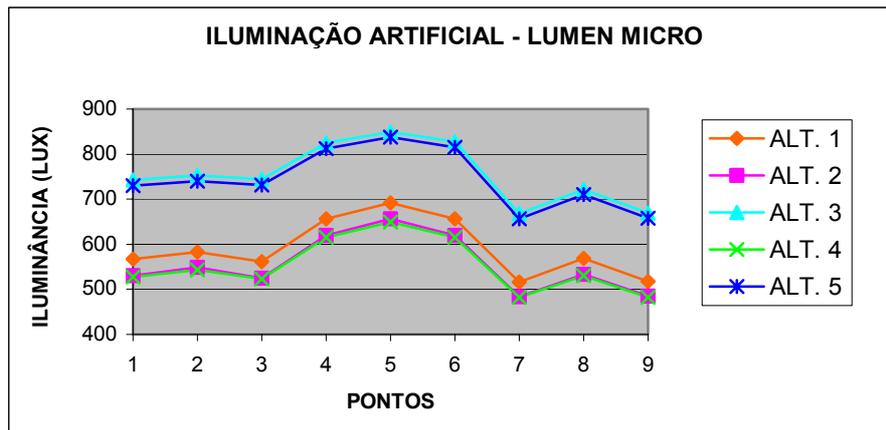


Figura 4.70 – Valores de iluminância para a simulação da luz artificial no Lumen Micro

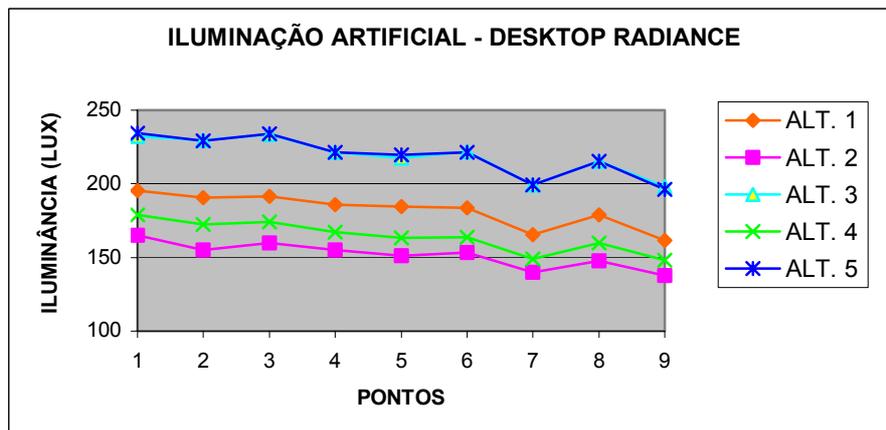


Figura 4.71 – Valores de iluminância para a simulação da luz artificial no Desktop Radiance

A variação encontrada quando se modificam as cores das paredes, do teto e do piso, em cada programa, pode ser melhor analisada a partir do gráfico da figura 4.73, onde pode-se observar de que forma a mudança nas características de cor e refletância dos materiais podem afetar o nível de iluminação de um ambiente.

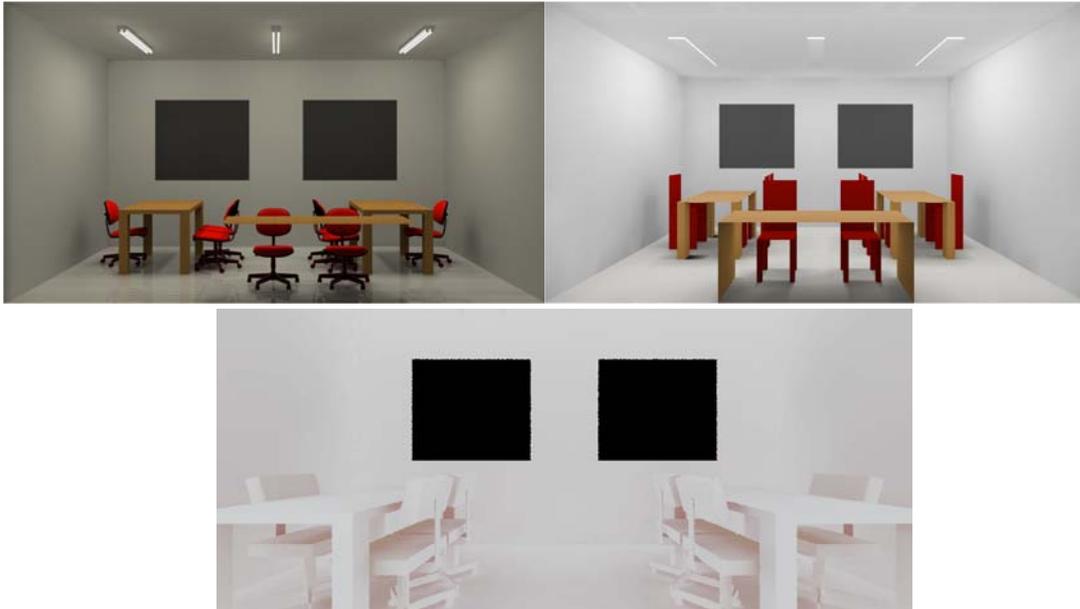


Figura 4.72 – Simulação da iluminação artificial, alternativa 1, nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente

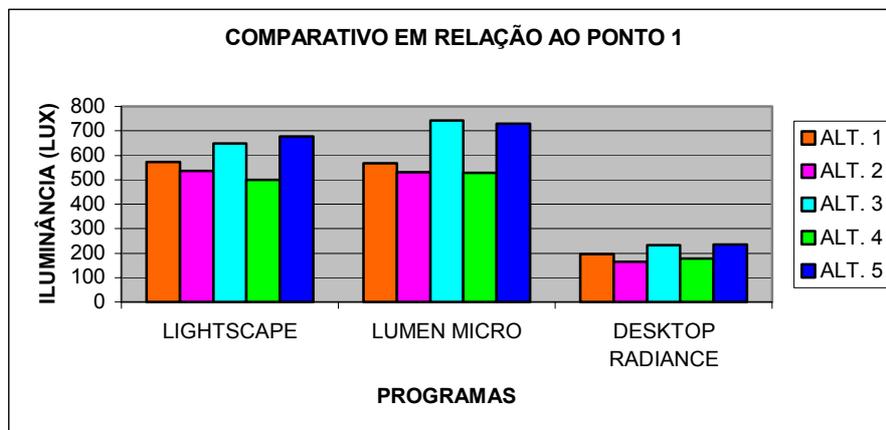


Figura 4.73 – Níveis de iluminância do ponto 1 para os três programas analisados

Quando foi modificada a cor do piso a diferença variou em torno de 4 % não sendo portanto uma parcela significativa para contribuir no aumento da distribuição do nível de iluminação do ambiente.

A modificação da cor do teto, por sua vez, incorreu numa diferença um pouco mais significativa, em torno de 13 %, o que implica num aumento considerável do nível de iluminação do ambiente.

Para a modificação na cor das paredes, a diferença foi em torno de 14 %, com valores de iluminância nos pontos mais elevadas do que no caso anterior, contribuindo de forma significativa para o aumento do nível de distribuição luminosa do ambiente.

Assim, podemos inferir que as superfícies que mais contribuem para o nível de distribuição luminosa no ambiente são as das paredes, possibilitando um aumento significativo nos níveis de iluminância encontrados. As superfícies do teto e do piso contribuem em menor quantidade quando iluminados artificialmente.

H - Visualização do ambiente com a utilização dos recursos disponíveis nos três programas

Através do modelo geométrico de um gabinete de trabalho residencial de 3,50 x 5,40 m e pé direito de 2,80 m (figura 4.74), iluminado artificialmente por duas luminárias com duas lâmpadas fluorescentes tubulares de 32 W, com fluxo luminoso de 2443 lúmens cada, e naturalmente através de uma janela de orientação 30° NW, foi possível simular o projeto de iluminação e, através da utilização de todos os recursos disponíveis nas ferramentas utilizadas, visualizar o ambiente simulado e distinguir as diferenças existentes nas saídas disponibilizadas pelos mesmos, em relação aos aspectos qualitativos.

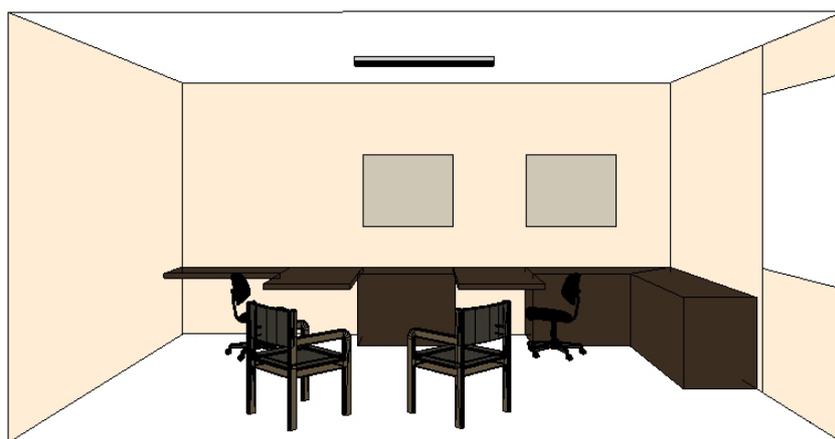


Figura 4.74 – Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

Foram utilizados nas simulações nos programas **Lightscape**, **Lumen Micro** e **Desktop Radiance**, os materiais disponíveis em cada um deles e os blocos de mobiliário disponíveis em cada ferramenta, bem como a possibilidade de utilizar modelos mais complexos de detalhes construtivos.

Dessa forma, o ambiente pode ser visualizado a partir das imagens sintetizadas nos programas, demonstradas nas figuras 4.75, 4.76 e 4.77, onde fica clara a diferença entre os recursos disponíveis tanto em relação à especificação de materiais quanto em relação à complexidade do modelo que pode ser simulado.



Figura 4.75 – Imagem gerada no Lightscape



Figura 4.76 – Imagem gerada no Lumen Micro



Figura 4.77– Imagem gerada no Desktop Radiance

Considerando os recursos disponíveis, o *software* **Lightscape** possui uma ampla biblioteca de materiais, de mobiliário e de fontes luminosas, sendo possível ainda a especificação/definição de novos materiais a partir dos existentes, com relativa facilidade na atribuição das características físicas. As fontes luminosas podem ser modificadas ou podem ser importadas em formatos de arquivos fotométricos IES.

O programa **Lumen Micro**, por sua vez, não disponibiliza muitos materiais, sendo estes definidos apenas pela sua cor e refletância. Os blocos de mobiliário são simples, porém disponibiliza uma ampla biblioteca de luminárias, podendo importar outras no formato IES.

Já o **Desktop Radiance** possui uma biblioteca de poucos materiais, luminárias e mobiliário, não sendo possível importar fontes luminosas de outros programas. O mobiliário pode ser modelado, porém os materiais disponíveis não são bem definidos, havendo dificuldades na determinação de parâmetros de novos materiais, deixando o programa com recursos limitados para a visualização e simulação precisa dos níveis de distribuição luminosa do ambiente.

Do ponto de vista quantitativo, foi possível avaliar os níveis de iluminação em pontos previamente definidos para as simulações (figura 4.78) com o uso do mesmo mobiliário e com a aplicação de objetos diferentes, de forma a verificar a maneira como o programa considera estes objetos no cálculo da iluminação natural do ambiente. A simulação foi especificada para o dia 21 de março, as 15:00 horas, sob céu claro.

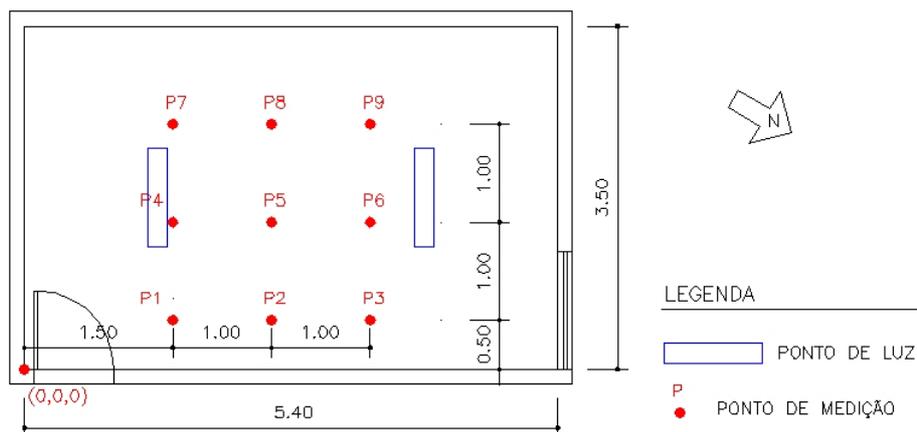


Figura 4.78 – Indicação dos pontos para determinação do nível de iluminância natural

O ambiente foi simulado com as mesmas características em relação aos materiais, fontes luminosas e detalhamento da geometria, obtendo-se os valores de iluminância nestas condições descrito na tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Distribuição luminosa do ambiente para iluminação natural

PONTOS	LUMEN MICRO (LUX)	LIGHTSCAPE (LUX)	DESKTOP RADIANCE (LUX)
1	3533,00	2172,89	683,44
2	4832,00	3795,68	1318,15
3	9383,00	7492,45	4490,83
4	3690,00	2690,79	761,51
5	4306,00	3492,08	1189,44
6	5310,00	4650,28	1959,86
7	3640,00	2624,02	751,49
8	3990,00	3111,06	969,11
9	4214,00	3684,14	1314,10

O gráfico a seguir (figura 4.79) permite analisar os programas, revelando que há uma diferença de valores significativa em todos os pontos. Isso ocorre no programa **Lumen Micro** porque, ao calcular a média de iluminância do ambiente para a iluminação natural, não considera o mobiliário, que pode vir a influenciar na diferença no nível de distribuição luminosa entre o ambiente real e o simulado, devido à sombra causada pelos móveis, muitos pontos teriam um nível abaixo do que a opção que desconsidera os objetos, colaborando portanto para a determinação de uma média menor do que a

calculada sem a consideração do mobiliário. O programa **Desktop Radiance** gerou, na maioria das simulações, valores abaixo do esperado, não se encontrando uma explicação plausível para tal resultado.

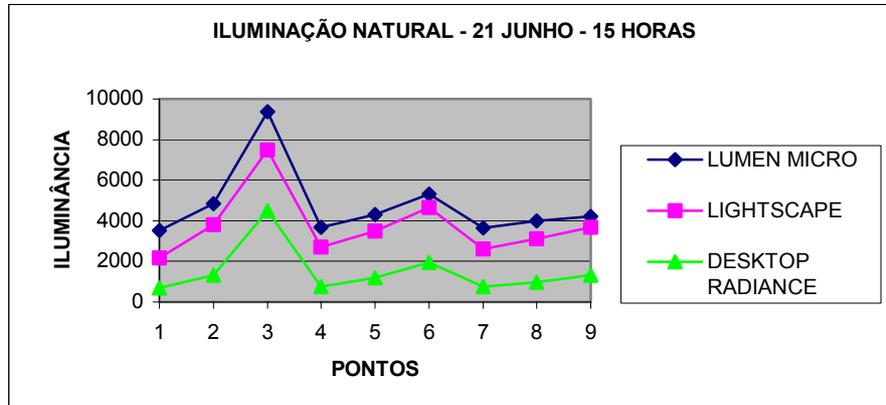


Figura 4.79 – Iluminação natural nos três programas analisados

I - Interferência da iluminação na percepção visual do ambiente

Foi feito um estudo para verificar a interferência da iluminação na percepção do espaço através da substituição dos sistemas de iluminação (lâmpada ou luminária) e conseqüente modificação nos níveis luminosos, observando as alterações nas condições favoráveis para a execução da tarefa para a qual o recinto foi projetado.

Através deste estudo, é possível ainda visualizar a iluminação resultante do uso de iluminação geral, do uso de iluminação local e da dirigida para complementar o projeto de iluminação.

Foi construído um modelo geométrico de um quarto de 14,00 m² e pé direito de 2,80 m (figura 4.80), cuja iluminação geral deve atingir 150 lux e a iluminação local, na cabeceira da cama e na mesa de estudo, 300 lux. Foram utilizadas diversas alternativas, descritas posteriormente, onde foram combinadas as possibilidades de uso de luminárias diretas e indiretas na forma de *spot*, pendente e arandela, além de uma sanca para iluminação indireta.

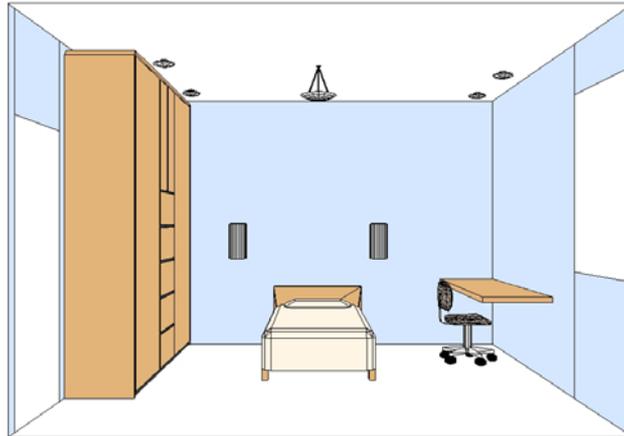


Figura 4.80 – Perspectiva do modelo geométrico do ambiente simulado

A iluminação artificial foi simulada utilizando luminárias para lâmpadas incandescentes leitosas de 100 e 60 W, com fluxo luminoso de 853 lúmens e 844 lúmens, respectivamente, com níveis de iluminação medidos nos pontos posicionados conforme a figura 4.81.

