



AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM CÉU ARTIFICIAL PARA ESTUDOS DE ILUMINAÇÃO NATURAL COM MODELOS FÍSICOS EM ESCALA REDUZIDA

Alexander González C. (1); Fernando O. Ruttkay P.(2)

(1) LEET - Laboratorio de Estudios y Experimentación Técnica en Arquitectura FAUPB-Medellín,

Colombia – e-mail: alexander.gonzalez@upb.edu.co

(2) LabCon – Laboratório de Conforto Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil -

e-mail:feco@arq.ufsc.br

RESUMO

Os Céus Artificiais permitem o desenvolvimento de estudos qualitativos e quantitativos de iluminação com modelos arquitetônicos em escala reduzida. Nestes ambientes as condições de iluminação são simuladas com uma distribuição similar a um céu real encoberto, para obter dados de luminância e iluminância, na avaliação da iluminação natural na arquitetura. O princípio de desenho deste tipo de céu são os reflexos infinitos no horizonte, que produzem uma diminuição da iluminação a um menor ângulo de altura. A calibração de um céu artificial de caixa de espelhos é importante para assegurar a confiabilidade dos dados de iluminação. Esta calibração tem dois interesses principais: o primeiro é fornecer uma distribuição de luminâncias reais, que simule o modelo padronizado pela Commission Internationale de L'Eclairage (C.I.E), conhecido como "Standard Overcast Sky" (ISO - CIE, 2003). O segundo é fornecer níveis suficientes de iluminação que superem os faixas de atuação dos equipamentos fotométricos. Neste artigo é apresentado o método de calibração do céu artificial, do LabCon-Arq da Universidade Federal de Santa Catarina, que consiste na geração de mapas de distribuição de luminâncias com o sistema fotométrico digital IQCam RT-32, da empresa Lumetrix, e uma lente "olho de peixe" com um ângulo de 185°. Foram necessários alguns ajustes no céu artificial de caixa de espelhos, tais como: sistema de difusão, lâmpadas, controle de refletâncias no fosso do céu e melhoramento do sistema de ventilação, para finalmente obter uma distribuição de luminâncias similar ao modelo teórico da C.I.E.

Palavras-chave: Céu artificial, luminância e iluminância, modelos em escala reduzida.

ABSTRACT

The controlled illumination ambients, known as artificial skies, have been designed and built for the development of quantitative and qualitative daylighting studies using reduced scale architecture models. In these ambients, the light conditions are simulated with a very similar distribution to the real sky, allowing the obtention of luminance and illuminance data in order to evaluate daylight performance in architectural scale models. The principle of a mirror box artificial sky is the infinite reflections in the mirrored horizon that create a reduction on its luminance towards a lower angle of altitude. The calibration of the mirror box artificial sky is important to ensure reliable quantitative data collection. There are two main concerns: the first one is to provide a luminance distribution as close as possible to International Commission of L'Eclairage (ISO - CIE, 2003) "Standard Overcast Sky", while the second is to produce sufficient illuminance levels to be measured with basic photometric equipment. In this paper is presented the calibration method of artificial sky of LabCon/ARQ, at Federal University of Santa Catarina, Brazil, it consists of mapping the sky luminance distribution with an imaging photometric system, IQCam RT-32, from Lumetrix, with a "fish eye" lens with an angle of 185°. During the whole process, the luminance distribution was monitored through digital maps; luminances were plotted against altitude angles that allowed the comparison with the CIE overcast sky distribution. Several adjustments in the sky room were done: diffusing ceiling, lamps, floor and walls reflectances and ventilation system. At the end, it was possible to reach a luminance distribution very similar to the CIE sky.

Keywords: artificial skies, Luminance and Illuminance, Reduced scale architecture models.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Avaliação de iluminação natural em arquitetura

O uso da iluminação natural na arquitetura apresenta aspectos relacionados com o entendimento e o aproveitamento deste fenômeno, que muitas vezes não são considerados pelos arquitetos no desenvolvimento de seus projetos. Atualmente são construídas edificações que não exploram o recurso da iluminação natural, em todas as suas possibilidades estéticas, de conforto visual, e especialmente em seu potencial de eficiência energética.

Para a análise da iluminação natural em projetos de arquitetura, os métodos gráficos são simples demais ou apresentam abstrações do fenômeno, que não facilitam seu entendimento, e reduzem a precisão dos resultados. Por outro lado, os métodos analíticos, fundamentados em equações matemáticas, apresentam uma boa precisão na avaliação do fenômeno da luz, mas em determinadas situações são complexos para serem usados como ferramenta de projeto. Os métodos computacionais, desenvolvidos a partir de algoritmos, facilitam os numerosos cálculos dos métodos analíticos, mas precisam de equipamentos com capacidade para o processamento dos dados, além do estudo de programação ou desenho digital, por serem ferramentas especializadas.

Como um método experimental, os estudos de iluminação usando modelos físicos em escala reduzida permitem a compreensão e a avaliação da luz natural, com a representação tridimensional do fenômeno, em um ambiente interior. Estes modelos permitem fazer avaliações qualitativas mediante a observação direta do interior do espaço ou mediante a fotografia digital. Também é possível fazer avaliações quantitativas usando sensores fotométricos para o levantamento das condições de iluminação. Os estudos de iluminação com modelos físicos em escala reduzida, requerem um ambiente de exposição para o desenvolvimento dos seus testes. Esse ambiente de exposição pode ser o próprio lugar onde será construído o projeto, exposto ao céu real. Estas avaliações sob céu real estarão submetidas às variações da distribuição e a intensidade da luz exterior, geradas pelas condições climáticas do lugar, como por exemplo, a formação e o movimento das nuvens. Os testes de iluminação sob céu real são recomendados para avaliações qualitativas, onde o fenômeno da luz no interior do projeto, apresenta as condições naturais de variabilidade da luz ligadas ao clima e à hora do dia.

