

176 - Céu Artificial Retilíneo a FAU-USP: Desenvolvimento e Construção de Equipamento para Aplicação Didática

Fau-Usp's Rectilinear Artificial Sky: Development and Construction of Equipment for Educational Purpose

LUZ, Bruna (1); FERREIRA, Luciana S. (2); MOURA, Norberto C. S. (3); ALUCCI, Márcia P. (4)

(1) Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: bluz.79@gmail.com

(2) Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: lu_schu@yahoo.com.br

(3) Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: norbertomoura@terra.com.br

(4) Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: marcialu@usp.br

Resumo

Este artigo trata da construção de um céu artificial retilíneo para fins didáticos e introduz um sistema de elevação da base para calibragem aproximando a distribuição das luminâncias ao céu encoberto padrão C.I.E. Para tanto, foram levantados exemplos construídos e publicados, descrições teóricas e materiais adequados à construção, concepção, e calibragem do céu artificial. Os dados obtidos no ensaio e na simulação computacional passaram por análise comparativa. O céu artificial calibrado configura um céu encoberto com iluminância de aproximadamente 12000 lux, correspondendo ao plano horizontal desobstruído. As verificações comparativas com o resultado de simulações computacionais (Radiance e Ecotect) mostraram-se satisfatórias. A contribuição inovadora deste trabalho está no mecanismo de calibragem por meio do fundo móvel do equipamento que possibilita a variação da altura interna da caixa de espelhos ajustando a distribuição das luminâncias nas superfícies internas e, conseqüentemente, a iluminância no centro da caixa, aproximando do modelo teórico do céu encoberto padrão C.I.E.

Palavras chave: iluminação natural, céu artificial, distribuição de luminâncias, ensaio em maquete.

Abstract

This paper presents the construction of a rectilinear artificial sky for education purposes. It is also introduced a system of lifting of the base to calibrate and adjust the illuminance distribution according to the CIE model. To do so, examples built and published were studied in detail, together with the study of theoretical references, appropriate materials to built the sky and means of calibration. The data obtained from the physical tests and simulations were submitted to a comparative analysis. The artificial sky corresponds to an overcast sky of approximately 12000 lux in the unobstructed horizontal plan. The results of the comparative analysis, (in which the simulations were carried out with the software Radiance e Ecotect) were satisfactory. The specific contribution of this work is in the mechanism of calibration by means of the adjustable base, which allows the variation of the internal height of the mirrored box to the adjustment of the luminance

distribution in the internal surfaces and, consequently, the illuminance in the centre of the box, searching for an approximation to the overcast sky of CIE standards.

Keywords: daylighting; artificial sky, luminance distribution, models scales essays

Introdução

O sol e a luz espalhada pela abóbada celeste (luz do céu) são as fontes naturais utilizadas na iluminação de ambientes. No entanto, existe a necessidade de controle da luz proveniente diretamente do sol, devido aos indesejados e inerentes problemas de calor, brilhos e contrastes excessivos. Nos estudos de iluminação é comum considerar apenas a luz proveniente da abóbada celeste, excluindo a luz solar direta sobre os locais de trabalho, por meio de dispositivos de proteção ou pela adequada orientação e geometria das aberturas, adotando a condição de céu encoberto.

O uso clássico de modelos físicos em escala reduzida na arquitetura (maquetes) apresenta vantagens ainda não substituídas por modelos computacionais, possibilitando visualizar detalhes do projeto. Para verificar aspectos relativos à iluminação natural, o uso de maquetes é apropriado, pois devido aos pequenos comprimentos de onda da radiação luminosa dispensa-se correções de escala, visualizando-se fielmente os efeitos de penetração, reflexão e comportamentos genéricos da luz (ROBBINS, 1986).

Os estudos de iluminação em maquetes podem ser realizados através de ensaios sob condições de céu real ou por meio de medições em equipamentos que simulem uma ou mais condições de céu, denominados de céu artificial. A principal vantagem do uso desses equipamentos é a luminosidade controlada, o que permite variações no modelo sem mudanças das condições de exposição, facilitando a análise do fenômeno (HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1975). ANDER (1995) e ROBBINS (1986) consideram altas as despesas para a construção e manutenção desse tipo de equipamento, mas ressaltam as facilidades de utilização do equipamento.

Existem dois tipos principais de céu artificial: o hemisférico (FIG. 1a e 1b), que simula condição de céu claro ou encoberto e o retilíneo (FIG. 1c), mais simples, que simula apenas condição de céu encoberto.