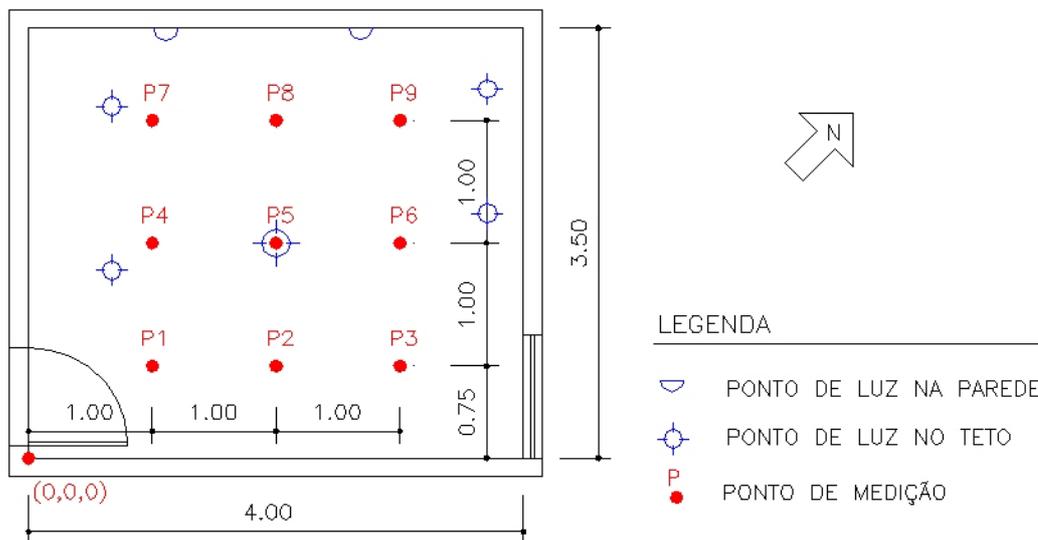


Figura 4.81 – Indicação dos pontos de medição e posicionamento das fontes luminosas

As seguintes alternativas foram testadas:

- Alternativa 1 – pendente, arandelas e *spot* ligados (figura 4.82)

Com essa alternativa o ambiente atinge o nível de iluminação geral estipulado em 150 lux e o nível para a mesa de trabalho de 300 lux.



Figura 4.82 – Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 1

- Alternativa 2 – pendente ligado (figura 4.83)

Neste caso, considerado somente o uso da iluminação geral (somente o pendente central ligado), o nível médio encontrado para o ambiente não atinge a meta estabelecida.



Figura 4.83 – Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 2

- Alternativa 3 – *spot* ligado (figura 4.84)

Essa proposta seria adotada para a utilização do armário e da mesa de trabalho gerando um iluminamento médio de 110 lux e pontual sobre a mesa de 150 lux, que não está de acordo com as necessidades de tal atividade.



Figura 4.84 – Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 3

- Alternativa 4 – arandelas ligadas (figura 4.85)

Com a utilização somente das arandelas, o nível de iluminamento médio encontrado, 100 lux, está abaixo do necessário tanto para a iluminação geral do espaço como para a atividade de leitura sobre a cama, porém proporciona visualmente um ambiente mais íntimo, o que é normalmente proposto para esse tipo de iluminação.



Figura 4.85 – Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 4

- Alternativa 5 – Uso de iluminação direta (figura 4.86)

A nova proposta caracteriza-se pela utilização de uma iluminação geral direta através de uma luminária no centro do ambiente. Fornece um nível de iluminação direta maior do que as outras alternativas, porém pode causar ofuscamento devido ao alto nível de incidência direta sobre a cama. Favorece uma distribuição pouco uniforme, gerando áreas de contraste grandes e pouco iluminadas.



Figura 4.86 – Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 5

- Alternativa 6 – Uso de iluminação indireta (figura 4.87)

Essa proposta favorece uma distribuição uniforme sobre o ambiente, tendo as áreas mais próximas ao teto melhor iluminadas, porém necessitando de uma maior quantidade de lâmpadas e consumo de energia para se atingir o nível desejado.



Figura 4.87 – Imagens da iluminação artificial nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente – Alternativa 6

Os três programas possibilitaram uma visualização do ambiente com os vários tipos de sistemas, porém cada programa possui sua característica específica.

O programa **Lightscape** permite uma configuração dos atributos físicos com maior facilidade. O **Lumen Micro** permite definir apenas a cor e a refletância, o que dificulta a determinação das características precisas dos materiais. O **Desktop Radiance** possui alguns materiais definidos, porém, apesar de teoricamente possibilitar a criação de novas definições, em todos os casos testados ocorreram erros no programa durante o processamento, não sendo possível, na prática, a criação de novas especificações.

Em relação às fontes luminosas, o maior problema encontrado foi no **Desktop Radiance**, que não permitiu a importação de novas fontes, restringindo as alternativas às fontes existentes que não se adequaram às características fotométricas propostas. Além disso, para o caso da alternativa com iluminação indireta, apesar do modelo descrever sua geometria, a imagem final não retratou a verdadeira descrição do modelo simulado, gerando uma visualização incoerente com o experimento realizado.

Podemos inferir que o programa **Lightscape**, por ter recursos que facilitam a visualização do ambiente, mais próxima do real, permite uma melhor análise da diferença existente entre as situações propostas, de como a mudança nos sistemas de iluminação interfere na percepção visual do espaço, em relação aos demais programas aqui avaliados.

4.3 Análise e discussão dos resultados

Os resultados dos cálculos das simulações permitiram avaliar a qualidade da iluminação para o espaço proposto no que se refere à visualização do ambiente e conseqüente análise subjetiva da iluminação resultante, porém ainda não é possível, ao menos com os recursos utilizados, avaliar as condições em relação às sensações causadas pela ocupação efetiva do espaço e os efeitos da iluminação sobre o conforto dos ocupantes.

Flynn (1973)⁹² destaca três fatores para se chegar à qualidade da iluminação: *perceptual clarity*, *evaluative impressions* e *spaciousness*. Esses fatores são definidos pelas impressões que todos temos ao visualizar um espaço, mas que nem sempre podem ser retratadas quando visualizando fotos ou imagens do mesmo espaço. Isso ocorre devido às grandes diferenças existentes entre o sistema visual humano e os equipamentos utilizados para produzir as representações do espaço, seja através de uma máquina fotográfica ou de um programa de simulação.

A qualidade da imagem gerada não depende somente da correta descrição dos materiais, fontes luminosas e da geometria do ambiente, mas também do tipo de algoritmo

⁹² Flynn, J.E., Spencer, T., Martyniuk, O., Hendrick, C. Interim study of the procedures investigating the effect of light on impression and behaviour. Journal of the Illuminating Engineering Society. 3(2) p.87-94. 1973. In CURTIS, 1999: 6

utilizado para sintetizar as imagens e o entendimento de como ele retrata a interação da luz com as superfícies dos objetos.

As imagens simuladas e as fotos tomadas mostram diferenças, o que já era esperado devido às características dos programas com relação aos algoritmos implementados e a forma de definição dos materiais a serem aplicados. Por isso, tornou-se difícil criar imagens semelhantes nos diferentes programas utilizados.

Pode-se fazer uma avaliação dessas diferenças a partir da comparação entre as imagens a seguir (figura 4.88), resultantes das simulações entre os diversos programas e da fotografia tomada no local.

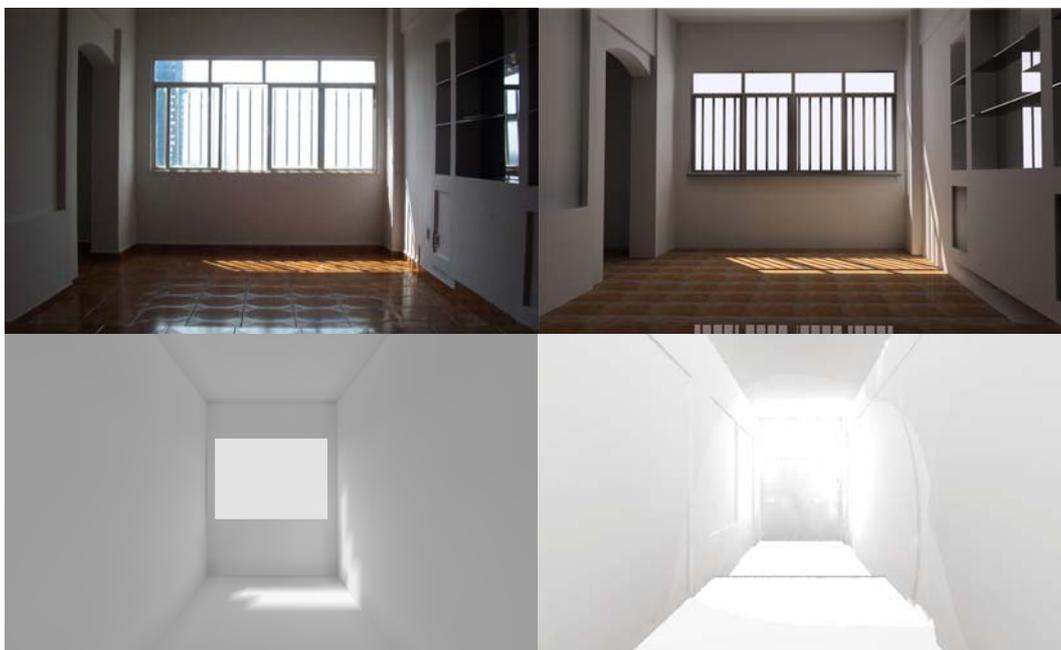


Figura 4.88 – Foto do ambiente e simulações nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente

Com relação à distribuição da iluminação, pode-se perceber diferenças no resultado final quanto aos contrastes existentes e à uniformidade da distribuição luminosa, assim como a geração de sombras, reflexões especulares e transparência (figura 4.89).



Figura 4.89 – Simulações do ambiente nos programas Lightscape, Lumen Micro e Desktop Radiance, respectivamente

É possível estabelecer critérios de comparação que permitam, ao projetista, utilizar as imagens simuladas no desenvolvimento de projetos de iluminação, no que tange à visualização do espaço iluminado, para determinar uma primeira impressão, frente ao espectador, permitindo avaliar se o projeto está de acordo com as expectativas ou não.

Os recursos das ferramentas, em particular aquelas voltadas para a simulação fotorealística do espaço, tal como o programa **Lightscape**, possibilita a criação de imagens virtuais capazes de retratar, com uma boa aproximação, o ambiente tal como ele seria ao ser construído. É possível que ocorram algumas diferenças, visto que os *software* ainda não são capazes de retratar a adaptabilidade do olho humano, aos níveis de iluminação, gerando uma imagem simulada mais escura do que o ambiente real (figura 4.90).



Figura 4.90 – Foto do ambiente e simulação no Lightscape

Quanto aos aspectos quantitativos, os estudos indicam a possibilidade do uso dessas ferramentas para o cálculo dos projetos de iluminação artificial. Existem diferenças

entre os resultados obtidos devido às aproximações feitas nos cálculos, que sempre consideram valores médios de iluminação.

Com relação à simulação da iluminação natural, alguns aspectos relevantes devem ser destacados, principalmente os relacionados à definição das características da luz natural. Dentre elas podemos destacar o uso nos programas de padrões que descrevem as condições do céu, segundo a CIE, que são aproximações das condições existentes no mundo real, e que nem sempre condizem com a verdadeira situação de um determinado local, podendo haver maior ou menor grau de nebulosidade, contribuindo para determinação de valores de iluminação diferentes dos valores simulados.

A luz natural simulada, varia de um programa para outro, além das propriedades relacionadas a essa fonte luminosa serem especificadas de formas diferentes. A atribuição da cor do céu e da intensidade da luz solar pode ser definida no programa **Lightscape**. Nos programas **Lumen Micro** e **Desktop Radiance** não são possíveis de serem definidas. Assim, não se sabe os parâmetros utilizados para esses atributos no momento da simulação.

Os resultados obtidos com as simulações da iluminação natural demonstraram uma diferença em relação aos valores obtidos no ambiente real, tendo uma diferença maior no programa **Lumen Micro** e menor no **Lightscape**, levando-nos a crer na necessidade de estudos mais aprofundados a cerca do tipo de cálculo utilizado pelos programas a fim de estabelecer critérios comparativos.

Os resultados mostram que existem problemas a serem solucionados em relação à definição das características dos materiais e das fontes luminosas do ambiente simulado, mas permitiu desenvolver uma avaliação crítica a cerca dos recursos da simulação computacional na atividade de projeção.

4.4 Avaliação das ferramentas

Na avaliação das ferramentas, a análise foi feita segundo dois critérios essenciais: a acurácia dos resultados quantitativos e o realismo das imagens geradas, além da facilidade de uso e de aprendizado da ferramenta, recursos disponíveis e algoritmos implementados.

O programa **Lightscape** é uma ferramenta de fácil aprendizado e uso, que permite a importação de dados nos formatos DWG, DXF e 3DS, produzidos na maioria dos programas CAD. O cálculo da iluminação, usando o algoritmo da radiosidade, pode requerer muito tempo, a depender da complexidade do modelo simulado. A facilidade na definição de materiais e fontes luminosas permite criar imagens mais realistas, além de facilitar o estudo quantitativo da proposta projetual avaliada. Podem ocorrer problemas na simulação em decorrência do modo de construção do modelo geométrico, que deve por sua vez ser concebido desde o início para ser utilizado no programa. Os resultados qualitativos se mostraram de grande valia para a percepção visual do ambiente, assim como os valores numéricos obtidos, mesmo apresentando discordâncias nos resultados em relação aos valores medidos da iluminação natural, mas permitindo uma avaliação da distribuição luminosa do ambiente.

O aplicativo **Lumen Micro** é uma ferramenta que possibilita uma análise quantitativa da iluminação de forma rápida, sendo melhor utilizado para ambientes de geometria simples e com superfícies ortogonais. O modelo geométrico é construído no próprio programa, tendo a possibilidade de importar arquivos nos formatos DWG e DXF, mas só utilizados para compor o cenário, sem interferir no cálculo da iluminação. A fonte luminosa é facilmente definida se houver uma descrição fotométrica em formato IES para especificá-la. Os materiais disponíveis são poucos, podendo ser definidos apenas pela cor e refletância. Quanto ao aspecto qualitativo, as imagens só podem ser geradas no modo de representação perspectiva não sendo fotorealísticas.

O programa **Desktop Radiance** é uma ferramenta *freeware*, disponível na Internet, produzida pela LBL. Seus recursos são limitados, tendo uma biblioteca de mobiliário, vidros, materiais e fontes luminosas com definições que não podem ser modificadas. Somente os materiais podem ser redefinidos, criando novas configurações, mas o processo se mostrou lento, causando erros durante a simulação. Os dados numéricos obtidos nas simulações destoaram muito em relação aos outros programas, apesar de ter recursos vantajosos de análise da iluminação, tais como o traçado das curvas isolux sobre as imagens, a técnica de falsa cor e a emulação da percepção visual humana. Muitas dificuldades foram encontradas na especificação das câmeras de visualização, gerando imagens de baixa qualidade gráfica, com um colorido que não condiz com as cores especificadas para os materiais.

Comparando os três programas analisados, o **Lightscape** se mostrou mais viável para o estudo da iluminação, tanto qualitativa quanto quantitativa, apesar das distorções encontradas, o que não significa que seja mais eficiente e adequado para todas as situações. Existem no mercado, como descrito no capítulo 3, uma ampla gama de ferramentas disponíveis que devem ser analisadas e comparadas para que se possa escolher aquela mais eficaz para a obtenção dos resultados desejados.

Foram verificados alguns problemas nas ferramentas, como a definição dos pontos de análise da distribuição luminosa e a determinação da visualização do modelo, que dificultaram o estudo comparativo, mas que ao longo do trabalho foram melhor avaliados de forma a aproximar ao máximo o modelo simulado ao ambiente real.

Ainda que encontrando algumas dificuldades na aplicação das ferramentas para a simulação, as tecnologias desenvolvidas têm possibilitado uma nova forma de pensar e realizar o ato de projetar, colaborando para o desenvolvimento de novas técnicas de projeção e aplicações até então não viáveis com os meios tradicionais de projeção.

Uma das dificuldades encontradas no estudo de tais programas refere-se a pouca documentação disponível sobre as ferramentas, basicamente os manuais e o “*help*”, que apresentam suas limitações, não permitindo um maior aprofundamento nas questões relacionadas aos algoritmos implementados e suas características. Assim, esses fatores contribuíram para que o estudo fosse fundamentado nas informações fornecidas pelo fabricante, havendo apenas alguns poucos trabalhos que faziam referência ao uso de tais ferramentas, não sendo possível maior aprofundamento a cerca das dificuldades e dúvidas encontradas com o manuseio das mesmas.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

“A arquitetura tem que se aprimorar e a técnica está aí para que façamos uso dela. Também a tecnologia, para que nós a desenvolvamos até o ponto em que possa dar respostas as nossas necessidades e desejos. Para isso, basta somente que saibamos o que queremos!”