Mas para o desenvolvimento de estudos quantitativos e avaliações paramétricas, recomenda-se usar ambientes de exposição de iluminação controlados, conhecidos como “céus artificiais”. Um céu artificial deve gerar um ambiente de exposição com luminâncias e iluminâncias conhecidas e estáveis. Estes céus devem ser previamente avaliados e calibrados, para se determinar aspectos como o tamanho, a escala adequada, a instalação e os procedimentos de avaliação dos modelos físicos em escala reduzida. A qualidade de um céu artificial determina as condições para os estudos de iluminação, relacionados com o estudo e a confiabilidade dos resultados.

1.2 Céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC

A construção do céu artificial do Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon-Arq-UFSC) no ano 2005, para o estudo da iluminação natural na arquitetura, gerou a necessidade de avaliação e calibração deste ambiente. Este trabalho desenvolve-se nesta perspectiva, ou seja, visa estabelecer as características, a qualidade e as possibilidades que oferece esta ferramenta de avaliação de projetos. Para isso, são realizados estudos técnicos, experimentais e avaliações, que permitam garantir a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos na avaliação de modelos físicos em escala reduzida. Estes estudos são desenvolvidos com equipamentos de fotometria especializados, tais como, câmaras digitais, luminâncímetros, luxímetros, photocélulas, data loggers, computadores e softwares. Todos eles disponíveis dentro do acervo instrumental do LabCon-Arq-UFSC.

O céu artificial do LabCon-Arq-USFC consiste em um ambiente com 2,44 m de largura, 2,44 m de comprimento e 2,60 m de altura, com um sistema de iluminação artificial superior coberto por um forro difusor. Apresenta-se revestido em suas quatro paredes com placas de espelhos (Gráfico 1). Este céu foi construído com o apoio financeiro do projeto: “Revitalização/Capacitação do LabCon-Arq”, programa PROCEL Edifica, da Eletrobrás – MME.

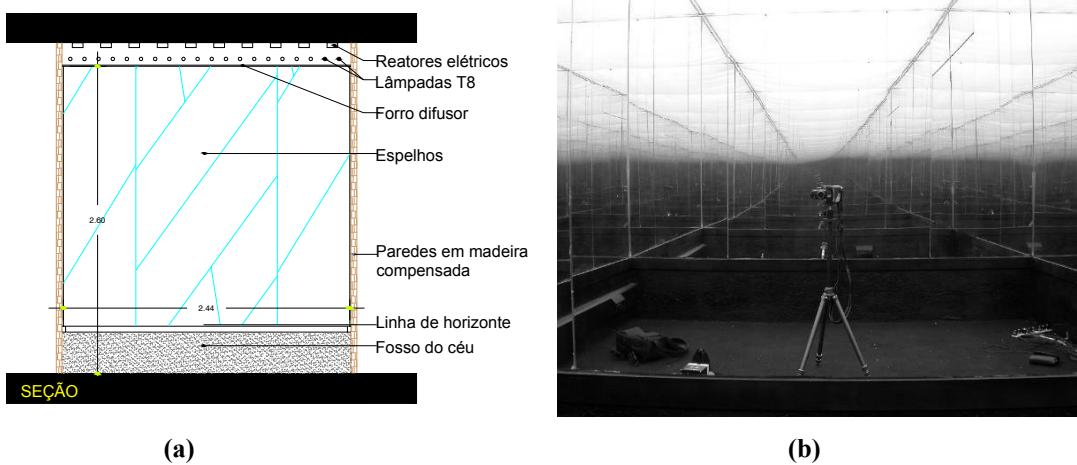


Gráfico 1. (a) Seção do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq- UFSC. (b) Interior do céu

2 OBJETIVO

Estabelecer parâmetros e procedimentos para avaliação, calibração e funcionamento de céus artificiais, para estudos de iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida.

3 METODOLOGIA

3.1 Considerações Iniciais

A partir da revisão bibliográfica do fenômeno da iluminação, da fotometria, das avaliações de iluminação com modelos em escala reduzida e de céus artificiais, foram levantados e analisados os aspectos da calibração, os erros e o funcionamento destes céus, obtidos pela experiência de sua utilização em pesquisa e ensino da iluminação na arquitetura. A partir destas informações foram caracterizados os principais requisitos de funcionamento do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC:

1. Apresentar um Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL) do céu artificial aproximado ao modelo analítico da C.I.E. para céu encoberto, donde o brilho do zênite em relação ao horizonte deve ter uma relação de 1 a 1/3, representado pela seguinte equação:

$$L(\theta) = L_z * (1 + 2*\sin(\theta))/3 \quad (\text{eq. 1})$$

2. Apresentar uma distribuição das iluminâncias no plano de análise com uma adequada uniformidade, que garanta dados confiáveis para o cálculo dos Fatores de Luz Natural (Daylight Factor - DF).
3. Apresentar níveis de iluminação que possam ser registrados pelos equipamentos de fotometria.
4. Apresentar mínima influencia de luz proveniente do fosso sobre a reflexão gerada pelos espelhos, na altura do horizonte entre 0 e 15 graus.
5. A relação dimensional entre o céu artificial e os modelos físicos em escala reduzida deve considerar aspectos tais como o tamanho, o posicionamento e o tratamento das superfícies exteriores, para evitar possíveis fatores de erro na avaliação da iluminação.
6. Considerar aspectos da manutenção e utilização do céu que possam afetar o desenvolvimento de avaliações de iluminação, com os modelos em escala reduzida.