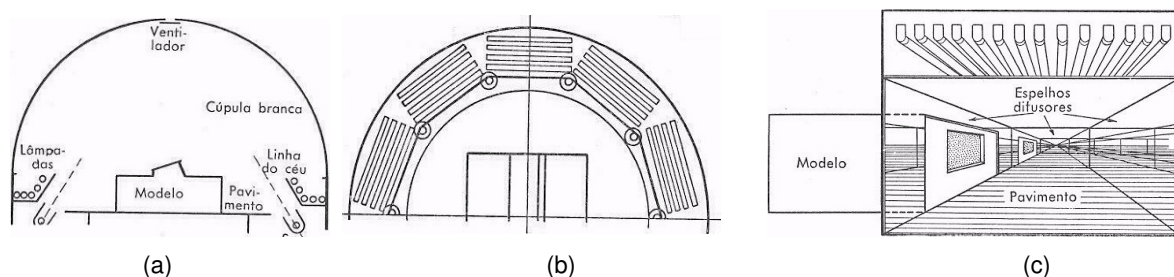


Figura 1 – corte(a) e meia planta(b) no céu hemisférico e corte (c) no céu retilíneo(HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1975).

A variação de luminância no céu hemisférico ou em abóbada é obtida devido à complexidade desse equipamento, composto por diversas lâmpadas que tornam possível simular diferentes condições de céu, com sol (claro) ou sem sol (encoberto). No entanto, as dimensões necessárias e a manutenção deste tipo de equipamento fazem com que seja caro e pouco indicado ao uso didático. Já o modelo de céu retilíneo, do tipo “caixa de espelhos”, é composto por uma caixa retilínea com teto luminoso e espelhos planos paralelos nas faces verticais, podendo ser construído em pequenas dimensões, contendo uma abertura lateral para encaixe da maquete, ou em grandes dimensões para colocar toda a maquete no seu interior.

Para o céu retilíneo as dificuldades existentes referem-se à manutenção da temperatura ideal de funcionamento das lâmpadas, o que pode ser solucionado com auxílio de ventilação. Este tipo de céu, devido a sua pequena complexidade construtiva, é recomendado para fins didático (HOPKINSON, PETHERBRIDGE e LONGMORE, 1975).

Para a construção e utilização desse tipo de equipamento encontra-se dificuldade no tocante a calibragem, pois, na bibliografia pertinente, pouco é encontrado sobre como ajustar a distribuição das luminância para atingir a correlação de 1:3 (1 no horizonte para 3 no zênite) do céu encoberto padrão C.I.E.

Este artigo trata da construção de um céu artificial retilíneo, introduzindo um mecanismo inovador de calibragem para ajustar a distribuição das luminâncias, aproximando-a das condições do céu encoberto padrão C.I.E.

Céu Artificial Retilíneo: Revisão Bibliográfica

Para a construção do céu artificial foram estudados os equipamentos apresentados por Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975) e por Moore (1991) do tipo caixa cúbica de espelhos, obtendo os seguintes requisitos:

1. superfície luminosa com distribuição de luminância conhecida e controlada (representa o céu);
2. superfície de refletância conhecida (representa o solo);
3. horizonte corretamente colocado em relação aos modelos a serem usados;

A correta distribuição de luminâncias é obtida pela seleção adequada dos materiais difusores e pela correta colocação das lâmpadas, podendo atingir uma distribuição semelhante à do céu padrão C.I.E. No modelo de céu “caixa cúbica de espelhos” a absorção da luz no espelho em virtude das múltiplas reflexões permite que o horizonte seja menos brilhante que o zênite.

As especificações técnicas fornecidas por Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975) e as características do céu artificial da BRS (Building Research Station), estão apresentadas na TAB.1 a título de comparação.

Tabela 1 – Especificações técnicas para construção de céu artificial retilíneo.

Céu Artificial em instalação permanente na Building Research Station.	Céu Artificial “caixa de espelhos” difundido com fins didáticos.
Dimensões 4,80 m x 4,80 m Altura- 1,90 m	Dimensões 1,80 m x 1,50 m Altura- 0,60 m
N° de Lâmpadas 201	N° de Lâmpadas 24
Tipo de Lâmpada Fluorescente Potência- 80 W	Tipo de Lâmpada Fluorescente Potência- 80 W