(VIANNA, 2001: 14)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O arquiteto ao projetar os espaços deve-se preocupar não só com as questões referentes às técnicas construtivas empregadas, à funcionalidade do espaço e à estética da construção, mas também com os aspectos do conforto ambiental, seja ele térmico, acústico ou luminoso.

A iluminação deve ser uma preocupação constante na fase de projeção, visto que é por meio dela que podemos distinguir os objetos, visualizar os ambientes e executar as atividades para os quais foram projetados. Por isso é preciso utilizar métodos de projeto que viabilizem o uso racional da iluminação, evitando o consumo excessivo de energia.

Inicialmente, deve ficar claro o entendimento da necessidade de interação entre os projetos de iluminação, natural e artificial, e o projeto arquitetônico, haja visto que é durante a definição da forma do edifício e de sua implantação no sítio que são tomadas decisões projetuais fundamentais para o aproveitamento da luz natural na edificação.

Em relação aos recursos da simulação computacional, estes devem ser aplicados durante o desenvolvimento de projetos, desde a etapa inicial, de análise do problema, até as etapas de síntese e avaliação da proposta, onde serão desenvolvidas as alternativas de solução e feita a escolha da proposta adequada para a resolução do problema.

A simulação computacional em projetos de iluminação viabiliza estudos quantitativos e qualitativos, considerando que permite a produção de representações fotorealísticas, de forma a visualizar a aparência do ambiente e a produção de um modelo fotométrico para uma estimativa precisa das suas propriedades luminosas. É importante lembrar que a obtenção de uma visualização realística do espaço projetado só é possível a partir do uso da simulação computacional.

As dificuldades encontradas referem-se ao tempo gasto no preparo e edição dos dados relativos à geometria e propriedades físicas da luz e dos materiais. O processo de simulação é mais fácil e interativo permitindo que profissionais e estudantes possam utilizá-los para estudos e projetos, sendo que o tempo despendido é dependente da complexidade do modelo, do algoritmo de iluminação implementado e das características de processamento do equipamento utilizado.

Com a execução dos experimentos, foi possível verificar as vantagens e limitações das ferramentas de simulação e criar procedimentos de aplicação dessas tecnologias durante o processo projetual de arquitetura, que poderá auxiliar o projetista nas diversas fases do projeto, de maneira a criar propostas mais eficientes e eficazes com relação ao conforto lumínico do espaço projetado.

Recomendações para aplicação em projetos (procedimentos)

Para a aplicação da simulação computacional em projetos de iluminação interna é preciso inicialmente o entendimento de como a luz se comporta em relação às superfícies desse ambiente e quais alternativas são adequadas para o bom desempenho visual nos espaços projetados.

A seguir é preciso escolher a ferramenta adequada para a simulação do problema proposto, sendo necessário um conhecimento prévio sobre seus recursos e possibilidades de forma a desenvolver propostas que não interfiram na solução devido às limitações encontradas nos programas.

A partir daí, podem ser desenvolvidos os teste nos programas para melhor análise da proposta a ser desenvolvida gerando alternativas de solução que podem ser verificadas a partir dos recursos de análise quantitativa e qualitativa disponíveis, a fim de demonstrar a viabilidade da alternativa de solução.

A avaliação do desempenho com o uso dos simuladores de iluminação pode ser feita também durante a obra para testar novas alternativas para os problemas projetuais gerados durante a execução; e numa avaliação pós-ocupação, para edificações já implantadas, que necessitem de uma análise quanto aos aspectos luminosos para a criação de recursos que otimizem o projeto.

Conclui-se que os projetos de iluminação podem ser desenvolvidos usando esse método, aplicando os recursos informatizados como indutores no processo de busca da melhor alternativa de solução, utilizando a simulação computacional desde a fase de concepção da proposta projetual, a fim de determinar possíveis soluções para o projeto de iluminação natural, tais como a orientação mais adequada, dimensionamento das aberturas e definição dos tipos e das dimensões dos elementos de controle, que irão

auxiliar o projetista durante as fases de estudo preliminar e anteprojeto, até a fase de projeto executivo. Nesta fase serão desenvolvidos o detalhamento dos elementos construtivos e a especificação dos materiais, que influenciará também na definição do projeto de iluminação artificial.

O uso da tecnologia de simulação no ensino de Arquitetura

Em se tratando de questões referentes ao conforto do espaço construído, é de essencial importância focar esse tema relacionando-o ao ensino de Arquitetura e de Conforto Ambiental, principalmente nas questões referentes ao ato de projetar.

Poucos são os cursos que utilizam as ferramentas informatizadas de simulação nas disciplinas de conforto como parte do aprendizado dos aspectos da iluminação natural e artificial. Porém, mesmo nesses casos, o enfoque dado não considera o contexto do projeto como um todo, desenvolvendo estudos de ambientes definidos, sem relacioná-los ao exercício projetual desenvolvido pelos alunos nas disciplinas de projeto. Mesmo sob este aspecto, o uso da simulação é um importante recurso para auxiliar o estudante no desenvolvimento de uma consciência crítica sobre os fenômenos da luz e sua atuação sobre o ambiente construído.

A partir do enfoque dado pelos procedimentos de projeto apresentados é possível criar projetos mais engajados com as questões de iluminação, principalmente a natural, até então, pouco aprofundados, que permitam melhorar as condições de habitabilidade dos edifícios, reduzindo os custos com energia e evitando a necessidade do uso constante da iluminação artificial e do condicionamento de ar.

Até então, a grande maioria das discussões a cerca da aplicação das ferramentas de simulação dos aspectos técnicos da construção tem se dado em âmbito acadêmico e científico, nos congressos e seminários realizados sobre o tema, porém com o enfoque na validação e aprendizado dos programas, sem relacioná-los ao processo projetual e ao ensino das disciplinas de Arquitetura. É necessário portanto, entender que o uso da tecnologia informatizada não deve ser aplicado somente para o aprendizado do programa, mas deve estar pautada na construção de uma metodologia de integração com o ato de projetar, permitindo ao usuário desenvolver sua habilidade criativa e perceptiva

quando lidando com os aspectos técnicos do projeto. A simulação acelera o amadurecimento profissional pela possibilidade de experimentar vários casos, durante o processo de aprendizagem em âmbito acadêmico.

Está clara a necessidade do conhecimento técnico sobre o tema, mas é preciso uma mudança na metodologia de ensino de forma a focar tais conteúdos da melhor maneira, destacando as limitações decorrentes do processo e fazendo uma avaliação dos procedimentos adotados de forma a contribuir para o crescimento dessa experiência pedagógica. É necessário também que o docente auxilie o aluno a não formar uma visão distorcida a respeito do comportamento dos fenômenos, acreditando que o mundo real possa ser sempre simplificado e controlado como nos programas de simulação.

As dificuldades encontradas são muitas, mas só com investimento em pesquisa e com intercâmbio de experiências a cerca do tema é possível desenvolver alternativas pedagógicas capazes de modificar o “tradicional” enfoque metodológico e acompanhar a velocidade de transformação imposta pelo emprego das tecnologias informatizadas no pensar a Arquitetura.

Com esse trabalho, buscamos contribuir para o debate a cerca do uso da tecnologia de simulação no projeto de iluminação, acreditando que o arquiteto em seu ato de projetar deve ter a consciência do seu papel frente as questões ambientais, criando, em sua prática profissional, uma arquitetura mais preocupada com a qualidade de vida, o que deve começar no âmbito da formação acadêmica.

Conclusões

A partir da análise dos resultados da pesquisa, concluímos que:

A simulação computacional é uma tecnologia que deve ser usada por projetistas de iluminação não só como ferramenta para visualização dos resultados, mas também como suporte para pesquisa, cálculo e ensino do conforto luminoso;

A simulação de iluminação é mais um recurso para facilitar o entendimento do comportamento da luz e dos materiais no ambiente projetado possibilitando resultados satisfatórios para o enfoque dos aspectos subjetivos da iluminação;

Com os procedimentos adotados é possível avaliar ambientes, em fase de projeção e existentes, de forma a analisar seu desempenho frente às questões de iluminação, já que a simulação possibilita a obtenção de dados numéricos das quantidades luminosas nesses recintos, favorecendo o desenvolvimento de estudos, de forma mais rápida e menos custosa;

Diferentes ferramentas têm diferentes formatos de entrada e saída de dados e devem ser utilizadas a depender da finalidade a que se presta o estudo, havendo uma preocupação com a correta definição dos materiais e fontes luminosas para todos os casos;

A definição das propriedades dos materiais é uma tarefa complexa e na maioria das vezes há a necessidade de fazer aproximações para especificá-las nos programas de simulação;

No mundo real, a passagem da luz por um ambiente se dá por uma infinidade de raios, o que na prática não pode ser retratado nas ferramentas, implicando na definição de uma quantidade finita de raios para o cálculo, devido aos recursos computacionais disponíveis, o que gera simplificações nos algoritmos utilizados;

As diferenças nas características dos equipamentos utilizados no processo de simulação dificulta a comparação dos resultados visuais já que envolve diversas variáveis tais como resolução, qualidade de impressão, dentre outros;

O **Lightscape** oferece a facilidade de uso e aprendizado e a possibilidade de constantes atualizações dos dados de entrada, além de permitir a simulação de ambientes de maior complexidade, tendo como característica principal a visualização de imagens fotorealísticas.

O **Lumen Micro** produz bons resultados, porém limitados ao tipo de modelo que permite ser simulado, sendo que trata o cálculo da iluminação artificial com melhor precisão, gerando bons resultados analíticos;

O **Desktop Radiance** foi o aplicativo que teve resultados menos precisos, tanto em relação às imagens geradas quanto aos valores quantitativos obtidos nos diversos ensaios. Devido à impossibilidade de criação e edição de materiais e fontes luminosas não permitiu uma simulação mais precisa e coerente desses aspectos em relação às características simuladas nos outros programas.

Está clara a necessidade de pesquisas que envolvam o estudo de outras ferramentas voltadas para a simulação visual de forma a verificar os recursos das mesmas e a possibilidade de sua utilização no processo de projeto de iluminação.

Desdobramentos e Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos nesta pesquisa podem orientar novos trabalhos, dispostos a discutir os resultados encontrados que não foram satisfatórios, tais como a simulação visual através do programa **Desktop Radiance** e as discrepâncias encontradas nos resultados quantitativos da simulação da iluminação natural nos três programas avaliados.

Tem-se a confiança que um significativo avanço foi empreendido para o estudo e aplicação da simulação nos projetos de iluminação, já que cada vez mais a tecnologia tem proporcionado um desenvolvimento no modo de pensar o projeto, permitindo resultados que até então não eram disponíveis com os meios tradicionais de projeção.

Sugere-se para trabalhos posteriores, o estudo mais aprofundado dos métodos de cálculo implementados em tais ferramentas, bem como a aplicação prática dos procedimentos desenvolvidos na concepção de projetos de arquitetura e de iluminação, além do uso de tal ferramental no ensino das disciplinas de conforto, como forma de ampliar o aprendizado do aluno disponibilizando novos recursos para a aquisição do conhecimento.



BIBLIOGRAFIA

"Há pessoas que transformam o Sol numa simples mancha amarela, mas há também aquelas que fazem de uma simples mancha amarela o próprio Sol."

Pablo Picasso

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILUX, Agência para Aplicação de Energia, ELETROBRÁS, PROCEL. **Uso racional de energia elétrica em edificação – iluminação**. São Paulo. 1992.

AMORIM, Arivaldo Leão de. Simulação computacional em arquitetura e urbanismo. In: IV SEMINÁRIO DE LINGUAGEM, INFORMAÇÃO E REPRESENTAÇÃO DO ESPAÇO, 2003. Salvador. **Anais...** Salvador: LCAD, 2003.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **Fundamentos de computação gráfica**. Notas de aula. FAUFBA, LCAD, PAC99. Aula 11 - Rendering, 1999.

AMORIM, Arivaldo Leão de. **Ray Tracing**: uma introdução. [s.n.t.]

ANGEL, Ian O. **High-resolution computer graphics using C**. New York: Halsted Press, 1990.

ASHMORE, J., RICHENS, P. **Computer simulation in daylight design**: a comparison. March, 2001. Disponível na Internet: <http://www.arct.cam.ac.uk/research/cadlab/lighting/publications.html>. Acesso em: 14/05/02.

ASSIS, Eleonora S.; PEREIRA, Elizabeth M. D.; SOUZA, Roberta V. G.; VALADARES, Victor M.; MESQUITA, Lúcio C.; TRINDADE, Rodrigo C. Modelo para determinação da volumetria dos edifícios a partir de critérios de insolação e iluminação natural: integração ao sistema de informações geográficas da prefeitura de BH, MG. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 5413**: Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro, 1982. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 5382**: Verificação da Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro, 1985. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. **NBR 5481**: Iluminação – Terminologia. Rio de Janeiro, 1982.

AZEVEDO, Sérgio Lund. **Desmistificando os sistemas especialistas**. Pelotas: Editora Universitária / UFPel, 1999. 107 p.

BANON, Gerald Jean Francis. **Bases da computação gráfica**. Rio de Janeiro: Campus, 1989.

BERG, Alexandre, MATTOS, Patrícia Noll de. Notas de aula – aula 07. **Rendering**. Disponível na Internet: <http://www.ulbra.tche.br/~berg/grafica/aula07/Cgaula07.html>. Acesso em 04/11/02a.

BERG, Alexandre, MATTOS, Patrícia Noll de. Notas de aula – aula 08. **Realismo**. Disponível na Internet: <http://www.ulbra.tche.br/~berg/grafica/aula08/CGaula08.html>. Acesso em 04/11/02b.

BEAUD, Michel. **Arte da Tese**: como preparar e redigir uma tese de mestrado, uma monografia ou qualquer outro trabalho universitário. Trad: Glória de Carvalho Lins. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 184 p.

BITTENCOURT, Leonardo Salazar; FERREIRA, Dilson Batista. Analisando o programa Lumen Micro® v. 7.1 como instrumento de ensino de conforto ambiental nos cursos de arquitetura e urbanismo. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE INFORMÁTICA NO ENSINO DE ARQUITETURA, I., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis.

BITTENCOURT, Leonardo Salazar. **Uso das cartas solares**: diretrizes para arquitetos. Maceió: EDUFAL, 1990.

BLINN, James F. & NEWELL, Martin E. **Texture and reflection in computer generated images**. Communications of the ACM, New York. v.19. n.10. October, 1976. p. 542-547.

BUSSINGUER, Bênlío. Conforto ambiental com o computador. **CADesign**. São Paulo: Market Press, 1997, n. 23, p. 66. Mensal. ISSN 1413-2672.

CADESIGN. Aplicativo melhora renderização do AutoCAD. **CADesign**. São Paulo: Market Press, n. 41, p. 28, set. 1998.

CARRARA, Valdemir. **Manual de Computação Gráfica**: modelos de iluminação. Disponível na Internet: <http://www.directnet.com.br/users/val/tutor/tutor.html>. Acesso em 04/11/02.

CASTRO, Eduardo Breviglieri Pereira de. **LIGHT SHELF**: estudo da sua eficiência lumínica através de simulação computacional. 1996. 134 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CASTI, John L. **Mundos virtuais**: como a computação está mudando as fronteiras da ciência. Rio de Janeiro: Revan, 1998.

CHVATAL, Karin M. S. (el alli). Levantamento de ferramentas computacionais de auxílio ao projeto visando o conforto ambiental e sua aplicação no processo projetual. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL – NUTAU, 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 2000. p.1042-1051.

CLARO, Anderson. **Luz solar: modelo vetorial esférico para radiação / ray tracing**. In: V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e II ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Fortaleza, 1999. CD-ROM.

CLARO, Anderson. **Modelo vetorial esférico para radiação aplicado à iluminação natural**. 1998. 173 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

COLORPLAST. **Manual técnico de iluminação zenital**, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d].

CORES e sistemas de cores. Disponível na Internet: <http://gbdi.icmc.sc.usp.br/documentacao/apostilas/cg/ap11.html>. Acesso em 13/08/01.

CREDER, Helio. **Instalações elétricas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora S.A., 1976. 273 p.

CUNHA, Eduardo Grala da. Computação gráfica auxilia no conforto ambiental. **CADesign**, São Paulo: Market Press, n. 62, p. 32-34, 2000. Mensal. ISSN 1413-2672.

CURTIS, Samuel. **Lighting quality & computer graphics**. Thesis (Bachelor of Building Science Honours). Victoria University of Wellington, november, 1999. Disponível na Internet: <http://www.arch.vuw.ac.nz/papers/bbsc389/2001/references.htm>. Acesso em 25/03/2003.

DELBENE, Claudio A., Evans, John Martin. Simulación virtual de la trayectoria solar em proyectos por computadora, metodologia de trabajo. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 1997. Salvador. **Anais...** Salvador, 1997. p. 216-220.

DICIONÁRIO Michaelis . Dic Michaelis - UOL. CD-Rom. 2001.

DUARTE, Rogério C. B. Aprenda a iluminar ambientes fechados. **CADesign**, São Paulo: Market Press, n. 46, p. 14-15, fev.1999.

DUARTE, Rogério C. B. Faça estudos solares com o Microstation. **CADesign**, São Paulo: Market Press, n. 40, p. 66-67, ago.1998.