Considerando a necessidade de atendimento desses requisitos, foram definidas as seguintes atividades:

1. Medir as luminâncias e as iluminâncias no céu artificial de caixa de espelhos.

2. Avaliar comparativamente o PDL obtido no céu artificial, com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E.
3. Avaliar a uniformidade e os níveis de trabalho das iluminâncias fornecidas pelo céu artificial.

3.2 Equipamentos de fotometria

3.2.1 Sistema fotométrico digital Lumetrix.

As medições e avaliações das luminâncias do céu artificial foram desenvolvidas usando o Sistema de Análise Fotométrico de Imagem Digital – IQCam e o programa RT-32 da empresa Lumetrix¹, Canadá. Este sistema registra dados de luminância em uma imagem digital e apresenta seus valores em unidades de cd/m², obtidos diretamente dos bits gráficos que compõem a imagem. O modelo utilizado tem uma lente “olho de peixe” com uma abertura angular de 185°. As imagens obtidas pela câmera são analisadas no programa RT-32, para o desenvolvimento de diversas avaliações, tais como seleção de intervalos de dados, faixas de avaliação e seções transversais obtidas das fotografias. Os dados podem ser exportados para planilhas de cálculo eletrônico como o Excel ou MatLab, para seu posterior processamento.

3.2.2 Sistema fotométrico LI-Cor

O sistema fotométrico da LI-Cor² foi utilizado para a medição e avaliação das iluminâncias no céu artificial. Este sistema permite a medição simultânea de 11 pontos, mediante a conexão das fotocélulas LI-Cor210SA (Figura 2) ao data logger LI-1000, que regista as unidades de iluminância em lux. As fotocélulas utilizam um fotodiodo filtrado de silício com uma resposta espectral aproximada à curva da sensibilidade do olho humano da C.I.E. dentro de ± 5%. Apresentam um bom desempenho na medição de condições de iluminação ainda com fontes de baixa intensidade. Sua estrutura compreende uma cabeça de alumínio anodizado com um filtro plano, que garante a correção do efeito co-seno, para uma resposta adequada à radiação em diferentes ângulos de incidência.

3.2.3 Calibração dos equipamentos

A calibração do sistema de medição de luminâncias foi garantido pela empresa Lumetrix, fabricante da câmera IQCam. Essa calibração de fábrica foi realizada entre os meses de novembro de 2005 e abril de 2006. A câmera apresenta um fator de erro de ±3%. A calibração das fotocélulas é recomendada no mínimo uma vez ao ano, por apresentar um desvio aproximado de 2% (LI-COR, 1991). Essa calibração geralmente é realizada por exposição a uma lâmpada padrão, em uma bancada fotométrica. Os erros de calibração são aproximadamente de 3%, onde a metade deste erro é devido às incertezas na calibração da própria lâmpada, pelo que esse dado deve ser conhecido. A calibração das fotocélulas foi realizada com um sistema portátil de calibração de sensores, denominado LI-1800-02 da LI-COR. Para o desenvolvimento deste trabalho foram necessárias três calibrações, feitas em setembro de 2005, outubro de 2006 e fevereiro de 2007

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Análise de luminâncias

A distribuição de luminâncias é o principal determinante da qualidade e funcionamento de um céu artificial. Por isto as atividades de medição e análise das luminâncias foram desenvolvidas para determinar a proximidade do PDL do céu artificial do LabCon, com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E. A metodologia para obter o PDL considera a medição de luminâncias a partir do zênite até a linha de horizonte, relacionando cada dado com a altura angular (COOKSY et al, 1989). Essa medição deve ser desenvolvida variando-se o azimute do céu, para determinar se o PDL corresponde a todas as direções deste espaço.

Neste trabalho a medição de luminâncias foi desenvolvida com o sistema de análise fotométrico de imagem digital da Lumetrix. Para tal, a câmera IQCam foi instalada em um tripé posicionado no

¹ Lumetrix, 2006 disponível em <http://www.iqcam.com>

² LI-COR Bioscience. www.licor.com

centro geométrico da planta do céu artificial, em uma altura determinada pela proporção de 2:3 e 1:2 dos espelhos com relação à tela difusora, segundo as indicações da pesquisa com céus artificiais apresentados no artigo “Limits of Sky” (COOKSY et Al, 1989). Para este estudo o sistema de medição permitiu obter dados de luminâncias no céu artificial a cada 0,09 graus de variação na altitude e no azimute. Esta medição realiza-se simultaneamente com uma fotografia digital que regista 1.310.270 dados de luminância, em uma imagem composta por uma malha de 1280 x 1024 pontos, representando em detalhe a distribuição das luminâncias no céu artificial de caixa de espelhos (Figura 1).