Na EESC-USP (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo) encontra-se um céu artificial modelo caixa cúbica de espelho construído no decorrer de uma iniciação científica patrocinada pelo CNPq e orientada pelo Prof. Dr. Admir Basso. O céu artificial da EESC-USP foi construído baseado nos modelos descritos por Moore (1991) e por Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975). Em visita a São Carlos para entrevistar o Prof. Dr. Admir Basso da EESC-USP, foram constatados alguns dos problemas ocorridos durante sua execução, destacando-se a deformação estrutural e o conseqüente não paralelismo

das superfícies espelhadas. Dessa visita surgiram as seguintes recomendações para a construção do céu artificial retilíneo:

- A estrutura deve ser rígida para dar sustentação aos espelhos, garantindo o paralelismo;
- Amarrar as peças evitando a torção e deformação das peças;
- Posicionar um espelho sobre as lâmpadas aumentando o nível de iluminância do céu;
- Localizar os reatores das lâmpadas na parte externa da caixa evitando seu aquecimento.

Céu Artificial Retilíneo Construído Na FAU-USP

O céu artificial construído na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo FAU-USP foi parte de uma iniciação científica patrocinada pela FAPESP e orientada pela Prof^a Dr^a Marcia Peinado Alucci. O projeto do céu artificial partiu da análise comparativa dos modelos descritos por Moore (1991) e por Hopkinson, Petherbridge e Longmore (1975) e levou em consideração a experiência do céu construído em São Carlos na EESC-USP.

Dimensões e Projeto

Para evitar problemas de deformação das peças optou-se por construir um céu artificial de dimensões inferiores aos exemplos estudados. O foco do projeto desenvolvido foi a facilidade construtiva somada à rigidez estrutural e ao mecanismo de calibragem, ou seja, foi desenvolvido para ser fácil de construir e montar, com poucas e pequenas peças, resultando em uma estrutura rígida com o mínimo de juntas e amarrações para evitar deformações ou torções. A construção do equipamento foi executada no Laboratório de Modelos e Ensaio da FAUUSP-LAME.

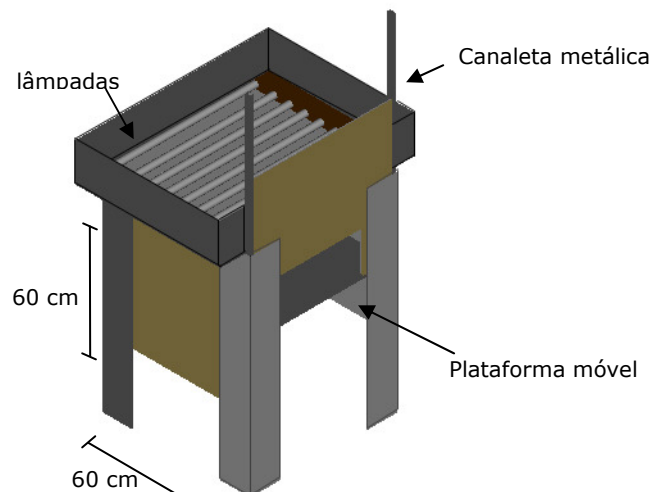


Figura 2 – Perspectiva do Céu Artificial Construído na FAU-USP.

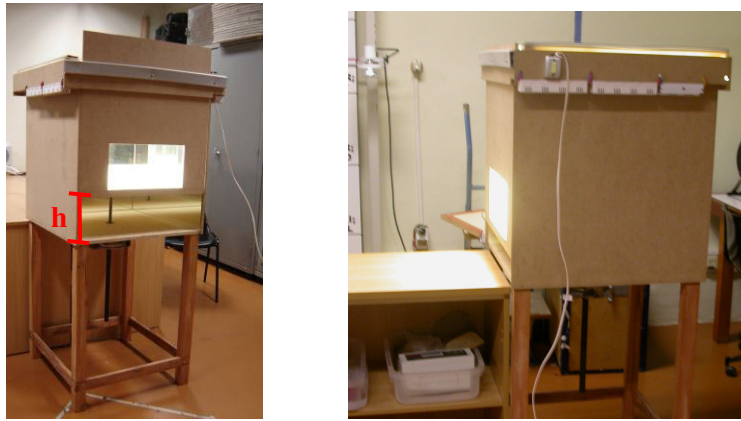


Figura 3 – Foto do Céu Artificial Construído na FAU-USP.

O céu foi construído em MDF, os espelhos foram colados nas placas verticais laterais e as lâmpadas foram dispostas no topo em uma caixa, acima da placa difusora de acrílico leitoso, como pode ser visto na FIG.4. O resultado quanto ao paralelismo foi satisfatório.