ECHENIQUE, M. Modelos: uma discusión. In: MARTIN, L., MARCH, L.,; ECHENIQUE, M. **La estrutura del espacio urbano**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1975. 377 p.

ECO, Umberto. **Como se faz uma tese**. São Paulo: Editora Perspectiva, 1996.

FERREIRA, Maria Alice Grigas Varella. **Modelamento geométrico de sólidos**: principais conceitos e representações. [s.n.t].

FOLEY, James D., et al. **Computer graphics**: principles and practice. 2. ed. in C. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1997a.

_____. **Introduction to computer graphics**. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1997b.

FONSECA, Geraldo Maciel da, FERREIRA, Maria Alice Grigas Varella. **Modelamento geométrico usando os operadores topológicos de Euler**. São Paulo: EPUSP, 1994.

FONTOYNT, Marc (edited). **Daylight performance of buildings**. London: James and James Science Publishers Ltda, 1999. 304p.

FREIRE, Márcia Rebouças. **A luz natural no ambiente construído**. Salvador: FAUFBA/Depto. IV, LACAM, 1997. 54 p.

FREITAS, Carla. **Rendering de objetos tridimensionais**: geração de imagens com realismo. Disponível na Internet: <http://www.inf.ufrgs.br/~carla/inf01122/cg12-printout.pdf>. Acesso em 30/10/02.

GHISI, Enedir. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação**: estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina. 1997. 246 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GLASSNER, Andrew S. **3D Computer Graphics**: a user's guide for artists and designers. 2. ed. New York: Design Press, 1989.

GOMES, Jonas M., VELHO, Luiz C. **Conceitos básicos de computação gráfica**. São Paulo: IME-USP, 1990. 311 p.

GOMES, Jonas, VELHO, Luiz. **Computação Gráfica: imagem**. Rio de Janeiro: IMPA/SBM, 1994.

GONÇALVES, Helder, ALMEIDA, Francisco. O uso de programas de simulação dinâmica de edifícios em estudos de sensibilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 1995. p. 231-245.

GONÇALVES, José Ernesto Lima. **Iluminação e visibilidade**. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego – CET, 1982. 112 p. il.

GONZALEZ, Rafael C., WOODS, Richard E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 2000. 509 p.

GOULDING, John, LEWIS, J. Owen, STEEMERS, Theo C. **Energy concious design - a primer for architects**. Dublin: B. T. Batsford Ltd, 1992. 136 p.

HEARN, Donald, BAKER, M. Pauline. **Computer graphics: C version**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975.

HOUAISS, Antônio, VILLAR, Mauro Salles. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Elaborado no Instituto Antônio Houaiss de Lexicografia e Banco de Dados da Língua Portuguesa S/C Ltda. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

ILUMINAÇÃO de objetos. Disponível na Internet: <http://www.inf.ufrgsbr/cg/teaching/inf01009/2002/iluminação.pdf>. Acesso em 30/10/02.

INANICI, Mehlika N. **Application of the state – of – the – art computer simulation and visualization in architectural lighting research**. Disponível na Internet: <http://www-personal.umich.edu/~inanici/p117v2.pdf>. Acesso em: 04/07/02.

KHODULEV, A. B., KOPYLOV, E. A. **Physically accurate lighting simulation in computer graphics software**. Disponível na Internet: <http://rmp.kiam.ru/articles/pals/introction.htm>. Acesso em: 29/10/02.

LABEEE. **Iluminação natural - Parte 3: Procedimento de Cálculo para a Determinação da Iluminação Natural em Ambientes Internos**. UFSC. Disponível na Internet: <http://www.labeee.ufsc.br/conforto/textos/iluminacao/t3-iluminacao/texto3il-0699.html>. Acesso em 13/05/02.

LAM, William M. C. **Sunlighting as formgiver for architecture**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986. 464 p.

LAMBERTS, Roberto, DUTRA, Luciano, PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997. 192 p. il.

LASEAU, Paul. **Architectural representation handbook – traditional and digital techniques for graphic communication**. New York: McGraw-Hill, 2000. 294 p.

LAW, Averill, Kelton, W. **Simulation modeling & analysis**. McGraw-Hill International Editions, 1991.

LAWSON, Bryan. **How designers think: the design process demystified**. 3. ed. Oxford: Architectural Press, 1997. 318 p.

LAWSON, Bryan. **Design in mind**. Great Britain: Architectural Press, 1994. 146 p.

LISCHINSKI, Daniel. **Accurate and reliable algorithms for global illumination**. Phd Thesis. Department of Computer Science Technical Report. Cornell University, 1994. Disponível na internet: <http://www.cs.huji.ac.il/labs/cglab/papers/acgi/>. Acesso em 25/09/2002.

LOPES, J. M. Brisson. **Cor**. Disponível na Internet: <http://www.mega.ist.utl.pt/~ic-cg/programa/livro/cor.pdf>. Acesso em 30/10/02a.

LOPES, J. M. Brisson. **Radiosidade**. Disponível na Internet: <http://www.mega.ist.utl.pt/~ic-cg/programa/livro/Radiosidade.pdf>. Acesso em 30/10/02b.

LOPES, J. M. Brisson. **Ray Tracing**. Disponível na Internet: <http://www.mega.ist.utl.pt/~ic-cg/programa/livro/raytracing.pdf>. Acesso em 30/10/02c.

MACHADO, Arlindo. **Máquina e imaginário: o desafio das poéticas tecnológicas**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. 320 p.

MAGALHÃES, Maria Amalia Amarante de Almeida. A utilização do modelo reduzido na simulação de iluminação natural no interior de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 1995. p. 149-159.

MAJOROS, András. **Design tools and techniques**. Passive and Low Energy Architecture International – PLEA Notes. Note 4. Brisbane: The University of Queensland Printery, 1998. 76 p.

MARTIN, Allen. **Radiosity**. Disponível na Internet: <http://cs.wpi.edu/~matt/courses/cs563/talks/radiosity.html>. Acesso em 04/11/02.

MARTINEZ, Alfonso Corona. **Ensaio sobre o projeto**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2000. 198 p.

MEDEIROS, João Bosco. **Redação científica: a prática de fichamentos, resumos, resenha**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2000. 237 p.

MENDES, Vilson Berilli. **Realismo visual**. Disponível na Internet: <http://www.ic.uff.br/~aconci/realismo.htm>. Acesso em 04/11/02.

MITCHELL, William J. **The logic of architecture: design, computation, and cognition**. Massachusetts: The MIT Press, 1994. 291 p.

MONTENEGRO, Gildo A. **A invenção do projeto: a criatividade aplicada em desenho industrial, arquitetura, comunicação visual**. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 1987. 131 p.

MOORE, Fuller **Concepts and practice of architectural daylighting**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.

MORAIS, João Sousa. **Metodologia de projecto em arquitectura: organização espacial na Costa Vicentina**. Lisboa: Editorial Estampa, 1995. 1. ed. 309 p.

MOREIRA, Vinícius de Araújo. **Iluminação & fotometria: teoria e aplicação**. São Paulo: Edgar Blücher, 1982. 2. ed. revista e ampliada. 198 p.

NAVEIRO, Ricardo Manfredi, OLIVEIRA, Vanderlí Fava de (org.). **O projeto de engenharia, arquitetura e desenho industrial: conceitos, reflexões, aplicações e formação profissional**. Juiz de Fora: Ed. UFJF, 2001. 188 p.

NEGRISOLI, Manoel E. M. **Instalações elétricas: projetos prediais em baixa tensão**. 3. ed. revista e ampliada. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1982.

NEVES, Laert Pedreira. **Adoção do partido na arquitetura**. Salvador: Centro Editorial e Didático da UFBA, 1989. 206 p.

PARRA FILHO, Domingos, SANTOS, João Almeida. **Apresentação de trabalhos científicos: monografia, TCC, teses e dissertações**. 3. ed. São Paulo: Futura, 2000. 140 p.

PEREIRA, Alice T. C.; PEREIRA, Fernando O. R.; NEVES, Patrícia Silveira; et al. Modelagem Fotorrealística com software Lightscape. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE INFORMÁTICA NO ENSINO DE ARQUITETURA, I., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis.1998. CD-ROM.

PHONG, Bui-Tuong. **Illumination for computer generated pictures**. Communications of the ACM, University of Utah. v.18, n.6, June, 1975.

PRATINI, Edison. **Glossário de computação gráfica e realidade virtual**. Disponível na Internet. <http://www.usp.br/nutau/pratini/glossario.htm>. Acesso em 19/10/2000.

PROCESSAMENTO gráfico – 2001/2 – síntese de imagens realísticas (rendering). Disponível na Internet: <http://www.inf.ufrgs.br/cg/teaching/inf01044/nedel/15-rendering.pdf>. Acesso em 30/10/02.

RE, Vittorio. **Iluminação externa: cálculo e realização**. São Paulo: Hemus, 1978a. 118p.

RE, Vittorio. **Iluminação interna: civil e industrial**. São Paulo: Hemus, 1978b. 120 p.

REGO, Rejane de Moraes. **Arquitetura e tecnologias computacionais: novos instrumentos mediadores e as possibilidades de mudança no processo projetual**. 2000. 173 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, Salvador.

REVISTA PROJETO. Consultores indicam como chegar a bons resultados. ST/Iluminação. São Paulo: Arco Editorial Ltda., 1993. n. 165. p. 75-76.

ROMERO, Marcelo de Andrade, TORRES, Cláudia. A utilização do software “Lumen Micro 5” no projeto de iluminação artificial: o caso do edifício da Companhia São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 1995.

ROY, Geoffrey G. **A comparative study of lighting simulation packages suitable for use in architectural design**. Murdoch University – School of Engineering, october 2000. Disponível na Internet: <http://www.arct.cam.ac.uk/research/cadlab/lighting/publications.html>. Acesso em: 14/05/02.

SERRA, Geraldo G. Teoria, Simulação e Modelo na Arquitetura. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 1995 p. 9-18.

SILVA, Adriane Borda da, et al. Pictórica o científica? La actividade de generación de imagenes sintpeticas en el contexto de enseñanza, In: SIGRADI, 2001. Concepción. **Anais...** Concepción: Universidad del Bio-Bio, 2001. p. 192-193

SILVA, Adriane Borda da, et al. **Representação, formalização e modelagem: identificando paradigmas nas práticas didáticas em expressão gráfica arquitetônica**. Bauru: Revista Educação Gráfica, 2002. n. 6. p. 155-165.

SILVA, Elvan. **Uma introdução ao projeto arquitetônico**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ UFRGS, 1998. 125 p.

SILVA, Francisco de A. Gonçalves da. **Conforto ambiental: iluminação de interiores**. João Pessoa: A União, 1992. 96 p.

SILVA, Heitor da Costa. Modelos: forma e conforto na arquitetura. In: SIGRADI, 2001. Concepción. **Anais...** Concepción: Universidad del Bio-Bio, 2001. p. 51-53

SÍNTESE de imagens realísticas. Disponível na Internet: <http://www.inf.pucrs/cg/Aulas/Iluminação/Ilumina.html>. Acesso em 04/11/02.

SOARES, Luiz Fernando Gomes. **Modelagem e simulação discreta de sistema.** São Paulo: IME-USP, 1990. 250 p.

SOARES, Renata Maria. Apresentações realísticas ajudam a vender projetos. **CADesign.** São Paulo: Market Press, 2000. n. 59. Mensal. ISSN 1413-2672. p. 18 - 22.

STRACHAN, Paul. The use of simulation modelling in low energy design in Europe. Seminário NUTAU, 1996. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, 1996.

STRÖHER, Eneida Ripoll (org.). **O tipo na arquitetura:** da teoria ao projeto. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2001. 208 p.

SZOKOLAY, Steven V., PEDRINI, Aldomar. Simulation programs: 'horses for courses'. 2000. In: 3. INTERNATIONAL CONFERENCE TIA 2000. **Proceedings...** Oxford, 2000.

THE global illumination solution: chapter 2. Disponível na Internet: http://www.maxshade.com/lummanual/ch2_solution.html. Acesso em 29/10/02.

THEMOTHEO, M. S. D. X. **O direito ao Sol:** uma análise do sombreamento de faixas de praia através do uso de simulação por computador. 2002. 177 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, Salvador.

UBBELOHDE, M. Susan. **Comparative evaluation of four daylighting software programs.** University of California, Berkeley. Disponível na Internet: <http://www.coolshadow.com/downloads/ACEEdaylighting.pdf>. Acesso em 04/07/02.

VIANNA, Nelson Solano & GONÇALVES, Joana Carla Soares. **Iluminação e arquitetura.** São Paulo: Virtus s/c ltda, 2001. 378 p.

WARD, Gregory J. **Tools for lighting design and analysis.** Disponível na internet: <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/sg96crs.pdf>. Acesso em 18/09/2002.

WHITTED, Turner. **An improved illumination model for shades display.** Communications of the ACM, New York. v.23. n.6. June, 1980.

ZUFFO, Marcelo Knörich, et al. Tutorial: introdução a computação gráfica. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL: ARQUITETURA E URBANISMO. **Anais...** São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, 1992. p. 31-42.

FONTES NA INTERNET

Sites relativos às ferramentas de simulação:

<http://radsite.lbl.gov/adeline> - **Adeline**
<http://radsite.lbl.gov/deskrad> - **Desktop Radiance**
<http://radsite.lbl.gov/radiance> - **Radiance**
<http://www.accurender.com> - **Accurender**
<http://www.autodesk.com> – **Autodesk Viz 4**
<http://www.bentley.com> - **Microstation**
<http://www.hnluz.com.br> - **Photolux**
<http://www.integra.co.jp> - **Specter**
<http://www.lighting-technologies.com> - **Lumen Micro**
<http://www.lighting-technologies.com> - **Simply Lighting**
<http://www.lightinganalysts.com> - **AGI 32**
<http://www.lightscape.com> - **Lightscape**

Sites relativos a associações, instituições e universidades:

<http://gbdi.icmc.sc.usp.br> - **Grupo de Base de Dados e Imagens da USP**
<http://www.arch.vuw.ac.nz> - **School of Architecture – Victoria University of Wellington – New Zealand**
<http://www.arct.cam.ac.uk> - **Department of Architecture of University of Cambridge**
<http://www.arquitetura.ufmg.br/tau/labcon> - **Laboratório de Conforto Ambiental da UFMG**
<http://www.arq.ufsc.br/~labcon> - **Laboratório de Conforto Ambiental da UFSC**
<http://www.epfl.ch>- **Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**
<http://www.ic.uff.br> - **Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense**
<http://www.inf.ufrgs.br> - **Instituto de Informática da UFRGS**
<http://www.labeee.ufsc.br> - **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**
<http://www.ufba.br/~lcad/> - **Laboratório de computação Gráfica Aplicada à Arquitetura e ao Desenho**
<http://www.ulbra.tche.br> - **Universidade Luterana do Brasil**
<http://www.umich.edu/> - **University of Michigan**
<http://www.usp.br> - **Universidade de São Paulo**
<http://www.usp.br/nutau> - **Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da USP**



APÊNDICE A
PROGRAMAS
ANALISADOS

ROTEIRO DE ANÁLISE

Nome do programa:

Lightscape

Versão analisada:

Release 3.2

Descrição:

Lightscape 3.2 ® é um aplicativo para estudos de iluminação e *rendering* que opera sem a necessidade de outros programas, a não ser o sistema operacional. Tem sido aperfeiçoado para complementar outros produtos do seu fabricante, **AutoCAD** e **3D Studio** (nas versões MAX e VIZ), na “renderização”⁹³ e animação, sendo útil na resolução de problemas de luminosidade em ambientes reais e digitais.

Através da simulação das propriedades da luz e dos materiais, o **Lightscape** realça efeitos luminosos dificilmente obtidos em sistemas convencionais de texturização, produzindo imagens de grande realismo, utilizando para isso efeitos de iluminação indireta, nuances de sombreamento e mistura de matizes.

Aplicações:

- Simulação dos efeitos da iluminação em um ambiente utilizando características físicas, luzes e materiais idênticos aos reais;
- Análise fotométrica quantitativa;
- *Rendering*, e
- Animação.

Características operacionais:

É um programa do tipo independente (*stand alone*) que opera em ambiente operacional **Windows 98, 95 ou NT**.

⁹³ Processo de geração de imagem texturizada, ou seja, imagem onde os objetos são exibidos com seus atributos de cor e textura, e inclui ainda as projeções de sombra e fontes luminosas.

Histórico:

Originalmente o programa foi produzido pela Lightscape® Visualization System sendo posteriormente adquirido pela Autodesk, que o comercializa. Esta empresa promoveu a migração da tecnologia para o **Autodesk VIZ 4**, sendo prevista a descontinuidade do **Lightscape**.

Dados do fabricante:

Nome: Autodesk, Inc.

Site na Internet: www.lightscape.com

Compatibilidade:

Com os programas **AutoCAD** e **3D Studio MAX** e **VIZ** e outros aplicativos CAD, já que importa arquivos do formato DXF.

Equipamento necessário:

Intel® Pentium® or Pentium® Pro, 200 MHz com 64 Mb de memória RAM, 1 Gb de espaço no HD, placa gráfica de 1024 x 768 x 256 com PCI bus, configuração mínima conforme recomendação do fabricante. Observou-se na prática entretanto que essas configurações não devem ser usadas para simulação de ambientes com maior complexidade.

