

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL ATRAVÉS DE MAPEAMENTO DIGITAL DE LUMINÂNCIAS

Roberto Pereira (1); Fernando O. R. Pereira (2); Anderson Claro (3); Luiz P. F. de Souza (4)

- (1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil –Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis/SC, Brasil e-mail: ctircp@yahoo.com.br
- (2) Departamento de Arquitetura e Urbanismo –Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis/SC, Brasil – e-mail: feco@arq.ufsc.br
- (3) Departamento de Arquitetura e Urbanismo –Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis/SC, Brasil – e-mail: ander@arq.ufsc.br
- (4) Departamento de Arquitetura e Urbanismo –Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis/SC, Brasil – e-mail: luizpauloforlani@gmail.com

1. RESUMO

Entre os métodos de maior potencial para a análise do fenômeno da iluminação natural no ambiente construído encontram-se a simulação computacional e a medição em modelos em escala reduzida expostos a ambientes de teste (céu artificial). Atualmente, existem dezenas de programas disponíveis no mercado, alguns disponibilizados gratuitamente, e diferentes propostas de céus artificiais. A complexidade do fenômeno físico associado à emissão e propagação da energia luminosa, somada a dificuldade inerente à caracterização fotométrica da fonte de luz natural (abóbada celeste) e das propriedades radiantes dos materiais impõe limitações de operação tanto aos algoritmos matemáticos mais sofisticados, como nos procedimentos experimentais empregados nos céus artificiais. **Objetivo.** Desenvolver um método para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural. **O processo metodológico.** O principal desafio está em proporcionar condições para a caracterização precisa da principal fonte de luz natural – abóbada celeste, seja no ambiente virtual ou no real. Propõe-se o emprego de mapeamento digital da distribuição de luminâncias do ambiente de exposição para gerar dados de entrada para simulação teórica, criando contexto para a comparação do comportamento da luz entre o modelo experimental e o modelo teórico e possibilitando a verificação das discrepâncias e validação dos procedimentos de simulação. **Resultados esperados.** Espera-se que a metodologia empregada permita verificar o desempenho da iluminação natural no interior da sala de estudo e que possibilite, a partir do mapeamento digital de luminâncias, avaliar o desempenho das ferramentas utilizadas ao longo do processo. **Conclusão.** O processo metodológico permitiu caracterizar adequadamente as condições de exposição à luz natural e o comportamento da iluminação no interior de um ambiente, mostrando grande potencial para o processo de avaliação/validação de ferramentas de simulação de iluminação natural.

Palavras-chaves: ferramentas de simulação da iluminação natural, mapeamento digital de luminâncias, método de avaliação/validação.

ABSTRACT

Among the methods with major potential for daylighting performance analysis in the built environment we found computer simulation and experiment with physical scale models exposed to controlled test environments (artificial sky). Currently, there are dozens of computer codes commercially available, some of them are free, and different arrangements of artificial skies. The complexity of physical phenomena associated to the emission and propagation of light, plus the inherent difficulty to the daylight sources photometric and materials radiant properties imposes operational limitations to the more sophisticated mathematical algorithms as well to experimental procedures used in artificial skies. **Objective.** To develop a method for evaluating daylighting simulation performance tools. **Methodology.** The main challenge is to provide conditions for precisely characterizing the main daylight source – sky vault, either in the virtual environment or in the real one. One proposes a luminance distribution digital mapping in order to generate reliable data for theoretical simulation, allowing the daylight behavior comparisons between experimental and theoretical results, error analysis, and simulation procedures validation. **Expected results.** One expects that the presented method allows, through the luminance digital mapping, to evaluate the performance of daylight simulation tools. **Conclusion.** The developed method allowed to adequately characterizing daylight availability conditions and its behavior inside a room, showing the potential of the evaluation/validation process for daylighting simulation tools.

Keywords: daylight simulation tools, luminance digital mapping, evaluation/validation method.

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, muitos especialistas fazem uso das ferramentas de simulação no projeto de edificações. Cabe a elas agilizar o processo de tomada de decisões nas diferentes etapas do projeto, fornecendo informações precisas sobre o impacto ambiental das diferentes opções de projeto. As pesquisas recentes revelam erros consideráveis na avaliação das ferramentas, seja através de análises com programas de simulação computacional, seja por inadequações nos procedimentos experimentais realizados com modelos físicos. Este fato ocorre porque tanto o modelo teórico como os experimentais não representam precisamente a realidade do fenômeno da iluminação natural, carecendo de validação sistemática de desempenho.