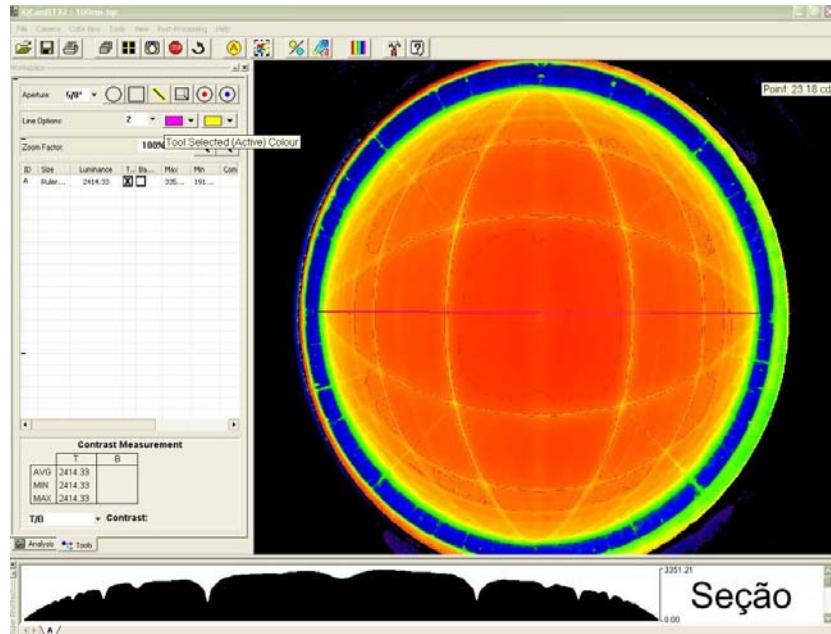


Figura 1. Tela de análise dos dados da luminâncias do programa RT-32

Considerando a quantidade de dados obtidos pelo sistema fotométrico digital Lumetrix, cada um dos dados foi relacionado com a sua altura angular e com o seu azimute no céu artificial de caixa de espelhos, para verificar aspectos de seu funcionamento, que são impossíveis de determinar com medições ponto a ponto, realizadas com um luxímetro convencional. O conhecimento destes aspectos visa determinar o nível de proximidade do PDL do céu de caixa de espelhos, com o modelo analítico de céu encoberto da C.I.E. Com a imagem obtida pela câmara a 1,00m do piso, os dados foram exportados para uma planilha eletrônica, onde foram processados para a avaliação do PDL frente ao modelo analítico de céu encoberto da C.I.E., partindo do valor máximo de luminância obtido no zênite de 3353 cd/m².

Para estabelecer as variações do PDL do céu artificial, com relação ao modelo analítico do céu encoberto da C.I.E. foi calculado o Erro Médio Percentual Absoluto (MAPE) (LJUNG e GLAD, 1994), aplicando a seguinte equação:

$$\text{MAPE} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{\hat{y}_{\max} - \hat{y}_{\min}} \quad (\text{eq. 2})$$

- Onde: n = é o número de dados (940 dados)
 \hat{y}_i = é o i-ésimo dado experimental (P.D.L. Céu Artificial LabCon)
 y_i = é o i-ésimo dado do modelo (C.I.E.)
 \hat{y}_{\max} = é o maior valor dos dados experimentais
 \hat{y}_{\min} = é o menor valor dos dados experimentais

Os dados obtidos da seção da imagem digital, que representam o PDL do céu artificial, foram 940 registros de luminância em cd/m^2 , correspondentes a alturas angulares entre 0 e 180 graus. Estes mesmos dados foram calculados com o modelo analítico do céu encoberto da C.I.E., para as comparações dos dados ponto a ponto.

O MAPE obtido da avaliação comparativa, entre o PDL do céu artificial do LabCon e o modelo analítico da C.I.E., foi 6,79%, considerando a totalidade dos 940 dados de luminância de uma seção do céu, no sentido leste–oeste (Gráfico 2a). A avaliação do PDL foi complementada com a análise da seção norte–sul do céu, para verificar o seu funcionamento com relação ao azimute, assim o MAPE obtido foi de 6,86%, obtido a partir da mesma base de dados com que foi desenvolvida a análise da seção leste–oeste (Gráfico 2b).

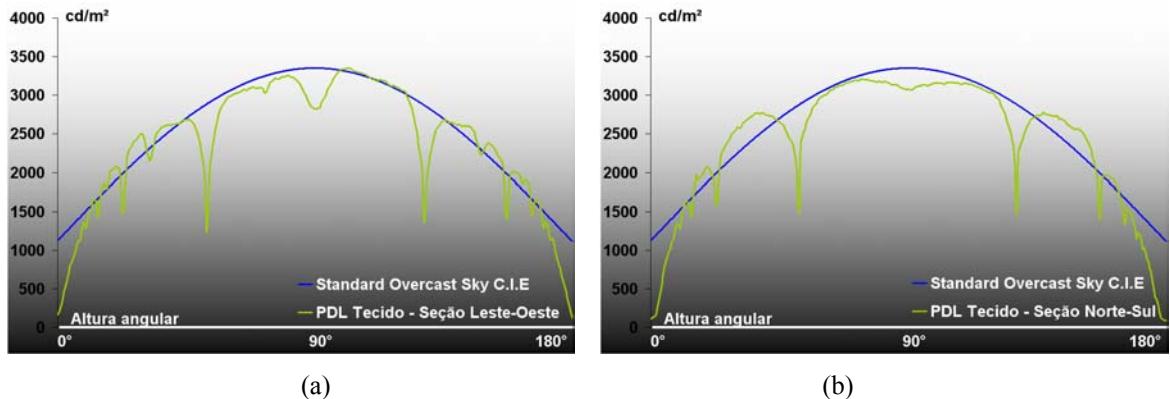
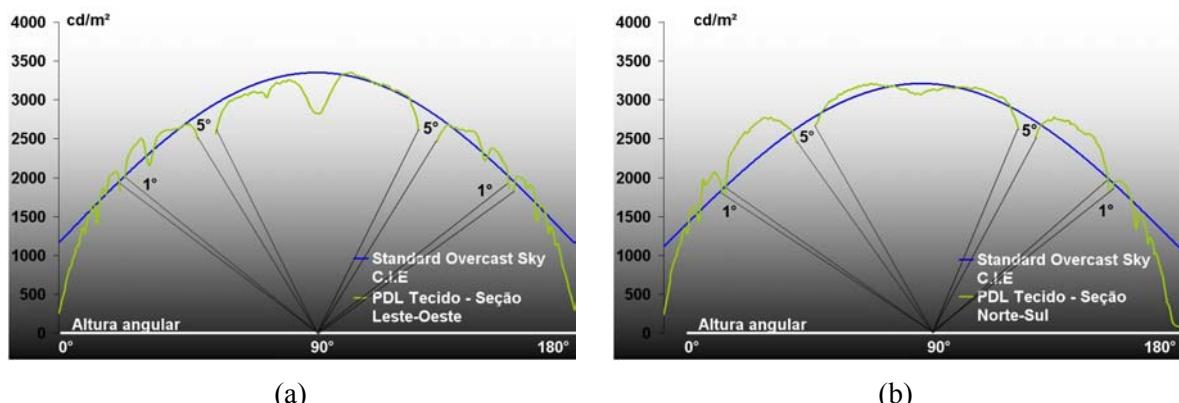