Operacionalidade:

A interface do **Lightscape** possibilita rápido aprendizado, pois os comandos são de fácil assimilação, podendo ser acessados de várias maneiras, tais como, menus *pull-down*, ícones e menus de contexto. O programa importa formatos de arquivos gráficos vetoriais como o DXF, DWG e 3DS, que são muito utilizados em programas de texturização. O **Lightscape** não dispõe de recursos de modelamento, possui apenas uns poucos recursos para manipulação e edição de objetos. Inclui ainda uma biblioteca com um grande número de blocos de luminárias com atributos de iluminação e de materiais, com a possibilidade de criação e de edição de definições específicas.

O comportamento dos materiais é baseado em características físicas dos mesmos e as propriedades das fontes luminosas fundamentadas em leis físicas, incluindo cor, luminosidade e distribuição da intensidade luminosa. O programa possui também ferramentas para a visualização da distribuição de luz, através do nível de iluminamento ou luminância, sobre as superfícies do modelo.

Cálculo da iluminação:

O **Lightscape** calcula a iluminação através de dois algoritmos: *ray tracing* e Radiosidade.

Rendering:

O programa cria imagens sintéticas através de duas técnicas *OpenGL* e *ray tracing*. Esses métodos usam diferentes modelos de reflexão da luz, logo, as imagens criadas não parecem iguais quando texturizadas com um desses algoritmos. Ambos possibilitam uma variedade de resoluções de imagens e *antialiasing*, sendo este usado para suavizar as bordas dos “objetos” que compõem a imagem melhorando sua qualidade.

O *OpenGL* gera imagens com a mesma qualidade exibida na janela de gráfico⁹⁴, pode ser mais rápido, pois pode ser acelerado pelo *hardware*, mas é limitado ao *rendering* dos efeitos de iluminação direta e difusa da solução de radiosidade.

O *ray tracing* produz uma imagem de melhor qualidade, incluindo reflexões especulares e refração através de materiais transparentes, necessitando de um tempo maior para ser gerada. Possui duas opções para a texturização da imagem: o traçado de raios de iluminação direta, que traça contribuições luminosas diretas de fontes de iluminação; e o *OpenGL* compatível, que força a texturização compatível com a exibição do *rendering OpenGL*, porém não possui alta qualidade. O **Lightscape** possibilita ainda usar o *ray tracing* apenas numa área selecionada antes do processamento do modelo como um todo de modo a testar os efeitos de mudanças nas propriedades dos materiais no modelo corrente.

⁹⁴ Parte da tela do **Lightscape** onde é exibido e editado o modelo corrente.

Animação:

As animações podem ser exibidas na tela (janela de gráfico) ou texturizadas, gravando-se como quadros individuais. O caminho da câmera é criado definindo-se uma série de *keyframes*⁹⁵ e um caminho conectando-os. Pode-se controlar a velocidade da câmera e a direção na qual a câmera focaliza ao longo da trajetória pré-definida.

Análise fotométrica quantitativa:

A análise da iluminação é utilizada para visualizar a distribuição de luz sobre as superfícies do modelo usando a técnica *pseudo-color* ou pela sobreposição do *grid* de valores de iluminação sobre a superfície selecionada, avaliando o desempenho fotométrico da cena.

A técnica *pseudo-color* é utilizada para ilustrar a distribuição de luz diretamente sobre as superfícies de um ambiente e são usadas para visualizar luminância ou o iluminamento do modelo usando uma escala linear ou logarítmica⁹⁶.

A análise quantitativa da iluminação é feita através da obtenção de dados estatísticos e a determinação de critérios para avaliar a luminância ou o iluminamento de uma superfície dados através dos valores no ponto escolhido, média da iluminação da superfície e valores de máximo e mínimo. Pode-se exibir uma grade de pontos amostrais com seus valores de luminância ou iluminamento para uma superfície selecionada, ou usar *workplanes*⁹⁷ para verificar se os níveis de luminância produzidos por um sistema de iluminação proposto satisfazem às diretrizes recomendadas para a sua função.

Recursos disponíveis:

A biblioteca do **Lightscape** contém uma grande quantidade de materiais para os trabalhos de *rendering* e blocos diversos para o modelamento. Os símbolos

⁹⁵ Quadro-chave – elemento principal do processo de animação definido pelo usuário. O computador utiliza esses quadros para determinar os quadros intermediários através de interpolação.

⁹⁶ Mais utilizada quando a iluminação das superfícies de interesse é baixo comparado à iluminação máxima da cena.

⁹⁷ *Workplanes* são superfícies que não aparecem na imagem final. Eles substituem sensores luminosos e não refletem luz incidente, logo o programa não exibe valores de luminância para essas superfícies.

(luminárias) específicos de iluminação são dotados de atributos que definem suas propriedades fotométricas.

Os símbolos (blocos) estão organizados segundo a progressão de muitos projetos, contendo blocos de geometria, para criar formas básicas diferentes e ambientes, blocos construtivos, blocos de móveis, decalques de composição paisagística e de pessoas.

As luminárias existentes são divididas em acessórios para interior e exterior da edificação, lâmpadas comuns e de fabricantes conhecidos. As luminárias representam a aparência física e as propriedades fotométricas de um acessório de iluminação. Estas propriedades são definidas pelo tipo de fonte (linear, pontual ou de área), cor da lâmpada, grandeza da intensidade definida pelas grandezas fotométricas conhecidas como a intensidade luminosa, fluxo luminoso e iluminamento, e distribuição da intensidade luminosa que descreve como a luz emitida varia com a direção tomada.

Os materiais determinam a aparência de uma superfície (cor e textura), assim como a quantidade de luz que ela reflete para o ambiente. As propriedades que determinam como um material interage com a luz são: a cor, que determina a refletância (quantidade de energia luminosa que é refletida de uma superfície); a transparência, que determina quanto da luz passa através do material; o brilho, que afeta o aparecimento de vistas de reflexões especulares de um material; e o índice de refração que determina o comportamento da luz na interface entre duas superfícies.

Etapas de trabalho:

1. Importação do modelo geométrico tridimensional:

Não sendo um programa com recursos para o modelamento, é necessário modelar o ambiente em outro programa e importá-lo para o **Lightscape** que foi concebido para complementar e interfacear com os *software* CAD existentes.

2. Orientação das superfícies:

Após a importação, as superfícies do modelo devem ser orientadas para que as reflexões luminosas sejam calculadas do lado correto, ou seja, os vetores normais das superfícies devem estar voltados para o interior do ambiente, no caso de iluminação interna. Isto é feito selecionando a superfície e, através de um menu de contexto, ativando a opção orientar a superfície. Se a superfície selecionada estiver na cor verde, ela está orientada de forma incorreta.

3. Atribuição de materiais:

Deve-se atribuir materiais às superfícies de todos os objetos, definindo seus parâmetros de cor, textura (se necessário), transparência, brilho e refletância. O **Lightscape** oferece modelos para definir as propriedades dos principais tipos de materiais (ex.: metais, plásticos, vidros, etc.), que são aplicados às superfícies dos objetos através da seleção dos mesmos.

4. Especificação da iluminação:

Pode-se importar as fontes luminosas (lâmpada e/ou luminária) a partir da biblioteca do **Lightscape** ou definir blocos como luminárias dando-lhes propriedades fotométricas. Pode-se definir qualquer distribuição fotométrica que se queira ou implementar distribuições específicas segundo os fabricantes. Uma luminária é definida através das seguintes propriedades: tipo de fonte luminosa, posicionamento da fonte em relação à geometria da luminária, cor da luz emitida pela fonte, grandeza e distribuição da intensidade.

5. Cálculo da radiosidade:

Radiosidade é o cálculo físico para determinação de como as luzes reagem com os materiais (do mundo real) em ambientes 3D. A flexibilidade do sistema permite escolher entre velocidade e qualidade da imagem, dependendo do nível de detalhe pretendido para uma determinada tarefa.

É preciso definir os parâmetros de processo (calcular sombra, armazenar iluminação direta e definição do traçado de raio da iluminação direta), inicializá-

lo e processar a radiosidade. Nesta etapa o arquivo de preparação é transformado em arquivo de solução e todos os blocos são explodidos⁹⁸.

6. Análise fotométrica:

Por detrás do realismo do **Lightscape** existem informações valiosas sobre a luminosidade. O que permite assegurar níveis de iluminação para cada superfície. Pode-se visualizar a distribuição luminosa através da técnica *pseudo-color* usando cores ou a escala de cinzas.

7. Definição do percurso da animação:

O **Lightscape** possui ferramentas de uso fácil para a definição de trajetórias de câmeras para animações de forma a poder aumentar a qualidade final dos filmes e vídeos. Pode-se definir um caminho na qual a câmera se movimenta e para onde ela é direcionada.

8. Estudo para fontes de luz alternativas:

Pode-se experimentar a variação quantitativa e qualitativa das fontes luminosas até se obter o ambiente pretendido. Para isso, basta modificar as propriedades da fonte e continuar o processamento da radiosidade.

9. Adicionar luz solar:

A configuração da luz solar do **Lightscape** permite visualizar a luz solar passando através de uma janela, gerando deste modo as verdadeiras ambiências em qualquer localização geográfica, numa determinada data, a uma dada hora e com determinadas condições atmosféricas.

10. Edição ou reatribuição de materiais:

Com o **Lightscape**, pode-se alterar as características dos materiais sem ter de reiniciar o processo de radiosidade, testando variações de cor e materiais em tempo real.

⁹⁸ Transformar um objeto composto, tal como o bloco, em seus objetos componentes.

11. Texturização

A geração de imagens é feita através da determinação do nome e formato de saída da imagem, sua resolução, o nível de *antialiasing*, e a configuração do traçado de raios, através da determinação do traçado para a iluminação direta e para a geração de sombras e do número de raios a serem calculados.

Tipos de Arquivos Utilizados :

No **Lightscape** são empregados os seguintes tipos de arquivos:

a) Arquivos de importação

- DXF (**AutoCAD** e *facto standard*)
- DWG (**AutoCAD**)
- 3DS, PRJ (**3D Studio**)⁹⁹
- LWS (**Newtek Lightwave 3D**)

b) Arquivos nativos:

- | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|-------|
| • <i>Animation File</i> | Arquivo de animação | (LA) |
| • <i>Parameters File</i> | Arquivo de parâmetros | (DF) |
| • <i>Block Library File</i> | Arquivos de biblioteca de blocos | (BLK) |
| • <i>Preparation File</i> | Arquivo de preparação | (LP) |
| • <i>Layers State File</i> | Arquivo de <i>layer</i> | (LAY) |
| • <i>Solution File</i> | Arquivo de solução | (LS) |
| • <i>Material Library File</i> | Arquivo de biblioteca de materiais | (ATR) |
| • <i>View File</i> | Arquivo de vistas | (VW) |
| • <i>Material Map File</i> | Arquivo de mapa de materiais | (MM) |

c) Arquivos de exportação

- Panorâmico
 - Generic Image (BMP; TGA; TIF; RGB; JPG; PNG; EPS)
 - RealSpace (IVR)
 - IBM PanoramIX (PAN)
 - VRML¹⁰⁰ 2.0 (*background*) (WRL)

⁹⁹ Para a importação de arquivos do **3D Studio MAX** e **VIZ** é preciso utilizar o *plug-in* MAX2LP.

¹⁰⁰ *Virtual Reality Modeling Language* (linguagem de modelagem de realidade virtual)

- VRML (WRL)
- d) Arquivos de imagem texturizada
- Tiff (TIF)
 - Targa (TGA)
 - Postscript (EPS)
 - Windows bitmap (BMP)
 - JPEG (JPG)
 - Portable Net Graphics (PNG)
 - SGI RGB (RGB)

Modos de Saída:

- Saída de imagens em 24 ou 48 bits por *pixel*, independente da resolução geométrica da mesma;
- Canal alpha de 8 bits para composição de imagem;
- *Field rendering* para animações por quadros;
- Imagem 360° geradas para *QuickTimeVR*, *RealSpace* ou aplicações similares, e
- As soluções de radiosidade 3D (arquivos LS) podem ser exportadas para os formatos do **3D Studio MAX/VIZ** e para o **LightWave 3D** usando os *plug-in LS2MAX* e *LS2LW* respectivamente.

ROTEIRO DE ANÁLISE

Nome do programa:

Lumen Micro

Versão analisada:

2000

Descrição:

Ferramenta voltada para o projeto especificação e análise de iluminação, com soluções de iluminação natural e artificial para ambientes internos ou externos.

Aplicações:

Criar e simular *layouts* de iluminação para aplicações internas e externas, com um módulo para configuração de postes e outro para cálculo de vias públicas.

Características operacionais:

É um programa do tipo independente (*stand alone*) que opera em ambiente operacional **Windows 2000, 98, 95 ou NT.:**

Dados do fabricante:

Nome: Lighting Technologies Inc.

Site na Internet: www.lighting-technologies.com

Compatibilidade:

Com o programa **Lightscape**, através do tradutor **LM7 / LIGHTSCAPE** permitindo gerar imagens fotorealísticas dos projetos feitos no **Lumen Micro**, com o **AutoCAD** e outros aplicativos CAD, já que permite importação e exportação de arquivos nos formatos DWG e DXF.

Equipamento necessário:

Pentium 133, com *drive* de CD-ROM, 64 Mb de memória RAM, 60 Mb de espaço no HD e placa de vídeo SVGA, configuração mínima conforme recomendação do fabricante.

Operacionalidade:

Ambientes, objetos e luminárias podem ser inseridos, movidos, copiados e apagados com o uso do *mouse*;

Vistas tridimensionais permitem excelente capacidade de visualização e manipulação; e

Importa e exporta arquivos DXF e DWG, inclusive com suporte para o **AutoCAD 2000**.

Cálculo da iluminação:

Para iluminação externa oferece um recurso de cálculo automático, ou seja, para cada mudança efetuada, o programa calcula imediatamente o seu efeito sobre o projeto luminotécnico. Além disso, o programa calcula a quantidade de luminárias a partir da definição do nível de iluminação desejado.

O cálculo da iluminação é feito a partir da definição de um *grid* de cálculo, podendo ser realizado para uma superfície horizontal, vertical e para uma superfície selecionada qualquer, além de calcular o VCP (*visual comfort probability*) impacto do brilho das luminárias diretas no conforto dos ocupantes, e o RVP (*relative visual performance*) impacto causado pela iluminação na performance visual através da determinação do ângulo de visão e do tipo de tarefa a ser desenvolvida.

Os cálculos são efetuados considerando os seguintes aspectos:

- *Quick Calcs* – considera somente a componente direta da iluminação de forma a obter resultados simples de forma rápida;
- *Detailed Calculations* – calcula as componentes diretas da iluminação e as interreflexões;
- *Auto Recalc* – quando habilitada, o programa recalcula automaticamente cada *grid* definido para áreas externas caso alguma luminária tenha sido modificada ou adicionada;

- *Daylighting Calculations* – considera o efeito da luz natural incidente no ambiente sob análise;
- *Renderings* – considera as componentes diretas e interrefletidas na geometria do ambiente para gerar a representação gráfica da iluminação; e
- *Average Illuminance Level* – para cada ambiente do projeto, o programa calcula o nível médio de iluminância e a potência unitária, informando-as na barra de *status*. É calculado através do método das cavidades zonais e deve ser usado como estimativa.

Rendering:

O *rendering* é gerado se a opção for habilitada no momento da seleção do tipo de cálculo a ser efetuado. Após o cálculo, a texturização, em tons de cinza ou colorida, pode ser visualizada somente em perspectiva, sendo necessário uma nova texturização para cada posição de câmera definida.

Recursos Disponíveis:

Disponibiliza uma biblioteca de luminárias de aproximadamente 20.000 produtos de 70 fabricantes¹⁰¹ e inclui também uma biblioteca de objetos pré-definidos que podem ser adicionados ao projeto, incluindo divisórias, paredes, mesas e cadeiras.

Permite elaborar relatórios de iluminação detalhados incluindo qualquer uma das formas de saída, além de informações do projeto, do cliente e da empresa, através do *Report Manager* e criar uma saída de formato personalizado para impressão com o *Custom Output Generator*.

Etapas de trabalho:

1. Construção do modelo:

O modelo é construído dentro do próprio programa através de ferramentas acessadas por uma caixa de diálogos que permite somente a criação de ambientes ortogonais. As geometrias importadas de outros modeladores funcionam apenas como referência visual, não sendo considerados nos cálculos.

¹⁰¹ A biblioteca de luminárias existente não inclui produtos de fabricação brasileira.

O modelo é definido por um nome, dimensão, origem e refletâncias das paredes, piso e teto. Devem ser definidas também a altura do plano de trabalho e a iluminância média necessária para o ambiente.

2. Inserção de objetos:

Nesta etapa podem ser inseridos objetos, tais como cadeiras, mesas, pilares e vigas, da biblioteca do programa, definidos a partir de sua posição, dimensões e refletância.

3. Especificação das aberturas:

Todas as aberturas para o exterior devem ser especificadas como janelas a partir das suas dimensões, posicionamento, tipo (transparente ou difusa), refletância¹⁰² e transmitância¹⁰³.

4. Adição de painéis:

Um painel é um elemento considerado no cálculo como sendo qualquer superfície adicionada sobre a parede, teto ou piso, tal como uma porta ou um quadro, que serve para compor visualmente o ambiente, sendo definidas através de sua posição, tamanho e refletância.