Muitos esforços têm sido canalizados para o estabelecimento de procedimentos de validação de ferramentas de simulação. A ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, apresentou a comunidade a Standard 140 para avaliação de programas computacionais de análise energética em edificações (ASHRAE, 2001). A CIE, Commission Internationale de L'Eclairage, publicou a CIE 171 para o teste de precisão de programas de simulação computacional de iluminação (CIE, 2006). Mais recentemente, a IEA, International Energy Agency, está dispensando esforços focados na validação e teste de ferramentas de simulação de desempenho de edificações (IEA, 2006).

Segundo **Maamari, F. et al, 2003**, certas ferramentas de simulação poderão ser mais precisas em alguns aspectos da propagação da iluminação, mas ruins em outros aspectos, ou podem não levar certas leis físicas em conta. Isto prova que uma escolha consciente de um programa computacional, que satisfaça as necessidades específicas do usuário, não é um assunto simples, sendo necessário fazer alguns esforços adicionais nesta direção.

Shalaby et al, 2005, em sua pesquisa, registrou entre um software de simulação e medições em tempo real, discrepâncias de dezessete a trinta e cinco por cento (17-35%) das medidas de iluminância em interiores, foi concluído que poderia ser utilizado um coeficiente de correção para melhorar as estimativas de iluminâncias.

ROY, 2000, salientou que as ferramentas de simulação de iluminação natural, possibilitam aos especialistas observarem propriedades físicas complexas da iluminação e visualizar no projeto a distribuição da iluminação no interior da edificação, porém, o autor revela que para analisar se uma

ferramenta está respondendo de forma satisfatória é necessário medições comparativas e criteriosas, que avaliam a realidade e o que está sendo simulado. Para analisar se uma ferramenta está descrevendo de forma significativa os fenômenos físicos da iluminação, torna-se necessário desenvolver um processo metodológico, capaz de dar ao profissional a sustentabilidade necessária para a implementação de estratégias e técnicas adotadas no projeto da edificação.

Para uma ferramenta de simulação de iluminação natural descrever de maneira confiável o comportamento da iluminação em interiores, é necessária a caracterização segura da fonte de luz natural, o que requer modelos precisos de distribuição de luminância do céu. A qualidade da iluminação de um ambiente depende da distribuição de luminâncias de suas superfícies. Problemática em sua determinação, ela pode variar pontualmente, não sendo possível levantar valores médios por unidade de área, sendo necessárias campanhas de medição intensiva, com medições segundo pequenos ângulos de visão, além disso, a representação através de curvas de isoluminâncias, suficiente para análises técnicas, não transmite ao observador da cena a real sensação da visão do ambiente (Mardaljevic, 2000).

Pesquisas recentes vêm revelando que a distribuição de luminâncias pode ser adquirida através da utilização de mapeamento digital. Esta técnica utiliza sensores fotométricos ou a utilização de câmeras digitais que processam os valores de luminância diretamente na imagem. O Mapeamento Digital, combinado com a fotometria, torna-se um valioso meio para gerar em tempo real os mapas de distribuição de luminâncias. Utilizar a câmera digital poderá reproduzir corretamente ambientes de complexas relações de luminâncias (Spasojeviac, 2003).

Para Howlett, 2007, a caracterização da quantidade e a qualidade da iluminação natural são essenciais para avaliar o potencial dos edifícios em relação à saúde humana, ao conforto visual e a economia de energia. São poucos os procedimentos fotométricos precisos usados pelos arquitetos e pesquisadores. A maioria destes é muito simples, baseados na determinação da iluminância. A luminância oferece uma fonte mais rica de dados, este parâmetro dá ao projeto maior qualidade na avaliação da iluminação natural, e o uso do mapeamento digital trás vantagens para sua determinação, pois é rápido e conveniente para caracterização do seu registro.

Neste sentido, este trabalho tem como foco desenvolver um método para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural, utilizando como recurso para descrição do ambiente de exposição (fonte direta ou refletida) o mapeamento digital de luminâncias.

2. OBJETIVO

Descrever um processo metodológico para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural.