Gráfico 2. (a) PDL do céu no sentido Leste–Oeste. (b) PDL do céu no sentido Norte–Sul.

Os erros de 6,79% na seção leste–oeste, e de 6,86% na seção norte–sul, apresentam uma boa aproximação do PDL do céu artificial do LabCon-Arq-UFSC, com relação ao modelo analítico da C.I.E., para avaliações de iluminação com modelos em escala reduzida, considerando que a modelagem na engenharia trabalha com um erro aceitável de 10% (AGUIRRE, 2004; THANACHAREONKIT, 2005), entre dados experimentais e modelos analíticos.

O PDL do céu em ambas as seções, apresentou erros gerados pela faixa obscura da união entre o forro difusor e as paredes de espelhos. Isso é um comportamento normal para estes tipos de céu artificiais, e só pode ser melhorado com a ampliação da cavidade das lâmpadas. Assim, com os dados avaliados, foram identificadas as alturas angulares destes dados errôneos para desconsiderá-los no cálculo do MAPE, e avaliar assim a possibilidade de aproximar o PDL do céu de caixa de espelhos com o modelo analítico de céu, nas suas seções leste–oeste e norte–sul. Os dados desconsiderados foram 5 graus na porção do PDL afetada pela faixa da união entre o forro difusor e as paredes espelhadas, e 1 grau no primeiro reflexo desta nos espelhos (Gráficos 3a–3b). O MAPE obtido com estas avaliações foi de 4,94% na seção leste–oeste e de 6,02% na seção norte–sul.



Gráficos. (a) Erros desconsiderados na seção leste–oeste. (b). Erros desconsiderados na seção norte–sul.

As medições de luminância desenvolvidas com o sistema fotométrico digital Lumetrix permitiram observar a configuração do PDL do céu artificial, além das seções já apresentadas. Cada uma das medições realizadas gerou uma base de dados de 980 x 980 dados de luminância em cd/m², que foram processados no programa MatLab. Os resultados desta avaliação permitiram concluir que o PDL do céu artificial apresenta um funcionamento próximo ao modelo analítico, com uma proximidade superior a 93% com relação ao modelo Standard Overcast Sky da C.I.E. Esta distribuição de luminâncias entre o zênite e a linha do horizonte permanece uniforme nos 360 graus do azimute do céu, sendo que seu funcionamento é garantido em todas as direções do céu artificial. O Gráfico 4 apresenta os dados totais da luminância do céu artificial, gerados pelo programa MatLab. Nesta imagem a cor vermelha representa o maior nível de luminâncias, superior a 3000 cd/m², até diminuir, para a cor azul, com dados de luminância entre 500 e 1000 cd/m² (Gráfico 4).

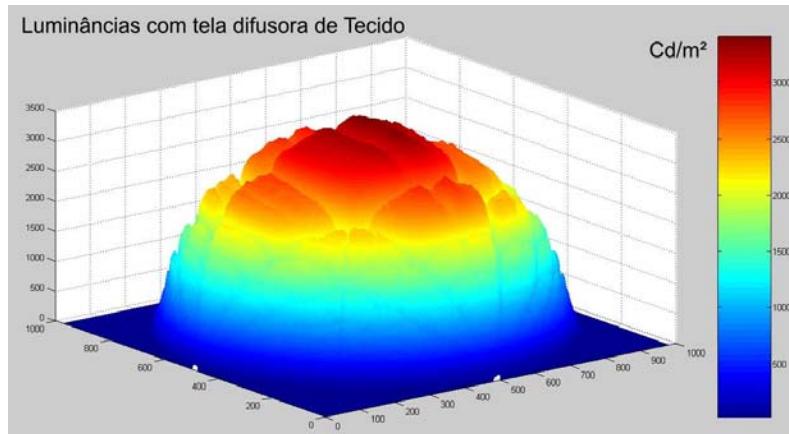


Gráfico 4. PDL geral do céu artificial avaliado e processado no programa MatLab.