5. Especificação das luminárias:

As luminárias podem ser especificadas através da biblioteca existente no programa; através da importação de arquivos IES¹⁰⁴, CIBSE (TM 14)¹⁰⁵ e EULUMDAT¹⁰⁶, que contêm a distribuição luminosa da luminária; ou criando-se luminárias a partir das existentes, modificando suas propriedades;

¹⁰² Fração da luz incidente na superfície interna da janela que é refletida para o ambiente, sendo relacionada à cor da superfície.

¹⁰³ Fração da luz incidente sobre a superfície externa da janela que é transmitida através dela para o ambiente.

¹⁰⁴ Padrão americano de formato de dados para armazenamento da distribuição luminosa de luminárias.

¹⁰⁵ Padrão britânico de formato de dados para armazenamento da distribuição luminosa de luminárias, definido no Memorando Técnico da CIBSE cujo título é *Standard file format for transfer of luminaire photometric data*.

¹⁰⁶ Padrão de formato de dados europeu para armazenamento da distribuição luminosa de luminárias.

6. Especificação do *grid* de cálculo:

Para a realização dos cálculos, um *grid* deve ser especificado a partir da definição do tipo a ser utilizado (horizontal, vertical ou definido a partir da superfície das paredes ou de um objeto, considerando todo o ambiente ou parte dele), o tipo de cálculo a ser efetuado, a saída como será exibido e suas propriedades (nome, origem, número de linhas e colunas e espaçamento).

7. Cálculo da iluminação:

Com todas as etapas anteriormente mencionadas concluídas, é preciso especificar o tipo de cálculo a ser realizado, que pode ser feito de seis maneiras: para o projeto inteiro (incluindo a edificação e o sítio de implantação), no piso corrente, no ambiente corrente, somente no sítio, em pisos selecionados e em ambientes selecionados. Nessa etapa deve ser informado se haverá cálculo da iluminação natural e produção do *rendering*. Caso a opção de iluminação natural seja habilitada, pode-se especificar a latitude, longitude e orientação do ambiente, a refletância do piso externo, o dia, mês e horário da simulação e as condições do céu (limpo, parcialmente nublado ou nublado). Nos cálculos da iluminação, o processamento da reflexão considera as superfícies como lambertianas, não permite o uso de superfícies inclinadas e curvas, e não considera as informações importadas de outros programas durante o cálculo.

8. Saída dos resultados:

Após a finalização dos cálculos, os resultados podem ser analisados através da visualização do ambiente texturizado e a conseqüente geração de imagens, a visualização dos relatórios de iluminação em tabelas de valores numéricos ou através de gráficos, podendo ser impressos ou exportados em formato HTML.

Tipos de arquivos utilizados:

No **Lumen Micro** os seguintes tipos de arquivos são empregados:

a) Arquivos de importação

- DXF / DWG – apenas como informação de referência (*background*), que não é considerada no cálculo.

- b) Arquivos nativos:
 - Arquivo de desenho (DES)
 - *Template* de configuração (CFG)
- c) Arquivos de saída:
 - Arquivo de *render* (BMP)
- d) Arquivos de exportação
 - DXF / DWG – somente exporta a informação de geometria do modelo.
 - LP (*Lightscape preparation file*) – exporta a geometria do modelo, informações sobre refletância dos materiais e a fotometria da luminária.
 - HTML (*HyperText Markup Language*) – linguagem usada para criar documentos para utilização na Internet.

Modos de Saída¹⁰⁷:

- *Room/Site Summary Output* – relatório simples com informações do ambiente ou sítio corrente contendo informações sobre o cálculo (iluminância e potência), dimensões do ambiente, refletâncias das superfícies e custo, tipo, quantidade e informações sobre a posição das luminárias, além dos dados de entrada;
- *Project Summary Output* – relatório que fornece informações sobre o projeto, ambientes e luminárias existentes;
- *Daylighting Summary Output* – relatório com informações sobre as configurações da iluminação natural tais como a localização e orientação do ambiente, data e hora da simulação, condição da abóbada celeste especificada, entre outros;
- *Luminaire Schedule Output* – resumo de todas as informações sobre um tipo de luminária, podendo incluir informações sobre a lâmpada utilizada;
- *Calculation Results* – exhibe resultados numéricos de um tipo de cálculo especificado para um determinado *grid*. Pode ser visualizado como uma tabela de valores numéricos ou na forma de um gráfico representando as curvas isolux;
- *Rendering* – gera imagens texturizadas em escala de cinza ou coloridas;

¹⁰⁷ Todas os modos de saída podem ser impressos e, para aqueles baseados em texto, podem ser exportados individualmente em formato HTML.

ROTEIRO DE ANÁLISE

Nome do programa:

Desktop Radiance

Versão estudada:

1.02

Descrição:

É uma ferramenta usada para estudos de sistemas de iluminação natural e artificial existentes ou projetados. Permite a obtenção dos níveis de iluminação do ambiente em estudo, assim como a visualização dos efeitos do projeto de iluminação aumentando sua eficiência quantitativa e qualitativa.

Aplicações:

É usado para modelar sistemas de iluminação natural e artificial, simples ou complexos, sendo sua principal finalidade a análise luminosa. Com o **Desktop Radiance** pode-se calcular a iluminância através de um *grid* de pontos ou gerar uma imagem texturizada do espaço.

Características operacionais:

É um programa do tipo dependente (trabalha como um módulo *plug in* dentro do **AutoCAD r14** ou **AutoCAD 2000** usando menus *pull-down*) que opera em ambiente operacional **Windows**.

Histórico:

O *software* **Desktop Radiance 1.02** é um aplicativo desenvolvido a partir da ferramenta **Radiance Synthetic Imaging System**¹⁰⁸ de forma a melhorar sua texturização e os resultados analíticos.

¹⁰⁸ Inicialmente desenvolvida como ferramenta de pesquisa para ambiente UNIX.

Dados do fabricante:

Nome: Lawrence Berkeley National Laboratory, pela Environmental Energy Technologies Division e pelo Building Technologies Department

Site na Internet: <http://radsite.lbl.gov/deskrad>

Operacionalidade:

O programa foi criado para operar no sistema operacional **Windows** e cria um arquivo de entrada padrão¹⁰⁹ usado na versão **Unix**, então executa o programa Radiance padrão através de um *batch file* **MS-DOS**. Estes aspectos do *software* são transparentes¹¹⁰ desde que administrados através dos menus *pull-down* no **AutoCAD** e no **Simulation Manager** do **Desktop Radiance**.

Cálculo da iluminação:

O **Desktop Radiance** opera usando inicialmente o *ray tracing*, utilizado para gerar a texturização do espaço e melhorar os cálculos da iluminação. Raios são traçados da posição da câmara para cada superfície que é visível na vista para calcular a cor e intensidade atribuída a cada *pixel* da imagem. Alguma interpolação deve ser feita entre *pixels* individuais. Uma análise similar é realizada para os cálculos da iluminância horizontal considerada nos pontos de referência e *grid* de referência. Para cada raio que é traçado para a superfície do ambiente, um número de raios adicionais são considerados até que o raio de luz alcance a fonte. A distribuição desses raios é baseada nas propriedades dos materiais refletores das superfícies.

Uma desvantagem desta técnica é que um novo cálculo é requerido para cada posição de câmara ou ponto de análise. É possível salvar um arquivo de iluminação de um ambiente para futuras análises.

A vantagem da técnica do *ray tracing* é que um espaço razoavelmente complexo pode ser texturizado em uma quantidade de tempo relativamente baixa. O tempo que o programa leva para processar uma texturização ou um cálculo depende dos parâmetros de processamento que são definidos para aquela simulação.

¹⁰⁹ *Standard text – based input files*

¹¹⁰ Não são visualizados durante sua execução.

Para melhor os cálculos, o programa considera a componente espectral das fontes de luz e as características espectrais da superfície refletora ou transmissora usando a equivalente composição RGB da fonte de luz e de cada propriedade dos materiais. As componentes RGB correspondem ao sistema de especificação de cor que é correlacionada às cores típicas de fósforo usadas nos monitores de computadores.

Rendering:

Há dois modos diferentes de processar as imagens texturizadas:

- Interativo

Utiliza o módulo do programa **Rview**¹¹¹, que produz uma texturização iniciando com uma imagem grosseira que vai sendo refinada progressivamente usando retângulos menores na tela. A texturização pode ser parada a qualquer momento para modificar os parâmetros de visualização ou para fazer o traçado de raio de uma superfície de modo a determinar a iluminância ou luminância dessa superfície.

O programa possui 6 opções que permitem modificar várias características usadas para processar a texturização ou que permitam questionar a vista para determinar valores de iluminância ou luminância na superfície. São elas:

- modificar a exposição da imagem ajustando a abertura da câmara;
- refinar a imagem com uma região selecionada;
- iniciar uma nova texturização;
- mudar os parâmetros de processamento;
- fazer o traçado de raio na imagem com o objetivo de determinar a luminância ou iluminância no ponto; e
- modificar os parâmetros de visualização, tais como a posição da câmara, o ângulo de visão, entre outros.

Neste processo, a imagem é visualizada enquanto ocorre a texturização.

¹¹¹ Programa para visualização interativa do *rendering* da simulação.

- *Batch processing*

É uma maneira mais rápida de gerar a imagem onde a texturização é criada no *background*, salvando o trabalho em contínuas atualizações da imagem na tela. A imagem texturizada é exibida usando o programa de visualização **Winimage**.

Análise fotométrica quantitativa:

A análise da iluminação no programa pode ser feita das seguintes maneiras:

- Pontos de referência únicos;
- *Grid* de pontos de referência (para cálculo da iluminância horizontal); e
- Detalhes gerais texturizados do modelo, através dos quais a luminância ou a iluminância da superfície podem ser analisadas a depender de qual escolha de representação foi usada para criar a texturização na tela do “*Simulation Manager*”.

Recursos Disponíveis:

- Biblioteca de materiais, onde os materiais são divididos em dois grupos caracterizados como material opaco refletor, metal ou plástico, ou como material transparente. O material opaco é definido pela sua cor (em RGB), especularidade e rugosidade, e o material transparente é caracterizado por sua especularidade, cor, rugosidade e transparência.
- Biblioteca de luminárias, não sendo permitido a inserção de arquivos fotométricos IES¹¹².
- A luz natural é especificada pelos parâmetros de localização, orientação, hora e dia da simulação e condição do céu, podendo este ser claro, parcialmente nublado, nublado ou uniforme¹¹³.

¹¹² Formato de arquivo que contém as propriedades fotométricas de uma luminária, tais como seu fluxo luminoso ou intensidade luminosa e sua curva de distribuição luminosa.

¹¹³ Um céu uniforme não é uma condição comum da natureza, mas é, algumas vezes, usado para analisar o modelo.

Etapas de trabalho:

1. Construção do modelo

O modelo geométrico tridimensional deve ser construído ou importado para o ambiente do **AutoCAD** onde as superfícies podem ser construídas usando polígonos 3Dfaces, objetos tridimensionais, linhas com *thickness*¹¹⁴ e formas extrudadas ou de revolução. É importante considerar todos os detalhes que interfiram na quantidade de luz que incide ou é refletida no espaço. Para os cálculos da luz natural é importante modelar apropriadamente o exterior da edificação, ou seja, superfícies que causam impacto na quantidade de luz no espaço, tais como o piso, objetos que obstruam ou reflitam a luz e elementos de controle.

2. Organização do modelo

Os objetos do modelo devem ser organizados em camadas baseadas nos materiais que deverão ser aplicados às superfícies.

3. Atribuição de materiais

Todas as superfícies devem ter um material atribuído que pode ser opaco refletor, como metal ou plástico, com reflexão difusa, especular ou semi-especular, ou um material envidraçado. Em geral, todas as superfícies são consideradas *double sided*, onde o material é atribuído a ambos os lados, à exceção das superfícies envidraçadas, onde a orientação é importante.

A orientação, quando usando o comando *3Dface*, deve ser feita adotando a regra da mão direita, especificando os pontos, em torno de 3 ou 4, formando os lados do polígono, no sentido anti-horário, sendo visualizado de dentro do ambiente. Para superfícies criadas usando outras funções de desenho, é necessário verificar a orientação da superfície normal para certificar que está faceando internamente o ambiente usando o comando *Adjust Surface Normal* do menu **Radiance/Tools**.

¹¹⁴ Extrusão de uma linha com a direção Z para formar um polígono (superfície opaca).

4. Posicionamento de luminárias

Somente podem ser adicionadas as luminárias existentes na biblioteca do programa, não podendo inserir arquivos fotométricos IES no modelo. A biblioteca de luminárias contém uma descrição física das superfícies da luminária, com os materiais aplicados e os dados representativos da intensidade da luminária. São geralmente luminárias genéricas listadas no “1993 IESNA Lighting Handbook”¹¹⁵. Em geral, contêm somente um plano único de dados fotométricos que não devem ser usados para detalhar cálculos de projeto. Embora emitam um número correto de lumens, não são necessariamente na direção correta desde que todos os planos horizontais tenham sido alcançados em média.

5. Preparação da simulação

Após os passos anteriores, tem-se que fazer uma análise ou texturização do espaço considerando a luz do dia e (ou) a iluminação artificial.

Para calcular a iluminância, deve ser especificado inicialmente um ponto ou um *grid*. Para produzir a texturização do espaço deve-se dar um nome a câmara e fornecer a distância focal da lente em milímetros (20 mm é um bom tamanho inicial para visualização), que determinará ângulo de visualização da cena.

Deve-se determinar a posição e orientação da câmara no modelo, especificando um ponto de inserção (x,y), o ângulo de rotação e a altura da câmara.

Depois de definida a câmara, a posição do ponto de análise ou do *grid*, eles não podem ser mais movidos, por isso, para modificá-los é preciso apagar e posicionar um novo ponto.

¹¹⁵ Publicação da IESNA contendo conceitos, técnicas, aplicações, procedimentos e ilustrações sobre iluminação.

6. Processando a simulação

Executando a simulação, os cálculos de iluminância são realizados ou uma texturização é criada. Para isso é preciso, inicialmente, selecionar um ponto de referência, um *grid* ou uma câmera, já especificados anteriormente, dar um nome ao cenário e selecionar as superfícies incluídas na análise. Então serão especificados os dados de entrada e os parâmetros de controle do cálculo, tais como a hora, o dia, a localização (latitude e longitude) e as condições do céu (claro, parcialmente nublado, nublado ou uniforme). Para realizar a análise da iluminação natural é necessário que o modelo tenha janelas ou aberturas para o exterior.

7. Obtenção dos resultados

Para um *grid* de referência o resultado é dado a partir de uma tabela de valores. A simulação de câmera tem como resultado uma imagem texturizada, que pode também ser visualizada em falsa cor, com contorno de isolux ou com a emulação da sensação visual humana.

Tipos de arquivos utilizados:

a) Arquivos nativos:

- Descrição da cena (RAD) – arquivo que descreve os materiais e a geometria para o programa de *rendering*.
- Arquivo de função (CAL) – arquivos que descrevem matematicamente padrões, texturas e forma das superfícies.
- Arquivo de dados (DAT) – arquivo usado para interpolar valores entre a fotometria das luminárias e outros objetos.
- Arquivo de fonte (FNT) – arquivo com padrões de texto utilizados.
- *Octree* (OCT) – arquivo de descrição da cena.
- Picture (PIC) - formato de arquivo de imagem, acessível somente através do programa **Winimage** que converte a imagem em diferentes formatos, tais como GIF, TIF, PCT, EPS e BPM.
- Pontos (PTS) – arquivo com as informações da simulação de um ponto ou um *grid* de referência.

- *Z-buffer* (ZBF) – arquivo que armazena as distâncias para cada *pixel* numa imagem correspondente.
- *Ambient file* (AMB) – arquivo usado para armazenar valores de interreflexão difusa.

b) Arquivos de saída:

- RIF - formato de arquivo usado para salvar uma vista como um texto para ser utilizada em uma simulação.
- VF – formato de arquivo usado para salvar as informações de uma vista como um texto.
- GIF, TIF, PCT, EPS e BPM – formatos de arquivos de imagens.

Modos de Saída:

- Análise numérica através de pontos de referência únicos ou *grid* de pontos (PTS);
- Imagens texturizadas em formato próprio do programa (PIC);
- Imagens em falsa cor ou com contornos de isolux (PIC); e
- Análise humana sensitiva traduzida numa variedade de filtros não lineares e lineares de imitação da visão humana (PIC).

O nome dos arquivos de imagem ou de pontos é dado pelo nome do cenário, seguido pela denominação dada à câmera ou ao *grid*, com a extensão correspondente. Para as imagens em falsa cor e com as linhas de isolux é acrescentado ao nome do arquivo o sufixo “_fls” ou “_iso” respectivamente, mantendo o formato e a extensão PIC.