3. METODOLOGIA

De forma crescente, as pesquisas desenvolvidas para caracterizar a performance da iluminação em interiores necessitam de ferramentas de simulação confiáveis, capazes de auxiliar os especialistas nas diferentes etapas construtivas do projeto. À medida que ele evolui, o processo decisório vai tornando-se mais complexo e cabe ao projetista utilizar a ferramenta adequada as suas necessidades. A elas cabe, analisar a complexidade do fenômeno físico associado à emissão e propagação da energia luminosa, representar as propriedades radiantes dos materiais e promover, com significativa precisão, a visualização do ambiente. Neste contexto o método dispõe-se a:

- Capturar a distribuição da fonte de iluminação do ambiente (céu artificial);
- Carregar, através do mapeamento de luminâncias, a ferramenta de simulação que será exposta ao método (FOTON);
- Avaliar o procedimento de medição físico (referência);

- Analisar o comportamento da luz no interior dos modelos (confrontar as respostas);
- Avaliar suas discrepâncias e validar a ferramenta de simulação submetida ao processo metodológico.

Em casos de reavaliação do método será permitida nova análise, para isso os procedimentos experimentais empregados deverão ser reconsiderados pelo usuário do sistema. A Figura 1 demonstra de maneira esquemática a proposta de trabalho.

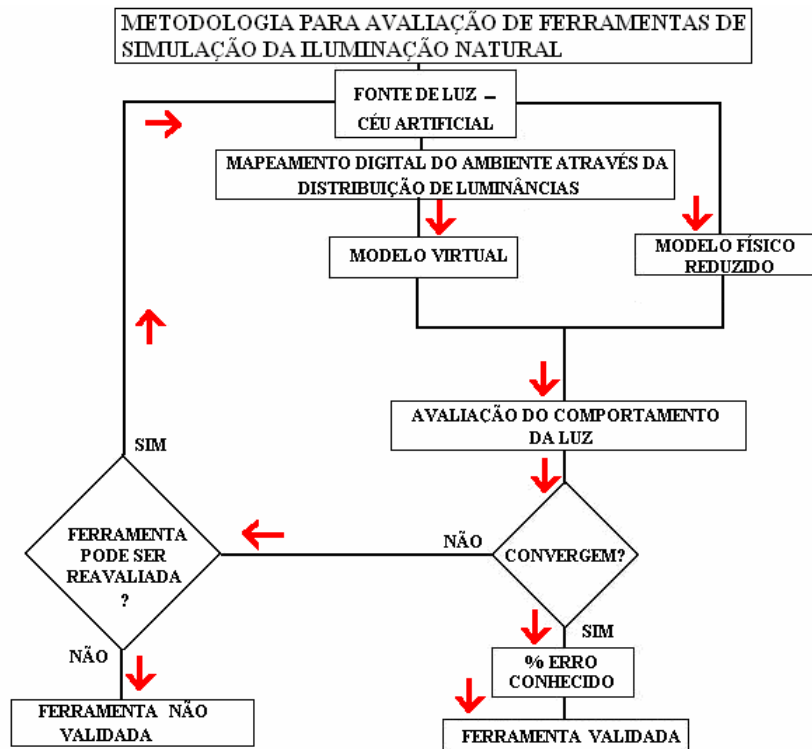


Figura 1 – Representação Esquemática do Processo Metodológico da Pesquisa

A seção que segue descreve as principais características dos elementos utilizados na descrição do processo.

3.1 O Ambiente Controlado de Iluminação

Para obter as imagens digitais fotometradas, a partir de distribuições de luminâncias homogêneas, utilizou-se como ambiente de análise o céu artificial – Figura 2. Ele apresenta uma distribuição de luz com iguais valores em todas as direções azimutais, aumentando a luminância do horizonte para o zênite em uma relação de três vezes. O céu artificial é um volume cúbico, com um forro de pano translúcido e iluminação artificial superior, fechado em suas quatro paredes com espelhos verticais, reproduzindo, de forma aproximada, a distribuição do céu nublado definida pela Commission Internacionale de L'Eclairage (CIE, 1970).