4.2 Análise de iluminâncias

O mapeamento da distribuição de iluminâncias foi realizada com planos de isolux do céu artificial, começou com a definição de orientações no interior da sala de espelhos. Por convenção, determinou-se cada uma das paredes com as orientações cardinais. A parede do céu onde está localizada a porta foi identificada como Oeste, e seguindo a ordem nomeou-se as paredes Norte, Leste e Sul. Considerando o número de fotocélulas disponível para este estudo, foi definida uma malha de 11 x 11 pontos, com um ponto a cada 22 cm de distância. Esta malha de pontos foi estabelecida adequadamente pelas fotocélulas em cada uma das medidas realizadas, suportadas em uma estrutura de alumínio sustentada por um tripé com apoios nas extremidades, garantindo a horizontalidade desta, durante a tomada de dados de iluminância. Este suporte foi disposto a uma altura de 100 cm do chão, com bases de madeira para a instalação das fotocélulas, que foram niveladas uma a uma antes de cada medição, como mostra o esquema apresentado no Gráfico 5a-b.

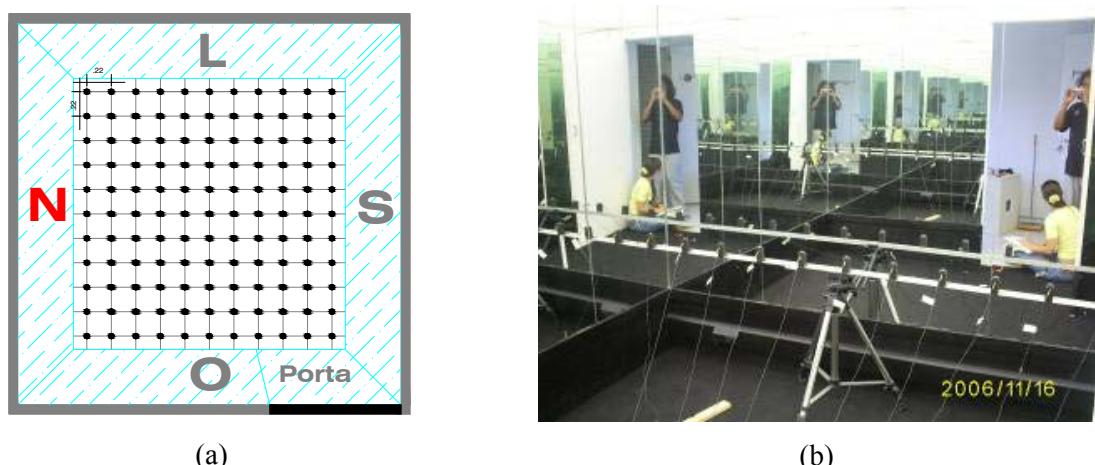


Gráfico 5. (a) Malha de pontos para localização das fotocélulas. (b) Suporte das fotocélulas

A metodologia de medição das iluminâncias para a construção da malha consistiu em deslocar a estrutura de suporte a cada 22 cm. Assim, o suporte das fotocélulas que foi localizado no sentido norte-sul do céu, foi deslocado sucessivamente a cada 22 cm em direção leste-oeste, cobrindo os 11 pontos que formam a malha. A malha de dados obtida foi processada em uma planilha de cálculo eletrônico, para análises e construção de gráficos com curvas isolux, e assim, foram identificadas a uniformidade e a distribuição de iluminâncias no céu artificial de caixa de espelhos do LabCon.

Esta avaliação permitiu identificar a uniformidade na distribuição de iluminâncias no céu artificial. Apresentada nos dados de iluminância em lux, registrados no céu artificial no dia 17 de novembro de 2006 (Gráfico 6).

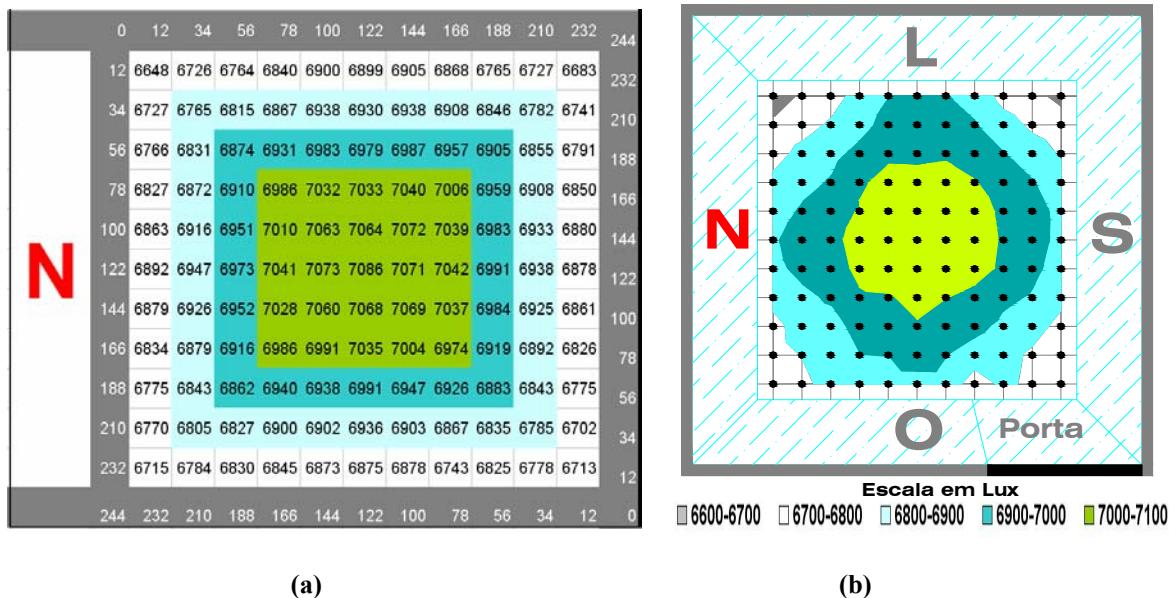


Gráfico 6. (a) Dados de Iluminância em lux do Céu Artificial do LabCon. (b) Curvas de isolux