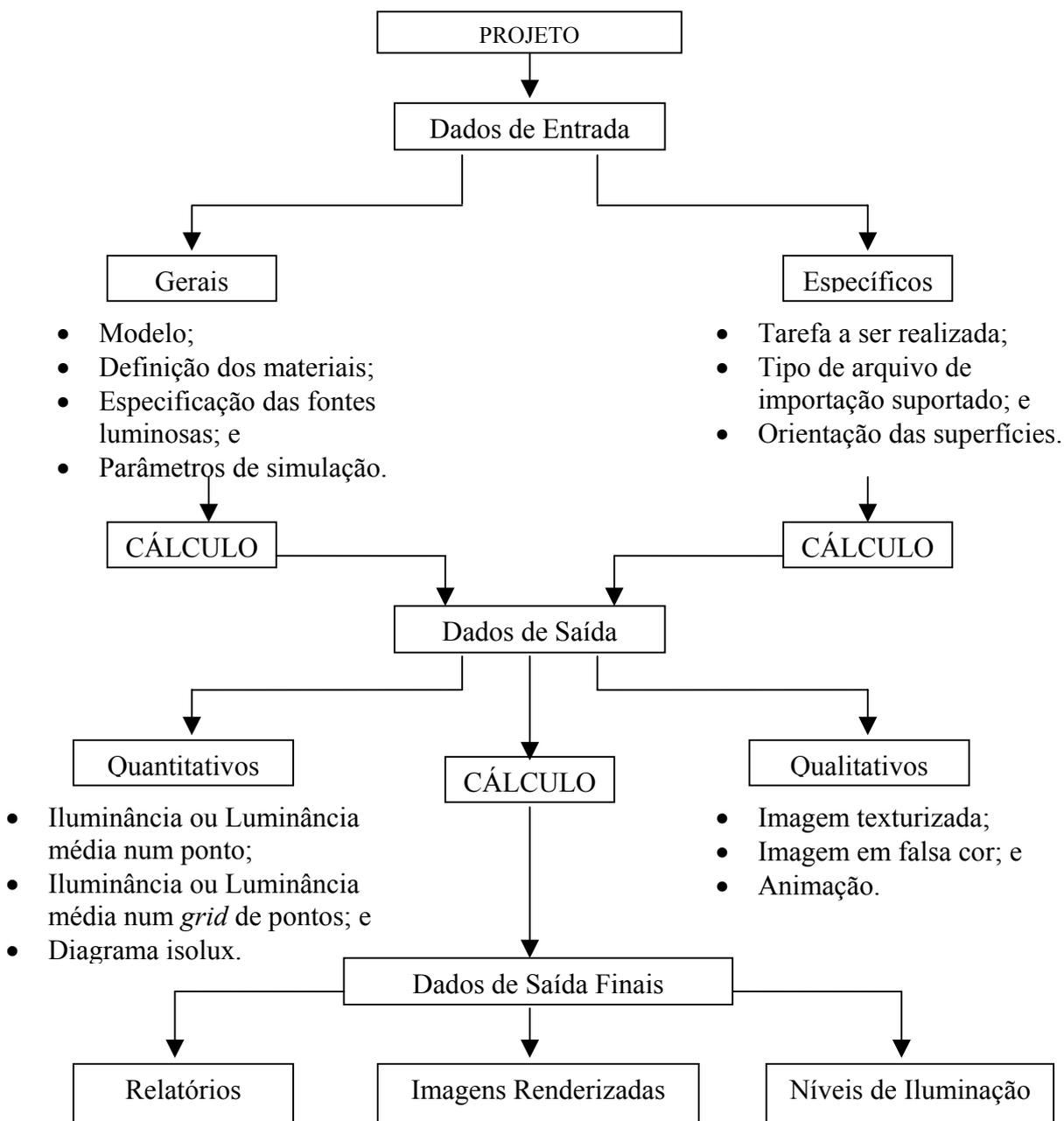
Quadro resumo comparativo das características dos programas analisados

PROGRAMAS / CARACTERÍSTICAS	LIGHTSCAPE	LUMEN MICRO	DESKTOP RADIANCE
Modelagem	Importa modelos em DXF, DWG e 3DS	Permite modelagem no programa, mas somente de ambientes ortogonais	Modelagem feita com os recursos do AutoCAD ou importado por ele
Interface	Fácil aprendizado	Fácil aprendizado	Pouco interativa
Funcionamento	<i>Stand Alone</i>	<i>Stand Alone</i>	<i>Plug-in</i> do AutoCAD
Recursos disponíveis	Biblioteca de materiais, de fontes luminosas e de blocos de mobiliário e equipamentos	Biblioteca de luminárias e de blocos de mobiliário e elementos construtivos	Biblioteca de materiais e luminárias
Modelo de iluminação utilizado	Radiosidade e <i>Ray Tracing</i>	Radiosidade e <i>Ray Tracing</i>	<i>Ray Tracing</i>
Resultados obtidos	Imagem fotorealística e em falsa cor e valores de iluminação em ponto simples ou <i>grid</i> de pontos	Imagem texturizada, diagrama isolux, valores dos níveis de iluminação em um <i>grid</i> de pontos Possibilidade de impressão de relatórios alfanuméricos com os resultados	Imagens texturizadas e em falsa cor, diagrama isolux, valores de iluminação em um ponto de referência ou em um <i>grid</i> de pontos e análise humana sensitiva

APÊNDICE B

DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS NAS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

APÊNDICE B – Diagrama de fluxo de dados nas ferramentas de simulação



Fonte: ROMERO, Marcelo de Andrade, TORRES, Cláudia. A utilização do *software* “Lumen Micro 5” no projeto de iluminação artificial: o caso do edifício da Companhia São Paulo. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo - NUTAU, 1995.



APÊNDICE C

GLOSSÁRIO

GLOSSÁRIO

Algoritmos de simulação – processos utilizados para simular o aspecto, a operação e o desempenho de um fenômeno, objeto ou situação utilizando uma seqüência de regras baseadas em cálculos numéricos para a solução de problemas.

Aliasing – artefato visual que produz um efeito serrilhado no contorno das superfícies e sombras, devido à baixa taxa de amostragem.

Atenuação – perda de intensidade do raio luminoso a medida que a distância da fonte ao alvo aumenta.

Biblioteca – conjunto de elementos com seus atributos previamente definidos, tais como móveis, carros, vegetação, materiais e fontes luminosas, que podem ser inseridos no modelo geométrico.

Bloco – agrupamento de objetos em um único que é definido com um nome e um ponto de inserção.

Brightness (brilho) – usado para denotar a intensidade percebida de um objeto que emite luz.

Bump Mapping – algoritmo para a emulação de textura rugosa em uma superfície lisa, que consiste na “pertubação”, de acordo com uma mapa de textura, da direção da normal a superfície numa dada posição. As condições de iluminação neste ponto são alteradas, produzindo com isso a aparência de rugosidade.

Cena – visualização do cenário a partir de um ponto de vista determinado.

Cenário – conjunto de objetos e fontes luminosas que compõem o modelo tridimensional.

Curva de isolux – linha traçada sobre um plano ligando os pontos de mesma intensidade de iluminação.

Curva fotométrica – curva que representa a variação da intensidade luminosa de um fonte segundo um plano passando pelo centro da mesma em função da direção (ABNT).

Fontes de luz – são fontes que emitem energia radiante, ou seja, possuem luz própria, sendo portanto consideradas como fonte primária de iluminação.

Iluminância ou iluminamento (E) – fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área da superfície. No Sistema Internacional (SI) a unidade é o lux e no Sistema Americano (AS) é o footcandle.

Luminância (L) – é a luz refletida de uma superfície numa direção particular, cuja unidade é candela por metro quadrado (cd/m^2).

Lightness (luminosidade) – relacionado a noção acromática da intensidade percebida de um objeto que reflete luz.

Luxímetro – equipamento utilizado nas medições de valores de iluminância, calibrados em lux, para medir o nível de iluminamento de um ponto da superfície.

Luz ambiente – É considerada como uma fonte de luz difusa e não direcional, com intensidade uniforme que simula o efeito das múltiplas reflexões entre as superfícies presentes no ambiente, iluminando toda a cena.

Mach band – efeito que intensifica as fronteiras entre área de tonalidades ou cores distintas devido à descontinuidade de valores de intensidade entre essas áreas, provocando a sensação de que as áreas são mais claras ou mais escuras.

Objeto – elemento que compõe o cenário e possui atributos geométricos e físicos em sua definição.

Modelo – é uma abstração ou representação formal de um objeto, sistema ou fenômeno, sendo suas características principais são definidas a partir da finalidade a que se destina.

Modelo geométrico – modelo matemático (numérico) representado através de estruturas de dados capazes de responder às solicitações requeridas por um algoritmo.

Modelos de iluminação – também chamados de modelos de *shading*, são algoritmos de computador usados para calcular a intensidade luminosa em um ponto de um objeto a partir das propriedades físicas das superfícies do objeto e sua interação com as fontes luminosas.

NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) – superfícies matemáticas utilizadas na modelagem geométrica de objetos complexos.

Pseudocolor (falsa cor) – ocorre quando as cores “verdadeiras” de uma imagem são mapeadas em outro conjunto de cores visando representar gradações de intensidades.

Raio luminoso – vetor que representa de forma gráfica ou analítica, a intensidade, a direção e sentido de propagação da luz.

Ray Tracing – processo de geração de imagens que simula o caminho inverso percorrido por um fóton de luz desde a fonte até o observador. Consegue produzir imagens realistas com sombras, reflexões e refrações.

Realismo visual – é a técnica usada na síntese de imagens de forma a reproduzir a realidade em termos de aparência de cor, efeitos de iluminação e textura de materiais nos modelos de iluminação.

Reflexão difusa – é a parcela da iluminação total que é refletida pelas superfícies em todas as direções.

Reflexão especular – é a parcela da luz incidente refletida de forma especular, ou seja, com o ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão.

Rendering – processo de geração de imagem texturizada, a partir de um modelo tridimensional, ou seja, imagem onde os objetos são exibidos com seus atributos de cor e textura, incluindo ainda as projeções de sombra e pontos de luz.

Simulação computacional – reprodução das características de um fenômeno, situação ou processo através do uso de modelos e com o auxílio do ambiente computacional.

Software de simulação – são ferramentas computacionais usadas para a simulação de sistemas, processos e fenômenos baseadas em métodos numéricos.

Tonalização – processo de atribuição de intensidade e cores a cada *pixel* da superfície de apresentação através da utilização de um modelo de iluminação para o cálculo da sua intensidade.

Validar – verificar se os resultados fornecidos pelo *software* estão corretos.

ANEXO A

TABELAS E GRÁFICOS DIVERSOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DE ILUMINAÇÃO

Tabela 1.1 - Nível de iluminação externo no plano horizontal (Eh) considerando a nebulosidade média da região

Local	Latitude	Nebulosidade Média	Valores de Iluminação Ext. [lux]	
			Céu Claro	Considerando a Nebulosidade
Boa Vista	2° 49'	6,4	66.800	24.050
Equador	0° 00'	8,2	64.700	11.650
Fortaleza	3° 43'	4,9	68.800	35.900
Recife	8° 00'	5,8	70.500	29.600
Salvador	13° 00'	5,3	75.000	35.250
Goiânia	17° 00'	7,0	76.100	22.850
Belo Horizonte	19° 50'	6,6	77.700	26.400
Rio de Janeiro	22° 54'	6,8	78.400	25.900
São Paulo	23° 33'	7,7	78.700	18.100
Curitiba	25° 20'	7,9	79.000	16.600
Porto Alegre	30° 01'	5,1	78.400	38.400
Extremo Sul	33° 40'	5,7	79.500	34.200

Época do ano: Verão – horário: 9:00 – 15:00 hs

Fonte: SILVA, Francisco de A. Gonçalves da. **Conforto ambiental**; iluminação de interiores. João Pessoa: A União, 1992. p. 69

Tabela 1.2 - Nível de iluminação externo no plano horizontal (Eh) considerando a nebulosidade média da região

Local	Latitude	Nebulosidade Média	Valores de Iluminação Ext. [lux]	
			Céu Claro	Considerando a Nebulosidade
Boa Vista	2° 49'	7,6	61.800	14.850
Equador	0° 00'	8,8	64.700	7.750
Fortaleza	3° 43'	3,7	61.700	38.900
Recife	8° 00'	6,8	56.300	18.000
Salvador	13° 00'	6,1	51.300	20.000
Goiânia	17° 00'	4,1	47.100	27.800
Belo Horizonte	19° 50'	3,5	50.500	32.800
Rio de Janeiro	22° 54'	5,1	48.800	23.900
São Paulo	23° 33'	6,6	47.100	16.000
Curitiba	25° 20'	6,2	46.200	17.550
Porto Alegre	30° 01'	5,5	24.800	11.150
Extremo Sul	33° 40'	6,1	23.800	9.300

Época do ano: Inverno – horário: 9:00 – 15:00 hs

Fonte: SILVA, Francisco de A. Gonçalves da. **Conforto ambiental**; iluminação de interiores. João Pessoa: A União, 1992. p. 69

Tabela 1.3 - Nível de iluminamento externo no plano horizontal (Eh) considerando a nebulosidade média da região

Local	Latitude	Nebulosidade Média	Valores de Iluminação Ext. [lux]	
			Céu Claro	Considerando a Nebulosidade
Boa Vista	2° 49'	6,0	63.400	25.350
Equador	0° 00'	8,5	72.500	10.900
Fortaleza	3° 43'	4,7	72.500	38.400
Recife	8° 00'	6,1	71.600	27.900
Salvador	13° 00'	5,5	69.500	31.300
Goiânia	17° 00'	6,3	68.200	25.250
Belo Horizonte	19° 50'	5,3	66.400	31.200
Rio de Janeiro	22° 54'	6,4	64.700	23.300
São Paulo	23° 33'	7,6	59.500	14.300
Curitiba	25° 20'	7,5	63.500	15.900
Porto Alegre	30° 01'	5,5	58.700	26.400
Extremo Sul	33° 40'	6,1	56.100	21.900

Época do ano: Equinócio – horário: 9:00 – 15:00 hs

Fonte: SILVA, Francisco de A. Gonçalves da. **Conforto ambiental**: iluminação de interiores. João Pessoa: A União, 1992. p. 69.

Tabela 2.1 - Coeficientes de manutenção para domos em função dos intervalos de limpeza

Coeficientes de manutenção para domos em função dos intervalos de limpeza (Km)			
Tipo de construção	Intervalo de limpeza	Locação em área não industrial	Locação em área industrial
Escritórios	12 meses	0,7	0,6
Hospital	6 meses	0,7	0,6
Escolas	12 meses	0,7	0,6
Fábricas	3 meses	0,6	0,5
Laboratórios e fábricas especiais	1 mês	0,6	0,5

Fonte: COLORPLAST. Manual técnico de iluminação zenital, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d]. p. 13.

Tabela 2.2 – Fatores de depreciação de serviço da luminária

Tipo de luminária	Condição do ambiente	Fator de depreciação
Aberta para iluminação de interiores	Muito limpo	0,95
	Limpo	0,89
	Médio	0,81
	Sujo	0,72
	Muito sujo	0,61
Fechada para iluminação de interiores	Muito limpo	0,94
	Limpo	0,88
	Médio	0,82
	Sujo	0,77
	Muito sujo	0,71
Fechada para iluminação de áreas externa		0,87

Fonte: ABILUX. Uso racional de energia elétrica em edificações: iluminação. São Paulo: Abilux, 1992. p. 32.

Tabela 3.1 - Coeficiente de transmissão média de vidros e plásticos

	Material	Coeficiente de transmissão médio (t)
Vidro laminado	Vidro transparente	
	Simples, de 2 a 3 mm de espessura	0,85
	Triplo, de 4 a 6 mm de espessura	0,86
	Aramado, até 6 mm de espessura	0,80
	Vidro Translúcido	
	Impresso fantasia, de 3 a 4 mm de espessura	0,80 – 0,85
	Esmerilhado, impresso grosso e industrial, até 6 mm de espessura	0,75 – 0,80
Vidro especial	Colorido, absorvedor de calor, de 4 a 6 mm de espessura	0,74
	Telhas onduladas para cobertura, reforçadas com fibra de vidro	
Lâmina de plástico	Medianamente difusoras	0,75 – 0,80
	Consideravelmente difusoras	0,66 – 0,75
	Muito difusoras	0,55 – 0,70
	Lâminas translúcidas “opalinas” de acrílico	0,55 – 0,78

Fonte: MASCARÓ, L. Iluminação natural dos edifícios. Porto Alegre: PROPAR – UFRGS, 1980. p. 67.

Tabela 3.2 - Coeficientes de transmissão para domos (t)

Descrição	Coeficiente (t)
Vidro plano liso	0,80 a 0,90
Acrílico transparente claro	0,80 a 0,92
Acrílico translúcido branco	0,20 a 0,60

Fonte: COLORPLAST. Manual técnico de iluminação zenital, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d]. p. 13.

Tabela 4 - Coeficiente de parede

Coeficiente de parede	
Espessura da parede	Coeficiente de parede (p)
25 cm	0,90
15 cm	0,95

Fonte: COLORPLAST. Manual técnico de iluminação zenital, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d]. p. 28

Tabela 5 – Radiação luminosa obstruída por diferentes tipos de fatores de sombra (FS)

Tipo de fator de sombra	Radiação luminosa obstruída (FS)
Persiana de cor clara	0,60
Persiana de cor escura	0,80
Cortina de tecido de trama aberta	
cor clara	0,30
cor escura	0,50
Cortina de trama fechada	
cor clara	0,70
cor escura	0,85
Persiana de enrolar, fechada, deixando 5% de abertura	
cor clara	0,80
cor escura	0,90
Toldo	
cor clara	0,60
cor escura	0,80
“Brises” horizontais (orientação N - S)	
cor clara	0,50
cor média	0,60
“Brises” verticais (orientação E - O)	
cor clara	0,40
cor média	0,50

(*) Latitude 30° S

Fonte: MASCARÓ, L. Iluminação natural dos edifícios. Porto Alegre: PROPAR – UFRGS, 1980. Apud: ABILUX. Uso racional de energia elétrica em edificações: iluminação. São Paulo: Abilux, 1992. p. 14.