Figura 2 – Céu Artificial de Caixa de Espelhos (LabCon – anexo1)

3.2 Determinação da Distribuição da Luminância do Céu Artificial Utilizando Máquina Fotográfica Digital – IQC R-32

A câmera digital utilizada como instrumento fotométrico, denominada IQCam – Figura 3, da Lumetrix (www.lumetrix.com) é manipulada por um software de nome RT-32. Através deste aplicativo a imagem é tratada para representar a real distribuição da iluminação da cena.



Figura 3 – Câmera Digital IQCam

O RT-32 permite obter imagens instantâneas para cada foto adquirida, seus valores de luminâncias são medidos através dos pixels que compõem a foto, mediante uma paleta com uma distribuição de até 256 cores. De acordo com a intensidade de iluminação da cena o RT-32 tem a capacidade de modificar a abertura da íris da lente, que pode ser regulada manualmente pelo software. A Figura 4 representa a distribuição da luminância no céu artificial. A imagem fotometrada identifica a iluminação desde o zênite até a linha do horizonte, através de um intervalo de medição de 500 a 10000cd/m² e uma abertura da lente de 5,6 (íris). Apresenta-se em um histograma distribuído por 150 cores e uma área de medição em cd/m² para cada 3 x 3 pixels da imagem.

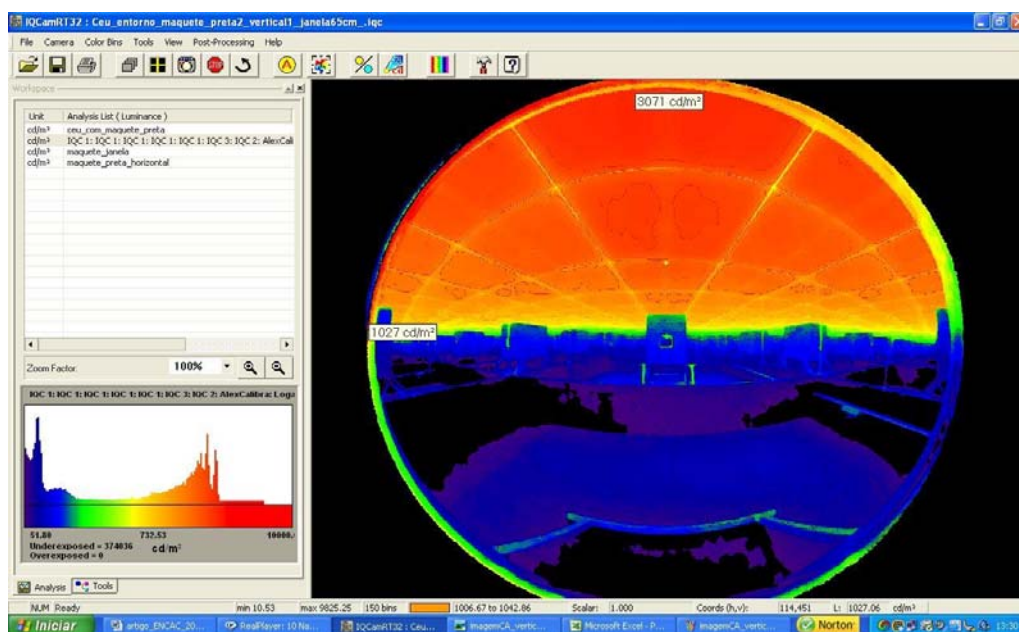


Figura 4 – Representação da distribuição da luminância no céu artificial adquirida pela IQC.

O arquivo.iqc relacionou cada linha e cada coluna que representa os pixels que geram a imagem e foi capaz de produzir mais de um milhão de informações (1292 x 1030). Em vários pontos de verificação de dados de luminâncias medidos pela IQC, adotou-se como parâmetro de comparação um Luminancímetro calibrado, denominado MINOLTA-LS-110: (http://se.konicaminolta.us/products/industrial_light_meters/ls_110/specifications.html).

Constatou-se que os resultados da câmera são acrescidos de 15% com uma tolerância de +/- 2%. Este efeito foi corrigido nas avaliações.