A letra N no lado esquerdo da tabela indica a localização da parede norte do céu, na borda de cor cinza da tabela. São apresentadas as referências em centímetros dos pontos que formam a malha. Para a avaliação das iluminâncias foi utilizado como critério a seleção de seções concêntricas no céu artificial, conservando a proporção quadrada da planta. Com esta definição foram determinadas 4 zonas de avaliação, sendo a primeira a totalidade da planta do céu com a malha de 11x11 pontos, em seguida uma zona de 9 x 9 pontos, uma de 7 x 7 pontos e finalmente uma de 5 x 5 pontos. Uma malha de 3 x 3 pontos seria a última opção de avaliação concêntrica do céu, mas o seu tamanho seria pequeno demais para um aproveitamento da área central do céu artificial. A referência dos pontos determina o tamanho de cada zona de avaliação, e define a distância destas zonas às paredes de espelhos, segundo as coordenadas apresentadas na borda cinza do gráfico 6. As curvas de isolux permitiram identificar qualitativamente a correspondência de cada uma das zonas concêntricas definidas, com a distribuição das iluminâncias, após superposição da malha sobre uma planta do céu artificial (Gráfico 6b).

A análise geral das iluminâncias no interior do céu determinou um valor máximo de 7086 lux, um mínimo de 6648 lux e uma iluminância média de 6899 lux, considerando os 121 pontos da malha. Com esses dados foi calculada a uniformidade geral do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-USFC, assim, a uniformidade das iluminâncias geral do céu obtida foi 96,36%, aplicando a fórmula:

$$U = \text{Emin} / \text{Emédia} [\%] \quad (\text{eq. 3})$$

O processo de avaliação das iluminâncias foi aplicado para cada uma das zonas concêntricas previamente definidas, calculando assim, a uniformidade de cada uma delas, com os seguintes resultados: na malha de 9 x 9 pontos 97,4%, na malha de 7 x 7 pontos 98,16%, e na malha de 5 x 5 pontos 99,11%.

Com estes resultados foi definida a malha de 5 x 5 pontos, como a zona 1 para a instalação e a avaliação dos modelos arquitetônicos no interior do céu artificial. As dimensões desta zona são 0,88m x 0,88m com uma área de 0,77m², que representa 13% da área total do céu artificial (Gráfico 7a). Essa área determina um tamanho adequado para a construção dos modelos arquitetônicos, que possibilita obter uma boa proporção nas suas dimensões. Entretanto, considerando que a malha de 7 x 7 pontos apresenta uma uniformidade na distribuição das iluminâncias de 98,16%, essa área foi definida como uma zona 2 adicional, com dimensões de 1,32m x 1,32m. Assim, possibilita-se a avaliação de modelos de maior tamanho, como por exemplo, modelos urbanos, ou modelos arquitetônicos que ocupem com seu volume a totalidade da zona 1, e que seja determinante no projeto, avaliar seu entorno construído, utilizando a zona 2 (Gráfico 7b).

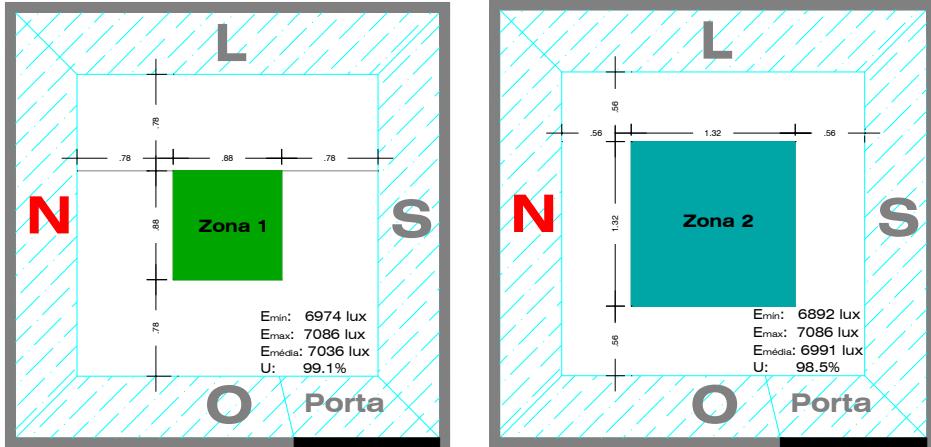


Gráfico 7. (a) Zona 1 para localização de modelos arquitetônicos no céu artificial. (b) Zona 2.