Tabela 6.1 - Exemplo de tabela de fator de utilização para recintos com aberturas laterais

ρ	853	851	833	831	752	553	551	533	531	511	000
K											
0,60	0,36	0,34	0,28	0,27	0,33	0,30	0,29	0,24	0,23	0,19	0,13
0,80	0,45	0,42	0,36	0,34	0,41	0,37	0,36	0,31	0,30	0,25	0,18
1,00	0,52	0,48	0,43	0,41	0,47	0,43	0,41	0,36	0,35	0,30	0,22
1,25	0,60	0,55	0,50	0,47	0,54	0,49	0,46	0,42	0,41	0,36	0,26
1,50	0,65	0,60	0,56	0,52	0,59	0,54	0,50	0,47	0,45	0,41	0,30
2,00	0,74	0,66	0,65	0,59	0,66	0,60	0,56	0,54	0,51	0,47	0,34
2,50	0,80	0,70	0,71	0,64	0,71	0,64	0,60	0,59	0,55	0,52	0,38
3,00	0,85	0,74	0,77	0,69	0,75	0,68	0,63	0,64	0,59	0,56	0,42
4,00	0,90	0,78	0,84	0,73	0,79	0,73	0,66	0,68	0,63	0,60	0,45
5,00	0,94	0,81	0,88	0,77	0,82	0,76	0,69	0,72	0,66	0,64	0,48

Fonte: ABILUX. Uso racional de energia elétrica em edificações: iluminação. São Paulo: Abilux, 1992. p. 30.

Tabela 6.2 - Coeficientes de utilização para recintos com iluminação zenital (K_u)

coeficiente de reflexão								
Teto	0,7			0,5			0,3	
Paredes	0,5	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1
Índice de recinto	Coeficientes de utilização							
0,6	0,43	0,38	0,34	0,42	0,38	0,34	0,37	0,34
0,8	0,52	0,47	0,43	0,51	0,46	0,43	0,46	0,43
1,0	0,56	0,51	0,47	0,55	0,51	0,47	0,50	0,47
1,25	0,62	0,56	0,53	0,60	0,56	0,52	0,55	0,52
1,5	0,65	0,60	0,56	0,64	0,59	0,56	0,58	0,55
2,0	0,70	0,66	0,62	0,69	0,65	0,62	0,64	0,61
2,5	0,74	0,70	0,67	0,73	0,69	0,66	0,68	0,65
3,0	0,77	0,74	0,70	0,75	0,72	0,70	0,71	0,69
4,0	0,80	0,77	0,75	0,78	0,76	0,73	0,74	0,73
5,0	0,82	0,79	0,77	0,80	0,78	0,76	0,77	0,75

Fonte: COLORPLAST. Manual técnico de iluminação zenital, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d]. p. 18

Tabela 6.3 - Coeficiente de utilização para recintos com janela laterais

		coeficiente de reflexão				
Teto		0,7			0,5	
Paredes	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
Índice de recinto	Coeficientes de utilização					
0,6	45	36	30	42	35	28
0,8	51	44	38	48	37	30
1,0	58	52	46	55	49	43
1,25	62	56	50	58	52	47
1,5	65	59	53	60	55	49
2,0	69	63	58	63	58	53
2,5	70	65	61	65	60	55
3,0	71	67	63	66	61	57
4,0	72	69	65	67	62	59
5,0	73	70	67	68	63	60

Fonte: COLORPLAST. Manual técnico de iluminação zenital, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d]. p. 28.

Tabela 7 - Níveis de iluminação recomendados para iluminação de interiores segundo a NBR 5413 (1982) da ABNT

Área	Atividade	Iluminamento (lux)
Escolas	Salas de aula	300
	Quadros negros	500
	Sala de desenho	500
Comercial	Escritórios	500
	Computadores	500
	Desenho	1000
Residências	Sala de estar - geral	150
	Sala de estar - local	500
	Cozinhas - geral	150
	Cozinhas - local	300
	Quartos – geral	150
	Quartos – local	300
	Quartos – suplementar (cama)	200
	Quartos de trabalho	300

Fonte: NBR 5413 – Iluminância de interiores, 1992. Tabela pelo autor.

Tabela 8.1 – Refletâncias típicas de materiais (%) (com luz branca)

Cores		Materiais	
Branco	75-85	Espelho de vidro	80-90
Creme-claro	70-75	Plástico metalizado	75-85
Amarelo-claro	65-75	Alumínio polido	65-85
Cinza-claro	55-75	Aço inoxidável	55-65
Verde-claro	50-65	Ferro esmaltado	60-90
Azul-claro	50-60	Branco sintético	70-85
Cinza-médio	40-55	Concreto novo	40-50
Verde-médio	40-50	Estuque novo (branco)	70-80
Azul-médio	35-50	Tijolos novos	10-40
Vermelho	10-20	Asfalto	04-10

Fonte: MOREIRA, Vinícius de Araújo. Iluminação e fotometria: teoria e aplicação. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. p.124.

Tabela 8.2 – Fatores de reflexão para diferentes materiais e cores

Material / Cores	Fator	Material / Cores	Fator
Asfalto sem poeira	7	Escuras	15-30
Cal	85-88	Médias	30-50
Cantaria	25-60	Claras	50-70
Cerâmica vermelha	30	Muito claras	50-70
Concreto aparente	55	Branças	85-95
Gesso (branco)	90-95	Cinzenta	25-60
Granito	40	Parada	8-50
Granolite	17	Pérola	72
Mármore branco	45	Alumínio polido	60-70
Pedregulho	13	Cromo	60-65
Terra	1-20	Aço inox	55-65
Tijolo	13-48	Esmalte	60-90
Fazenda escura (lã)	2	Amarelas	30-70
Gramma escura	6	Azul	5-55
Livros em estantes	10-20	Bege	25-65
Madeira clara	13	Branca	85-95
Madeira escura	7-13	Creme	60-68
Nuvens	80	Marfim	71-77
Papel branco	80-85	Espelhos	80-90
Troncos de árvores	3-5	Preta	4-8
Vegetação (média)	25	Rosa	35-70
Veludo preto	0.2-1	Verde	12-60
Muito escuras	0-15	Vermelha	10-35

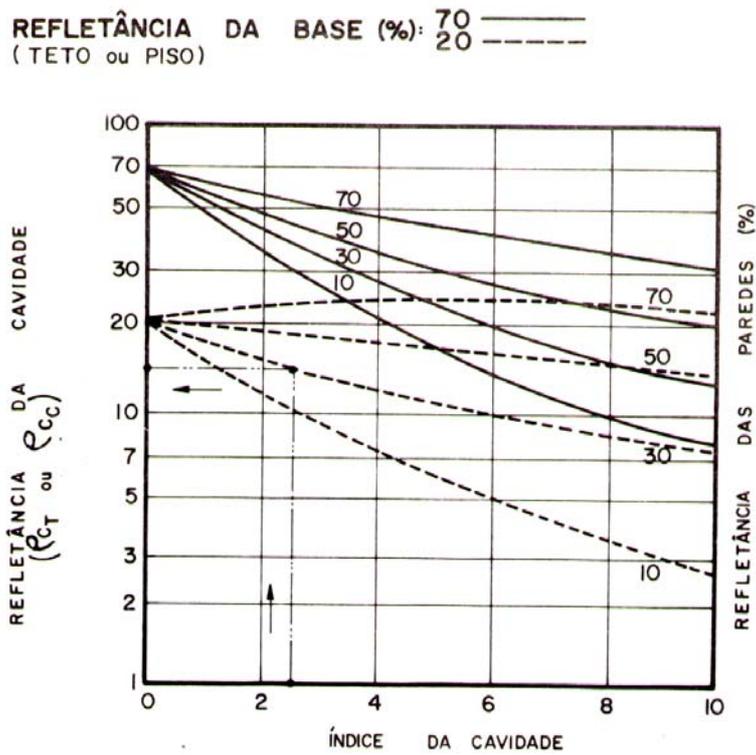
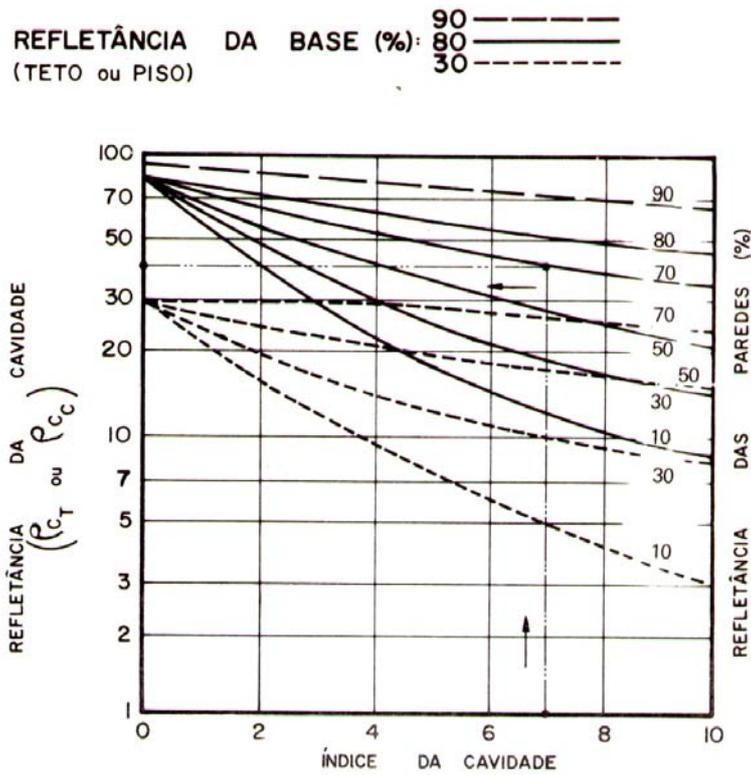
Fonte: CINTRA DO PRADO, L. Iluminação natural. São Paulo: FAU-USP, 1961. Apud: ABILUX. Uso racional de energia elétrica em edificações: iluminação. São Paulo: Abilux, 1992. p. 30.

Tabela 8.3 - Coeficientes de reflexão médios para alguns materiais e cores foscas

Material ou cor	Coeficiente de reflexão (ρ)
Papel de pintura branca	0,80
Pintura branca água-gesso branco	0,85
Pintura amarelo-cromo claro	0,70
Pintura amarelo-ocre	0,50
Cinza claro	0,50
Azul celeste	0,40
Madeira clara	0,30
Azul cobalto	0,15
Verde cromo	0,15
Cinza escuro	0,10
Roxo	0,09
Azul ultramar	0,06
Copas de árvores	0,01
Preto	0,01
Cimento amianto	0,40
Tijolo-concreto	0,40
Tijolo-areia-cal	0,40
Concreto liso	0,30
Concreto áspero	0,20
Vidros, janelas	0,15
Asfalto	0,10

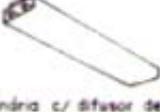
Fonte: COLORPLAST. Manual técnico de iluminação zenital, Domus Colorplast. São Paulo, [s.d]. p. 15.

Gráfico 1 - Refletâncias das cavidades do teto e do piso



Fonte: MOREIRA, Vinícius de Araújo. **Iluminação & fotometria: teoria e aplicação**. São Paulo: Edgar Blücher, 1982. 2. ed. revista e ampliada. p. 123

Gráfico 2 - Determinação do fator de utilização de luminárias para o método das cavidades zonais

LUMINÁRIA TÍPICA	DADOS BÁSICOS	ρ_{C_T}	80			50			10		
			ρ_p			ρ_p			ρ_p		
			50	30	10	50	30	10	50	30	10
FATOR DE UTILIZAÇÃO (F_u) P/ $\rho_p = 20\%$											
 Refletor fecho aberto c/ lâmpada cor corrigida	Categoria III $L/h = 1,5$ 10% 67%	1	,84	,82	,80	,76	,74	,73	,66	,65	,64
		2	,77	,73	,70	,70	,67	,65	,62	,60	,59
		3	,70	,66	,62	,64	,61	,58	,57	,55	,53
		4	,64	,59	,55	,59	,55	,52	,53	,51	,49
		5	,59	,53	,49	,54	,50	,47	,49	,46	,44
		6	,53	,48	,44	,50	,45	,42	,45	,42	,39
		7	,48	,43	,39	,45	,40	,37	,41	,38	,35
		8	,44	,38	,34	,41	,36	,33	,37	,34	,31
		9	,40	,34	,30	,37	,32	,29	,34	,30	,27
		10	,36	,30	,26	,33	,29	,25	,32	,27	,24
 Luminária c/ pintura difusora	Categoria III $L/h = 1,3$ 12% 74%	1	,87	,84	,81	,78	,76	,73	,67	,66	,65
		2	,77	,72	,66	,69	,65	,61	,60	,57	,55
		3	,68	,61	,56	,61	,56	,52	,53	,50	,47
		4	,60	,53	,47	,54	,49	,44	,48	,44	,41
		5	,53	,46	,40	,48	,42	,38	,42	,38	,35
		6	,47	,40	,34	,43	,37	,33	,38	,33	,30
		7	,42	,35	,30	,39	,33	,28	,34	,30	,26
		8	,38	,31	,26	,35	,29	,24	,31	,26	,23
		9	,34	,27	,22	,31	,25	,21	,27	,23	,19
		10	,31	,24	,19	,28	,22	,18	,25	,20	,17
 Luminária c/ grade inferior	Categoria II $L/h = 1,0$ 22% 86%	1	,80	,77	,75	,68	,66	,65	,55	,54	,53
		2	,71	,67	,63	,61	,58	,56	,50	,48	,46
		3	,64	,58	,54	,55	,51	,48	,46	,43	,41
		4	,57	,51	,47	,50	,45	,42	,41	,38	,36
		5	,51	,45	,40	,45	,40	,37	,37	,34	,32
		6	,46	,40	,35	,40	,36	,32	,34	,30	,28
		7	,42	,35	,32	,37	,32	,28	,32	,27	,25
		8	,37	,31	,27	,33	,28	,25	,28	,24	,22
		9	,34	,28	,23	,30	,25	,21	,25	,21	,19
		10	,31	,25	,21	,27	,22	,19	,23	,19	,17
 Calha simples c/ 2 lâmpadas	Categoria I $L/h = 1,3$ 3% 77%	1	,85	,81	,77	,77	,73	,70	,67	,65	,63
		2	,73	,66	,60	,66	,60	,56	,57	,54	,51
		3	,63	,55	,49	,57	,51	,46	,50	,46	,42
		4	,55	,47	,41	,50	,44	,38	,44	,39	,35
		5	,48	,40	,34	,44	,37	,32	,38	,33	,29
		6	,43	,35	,29	,39	,32	,27	,34	,29	,25
		7	,38	,30	,24	,35	,28	,23	,31	,26	,22
		8	,34	,26	,21	,31	,25	,20	,28	,22	,18
		9	,31	,23	,18	,28	,21	,17	,25	,19	,16
		10	,28	,20	,16	,25	,19	,15	,23	,17	,14
 Luminária c/ difusor de acrílico para 2 lâmpadas	Categoria V $L/h = 1,3$ 7% 55%	1	,44	,42	,40	,39	,37	,36	,33	,32	,31
		2	,38	,34	,32	,33	,31	,29	,28	,27	,25
		3	,33	,29	,26	,29	,26	,24	,25	,23	,21
		4	,29	,25	,22	,26	,23	,20	,22	,20	,18
		5	,25	,21	,18	,22	,19	,17	,19	,17	,15
		6	,22	,18	,15	,20	,17	,14	,17	,15	,13
		7	,20	,16	,13	,18	,15	,12	,15	,13	,11
		8	,18	,14	,11	,16	,13	,10	,14	,11	,09
		9	,16	,12	,09	,14	,11	,09	,12	,10	,08
		10	,14	,11	,08	,13	,10	,08	,11	,09	,07
 Luminária c/ colmeia inferior para 4 lâmpadas	Categoria IV $L/h = 1,0$ 0% 40%	1	,53	,51	,49	,49	,48	,47	,46	,45	,44
		2	,47	,44	,42	,44	,42	,40	,41	,40	,38
		3	,42	,39	,38	,40	,37	,35	,38	,36	,34
		4	,38	,34	,31	,36	,33	,31	,34	,32	,30
		5	,34	,30	,27	,33	,29	,27	,31	,28	,26
		6	,31	,27	,24	,30	,26	,24	,28	,25	,23
		7	,28	,24	,21	,27	,24	,21	,26	,23	,21
		8	,25	,21	,19	,24	,21	,19	,23	,20	,18
		9	,23	,19	,16	,22	,19	,16	,21	,18	,16
		10	,21	,17	,15	,20	,17	,15	,19	,16	,14

Fonte: MOREIRA, Vinícius de Araújo. **Iluminação & fotometria: teoria e aplicação**. São Paulo: Edgar Blücher, 1982. 2. ed. revista e ampliada. p. 125