3.3 O Programa de Simulação Computacional – FOTON

A ferramenta escolhida para sofrer o processo metodológico de validação está baseada no trabalho de tese de **CLARO, 1998**. A programação atual tem uma versão denominada como FOTON e será avaliada pela simulação da iluminação no interior de um modelo virtual. O FOTON é capaz de determinar a relação de visibilidade entre diferentes pontos de um ambiente, bem como a exposição desse ponto à abóbada celeste. Ele utiliza um sistema de projeções esféricas de precisão ajustável, as projeções são feitas através de elementos finitos, possibilitando um grau variado de resolução, tanto na obtenção da visibilidade, quanto posteriormente, na aplicação da equação de radiosidade para o cálculo dos níveis de iluminação. O programa calcula as relações de visibilidade, que são armazenadas e utilizadas em sucessivas soluções de cálculo. A iluminância inicial em diferentes pontos das superfícies do projeto é obtida com a resolução definida no globo de projeções. A partir desta iluminância inicial, são calculados os níveis através de um número de ciclos (definidos pelo usuário) onde a equação de radiosidade é aplicada plenamente, relacionando cada ponto com todos os outros que mantêm visibilidade, dentro da resolução proposta. Além do cálculo de uma distribuição da abóbada segundo as fórmulas padronizadas pela CIE, o FOTON permite importar os arquivos de luminâncias gerados pela câmera IQC, associando estes valores ao mesmo sistema de projeção utilizado pelo algoritmo. Desta forma, é possível calcular a radiosidade através da iluminância inicial fornecida pelo brilho captado pela imagem da câmera.

Neste trabalho a simulação foi feita com a imagem vertical, obtida da janela da maquete – Figura 5. Para capturar a imagem da câmera IQC, foi utilizado um globo de 52.670 direções, com 26.335 delas em cada hemisfério de um plano. A mesma resolução foi utilizada no cálculo da visibilidade e da iluminância inicial dos vértices, a partir da imagem capturada.

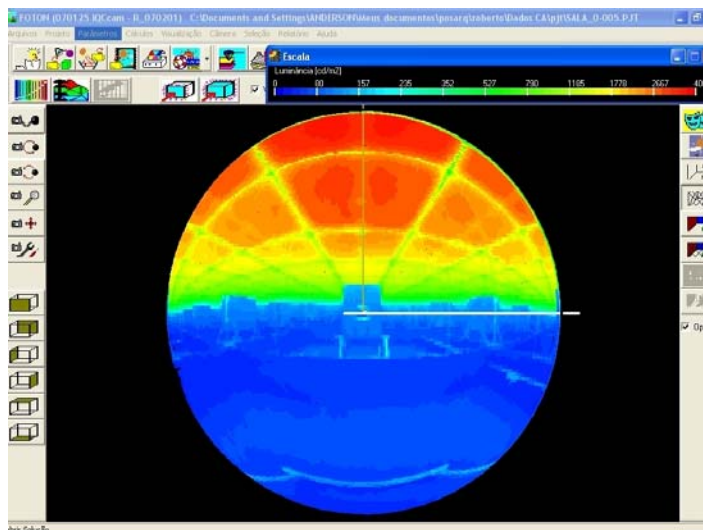
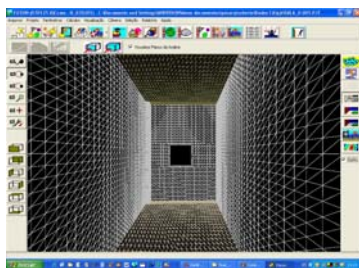


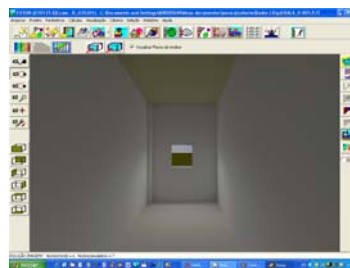
Figura 5 – Janela de representação do FOTON – imagem vertical da distribuição da luminância no céu artificial por simulação computacional.

Uma segunda simulação foi feita utilizando-se a fórmula padrão da CIE para céu nublado, ajustada para uma iluminância horizontal de 7.300 lux, conforme medido no Céu Artificial.

O modelo virtual para a avaliação do ambiente interno foi construído em CAD, constitui-se de 47 planos, caracterizados como opacos difusos, contendo os principais atores das trocas luminosas. Os planos foram divididos em 6.073 vértices – Figura 6(a). O número de ciclos de simulação realizado foi de 20 (após a iluminância inicial), com as refletâncias ajustadas para os valores obtidos na pintura do modelo em escala. Foram tomados os valores dos vértices localizados nas posições correspondentes de medição na maquete – observar simulação através da Figura 6 (b).