4.3 Espaço de trabalho no céu artificial

Após dos ajustes e da calibração do céu artificial, foi realizada a definição de um espaço de trabalho para a instalação e avaliação dos modelos arquitetônicos. A definição deste espaço de trabalho permite especificar as dimensões dos modelos, além de determinar a sua localização no interior do céu artificial. A definição do espaço de trabalho foi determinada considerando um volume tridimensional, contido na zona 1 da distribuição de iluminâncias, e nas alturas do PDL avaliadas. Assim, foi definido um paralelepípedo de 0,80m de largura x 0,80m de comprimento e x 0,60m de altura, gerando um volume cúbico que ocupa 2,48% do volume total do céu artificial. A base do paralelepípedo deve estar localizada entre 0,60m e 0,70m do piso, para que sua altura nunca supere o limite da linha de horizonte a 1,40m do piso, devido ao aumento do erro no PDL desta altura, com a proximidade ao forro difusor (Figura 2).

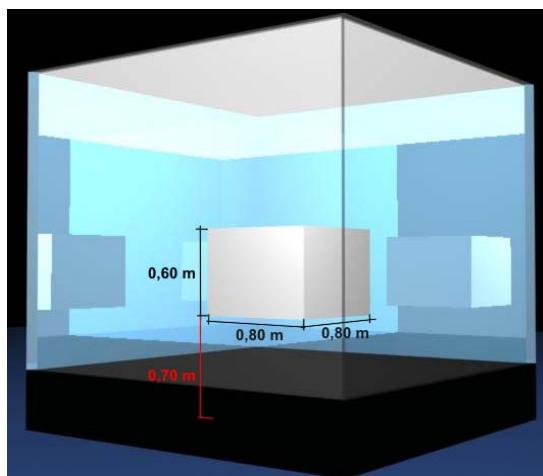


Figura 2. Paralelepípedo virtual de 80 x 80 x 60, cm para delimitação e instalação dos modelos arquitetônicos.

5 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível avaliar e considerar os principais aspectos para o funcionamento de um céu artificial de tipo “caixa de espelhos”, partindo dos parâmetros definidos na revisão bibliográfica e nas atividades desenvolvidas para sua calibração. Assim, apresenta-se uma avaliação completa do céu artificial, em todos seus aspectos: suas características físicas como forma da planta e dimensões, seu sistema de geração de iluminação, seu funcionamento na distribuição de luminâncias e iluminâncias e finalmente sua relação com os modelos em escala reduzida.

Todas as atividades desenvolvidas para a avaliação e calibração do céu artificial, após da sua construção, visaram aproximar o Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL) ao modelo analítico de céu encoberto da C.I.E. O PDL encontrado foi próximo a 93%, em relação ao céu padrão da C.I.E, em todas as direções do azimute, o que permite concluir que o céu artificial apresenta um funcionamento adequado e sua correta utilização permite a simulação e avaliação de iluminação na arquitetura com modelos em escala reduzida.

Os erros identificados tais como a faixa de união entre o forro difusor e as paredes de espelhos e a redução da iluminação no centro do zênite do céu, ainda que possam ser corrigidos, não representam melhorias significativas no PDL do céu artificial.

Os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que o método de medição e avaliação de luminâncias com o sistema fotométrico digital Lumetrix, e o método de medição e avaliação de iluminâncias com o sistema fotométrico Li-Cor, deve ser considerado como adequado para construir, ajustar, calibrar e utilizar corretamente um céu artificial de tipo “caixa de espelhos”. Assim, o estudo fotométrico desenvolvido é o principal aporte deste trabalho, permitindo além da calibração do céu artificial, a definição da relação entre o céu e os modelos arquitetônicos em escala reduzida. Todas as medições realizadas permitiram gerar ampla base de dados de luminância e iluminância, obtidas com equipamentos corretamente calibrados. Assim, o processamento e análise dos dados, permitiu avaliar o funcionamento do céu artificial de caixa de espelhos do LabCon-Arq-UFSC.

A avaliação do PDL do céu em suas seções leste-oeste e norte-sul, em diferentes alturas do plano do trabalho, foram complementadas com o estudo de iluminâncias da zona 1 do céu, nas mesmas alturas. Assim, todos os aspectos do funcionamento do céu artificial, na distribuição e intensidade das luminâncias e iluminâncias, ficaram contidos na definição do paralelepípedo virtual de 0,80m x 0,80m de base e uma altura de 0,60m. Este volume delimita o tamanho dos modelos arquitetônicos em escala reduzida, determina sua localização entre alturas de 0,60m e 1,40m do chão, e define sua orientação, para um adequado desenvolvimento dos estudos de iluminação na arquitetura aplicando o método de modelos físicos em escala reduzida.

6 REFERÊNCIAS

- AGUIRRE J. Ingeniería de procesos: Un acercamiento, Ed 1, febrero de 2004. ISBN 958-9352-70-7
- COOSKY, C., LOVELAND J., MILLET, M., VANAGS, A. “Limits of the sky”. Testing and evaluation of the current state-of-the art in mirror-box sky simulation. Departament of Architecture University of Washington. Washington, 1989.
- ISO/FDIS - 15469 - CIE S 011/E. Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky. INTERNATIONAL STANDARD. 2003.
- LI-COR, LI-COR radiation sensors - Instruction manual, LI-COR inc. Publication No. 8609-56, Lincoln, USA, 1991.
- LJUNG L. and GLAD T. Modeling of dynamic system, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 361 pages, ISBN 0-13-597097-0, 1994.
- THANACHAREONKIT, A., ANDERSEN, M. SCARTEZZINI, J-L. Comparing daylighting performances assessment of buildings within scale models and test modules. Laboratoire d’Energie Solaire et de Physique du Bâtiment (LESO-PB). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH – 1015 Lausanne. 1998.