(a)



(b)

Figura 6 – (a) Representação do modelo fracionado desenhado em CAD, (b) Representação da simulação computacional.

Dos resultados, além das ilustrações gráficas mostradas, foram obtidas planilhas, contendo a localização e a iluminância de cada vértice em cada plano. Estes dados foram comparados com os valores medidos no modelo físico de referência e seus efeitos avaliados na seção 4.

3.4 O Modelo Físico Reduzido

O modelo físico reduzido foi utilizado neste trabalho como modelo de referência a ser submetido à metodologia proposta. Foi desenvolvido para representar uma sala real de 2x4x3m, tal qual o modelo virtual desenhado para a avaliação computacional. A sala real está localizada na cobertura do prédio da Arquitetura - UFSC. A maquete foi construída em escala 1:05 de compensado resistente de 2cm de espessura, com possibilidade de abertura no piso, no teto e com uma abertura de área circular no fundo do modelo – Figura 7.



(a)



(b)



(c)

Figura 7 – Detalhes construtivos da maquete. (a) Construção Inicial. (b) Detalhe do teto. (c) Foto Comparativa do teto na sala real.

Estas características proporcionaram total flexibilidade para a colocação dos sensores e equipamento (LICOR-SA e IQC) possibilitando as medições de iluminâncias e luminâncias no seu interior – Fig.9.



(a)



(b)



(c)

Figura 9 – (a) Detalhe do posicionamento dos sensores no interior da maquete (b) Posicionamento da Maquete para a Medição Fotométrica no Céu Artificial, (c) Câmera IQC na janela do modelo – ver resultado na Figura 04.

A espessura do compensado permitiu que os sensores ficassem embutidos e nivelados com o plano do piso. Foram dispostos cinco sensores, três com espaçamentos simétricos de 1m ao longo do comprimento da sala, e dois verticais, com uma altura do plano de trabalho de 75cm, no mesmo alinhamento do sensor próximo à janela - observar Figura 10.

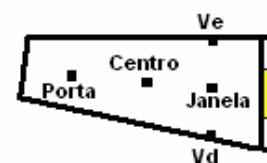


Figura 10 – Disposição dos sensores LICOR

Confeccionado o modelo; as paredes, o teto e o piso foram cobertos por tinta Suvinil de refletância conhecida segundo **CASTRO, 2003**, iguais respectivamente a 75%, 34% e 64%. Com a maquete disposta no céu artificial, foram medidos no seu interior os valores de iluminância e luminância, a fim de serem avaliadas e comparadas com o modelo virtual. O trabalho segue com a análise dos resultados medidos e simulados no FOTON.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os dados adquiridos pela IQC foram ajustados no modelo computacional para fornecer uma iluminância no plano vertical e horizontal de 2.600 lux e 7300 lux respectivamente. Outra simulação foi executada utilizando-se a fórmula padrão da CIE para céu nublado, ajustada para uma iluminância horizontal de 7.300 lux. O gráfico 1 identifica que os valores simulados a partir dos medidos pela IQC, apresentaram uma melhor performance comparada com a formulação matemática da CIE.

Análise do Comportamento de Iluminância Entre os Modelos

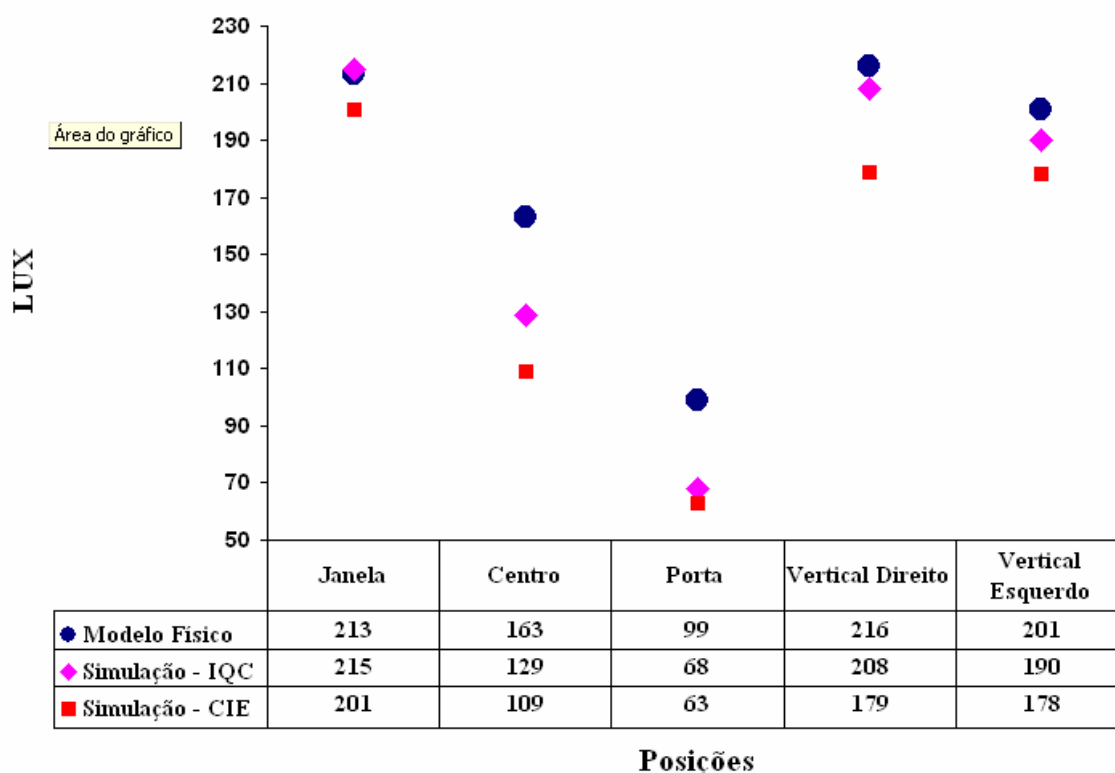


Gráfico 1 – Comportamento da Iluminação no Interior dos Modelos

A tabela 1 indica no ponto próximo da janela um valor simulado de 215 Lux para um medido de 213 Lux da maquete. À medida que a iluminação refletida pelas superfícies tornou-se a responsável pela iluminação das zonas mais afastadas da janela os valores foram ficando mais discrepantes.

Tabela 1 – Comparação entre os valores de iluminâncias medidos na maquete e simulados no FOTON

Posição	Maquete E (lux)	FOTON E (lux)		Diferenças%	
		CA	CIE	CA	CIE
Janela	213	215	201	1,0	5,63
Centro	163	129	109	20,8	33,1
Porta	99	68	63	31,3	36,3
VD	216	208	179	3,7	17,1
VE	201	190	178	5,5	11,4

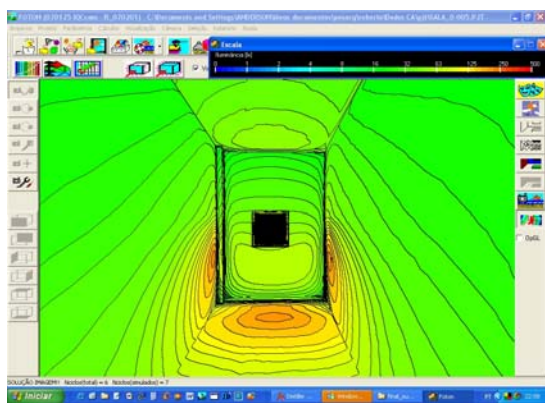
Obs. VD= ponto vertical direito– VE= ponto vertical esquerdo– CA=Céu Artificial– CIE= Céu Padrão Nublado

Para a análise dos valores de luminâncias os resultados simulados identificaram 45 cd/m² para o ponto no plano horizontal, a um metro da janela, com uma diferença de 10% para o medido pela IQC. As complexidades da emissão e propagação da fonte, somada as propriedades radiantes dos materiais caracterizados nos modelos, proporcionaram as limitações percebidas pelo FOTON, em especial nos pontos mais afastados da janela, determinando discrepâncias de até 35% – ver tabela 02.

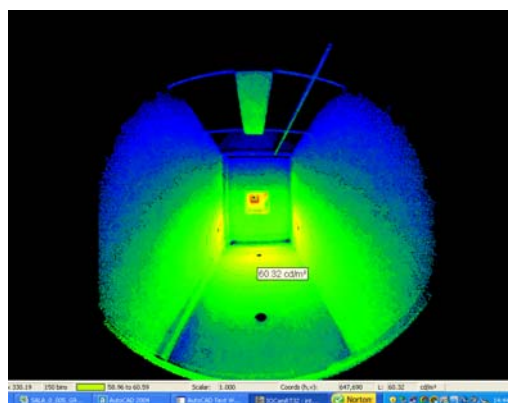
Tabela 02 – Comparação entre os valores de luminâncias iluminâncias medidos na maquete e simulados no FOTON

Posição	Maquete	FOTON	Diferenças
	cd/m ²	cd/m ²	%
Janela	49,80	45,00	10
Centro	35,69	25,00	30
Porta	21,58	14,00	35
VD	50,63	46,00	9
VE	48,97	45,00	8

Analisando o ambiente interno de estudo, foi obtida com uma significativa aproximação visual uma foto do modelo físico e a simulada pelo FOTON, veja a Figura 11.



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Imagem simulada pelo FOTON. (b) Imagem do modelo físico obtida pela IQC

5. CONCLUSÕES

Uma análise precisa da iluminação natural nos projetos das edificações caracteriza um trabalho rico em detalhes, cabe aos especialistas utilizarem as ferramentas de simulação para auxiliar as diferentes etapas do projeto, no entanto, é imprescindível conhecer suas respostas. O método empregado permitiu avaliar as condições de exposição da luz do ambiente e o comportamento da iluminação no interior do modelo virtual a partir de um modelo físico de referência, mostrando-se adequado para o processo de validação de ferramentas de simulação. A imagem capturada pela câmera IQC demonstrou ser eficaz na avaliação do ambiente e no mapeamento digital de luminâncias, e pode alimentar o FOTON utilizando um globo de 52.670 direções, com 26.335 delas em cada hemisfério de um plano. O processo permitiu avaliar os resultados com significativa aproximação, visto que as ferramentas identificaram medidas praticamente iguais nos planos próximos da janela, 213lux para a medição na maquete e 215lux simulado pelo FOTON no plano horizontal. No plano vertical, as diferenças nos pontos “vertical direito” (VD) e “vertical esquerdo” (VE) foram inferiores a dez por cento. Os pontos “centro” e “porta” apresentaram-se sensíveis à redução da refletividade superficial devido ao afastamento da janela. Esta análise pode ser observada no plano do piso, onde as discrepâncias variaram, aproximadamente, de vinte a trinta por cento. Estas respostas eram esperadas, já que as pesquisas retratam discrepâncias nas simulações computacionais de dezessete a trinta e cinco por cento em relação aos valores de iluminância medidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CASTRO, ADRIANA A. SILVA (2003). *Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral*. Ambiente Construído, Porto alegre, v.3, n.2, p.69-76, abr./jun.

CLARO, A.; PEREIRA, F. RUTTKAY (1998). *Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural*. Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis.

HOWLETT, OWEN; HESCHONG, LISA; MCHUGH, JON. (2007). The Illuminating Engineering Society of North America. LEUKOS vol. 3 - n^o3 - January 2007- pg. 201 – 215.

MAAMARI, F.; FONTOYNONT, M.; HIRATA, M.; KOSTER, J.; MARTY, C.; TRANSGRASSOULIS, A. (2003). *Reliable Datasets for Lighting Programs Validation, Benchmark Results*. Conference International CISBAT 2003, pp 241-246, EPFL Lausanne / Switzerland October.

MARDALJEVIC, J. (2000). *The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance prediction techniques*. Institute of Energy and Sustainable Development (IESD), De Montfort University, Leicester LE7 9SU, UK. November.

ROY, GEOFFREY G. (2000). *A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for use in Architectural Design*. School of Engineering Murdoch University - Australia, publication technical.

SHALABY, A. MOHAMED; KING, JANINE; GOLD, MARTIN (2005). *Evaluating Lightscape's accuracy for predicting daylighting illuminance compared to an actual space*. International Solar Energy Society (ISES) - (<http://www.sbse.org/awards/docs/Shalaby.pdf>).

SPASOJEVIĆ, BOJANA; MAHDAVI, ARDESHIR. (2003). *Sky Luminance Mapping for Computational Daylight Modeling*. Buiding Simulation, 15 – 18 de agosto.