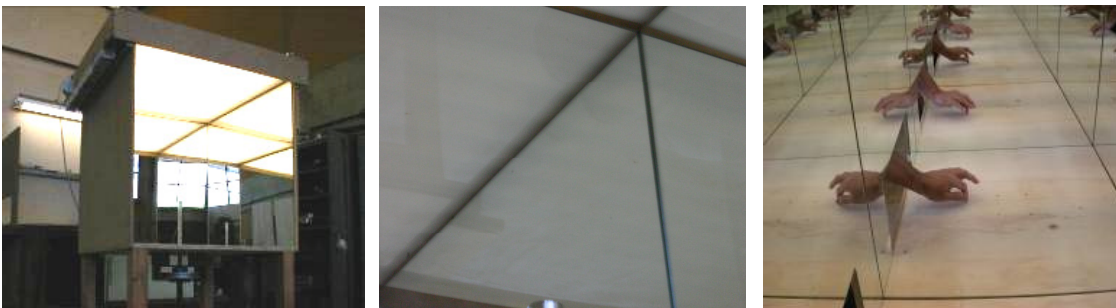


Figura 4 – Verificação do paralelismo obtido entre os espelhos internos do céu artificial.

A caixa de lâmpadas foi projetada para exercer dupla função, acomodando as lâmpadas tubulares fluorescentes (potência 16w, temperatura de cor 4000K a 4100K, índice de reprodução de cor $\geq 85\%$ e comprimento 0,6m) em local arejado e promovendo o travamento estrutural da caixa de espelhos. Desse modo, resolve tanto a questão estrutural como o aquecimento e a ventilação das lâmpadas. Os reatores eletrônicos de partida instantânea (127 V) foram locados externamente à caixa de lâmpadas para evitar o superaquecimento.

A abertura de dimensões fixas (36cm x 18cm) limita a escala do modelo e o tamanho máximo da janela estudada. Esta abertura foi projetada para ensaios com modelos na escala 1:20. Porém qualquer modelo, em qualquer escala, pode ser ensaiado desde que sua abertura seja condizente com a abertura do céu e com o sensor disponível.

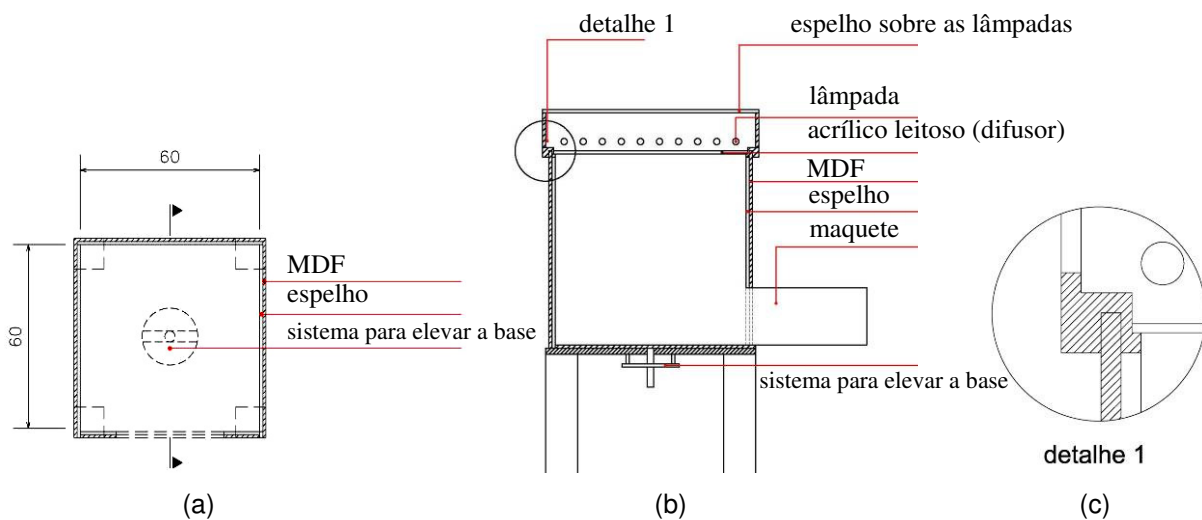


Figura 5 – Céu artificial em planta (a), em corte (b) e detalhe (c).

O plano difusor deve ser o mais próximo possível do difusor perfeito, aproximando da condição de céu encoberto. O vidro jateado seria a opção desejável, porém o elevado custo o inviabilizou, sendo adotado o acrílico leitoso branco. Tal solução apresentou, a princípio, manchas em “vales escuros” entre as lâmpadas (FIG.6a), o que foi solucionado com um espelho colocado sobre as lâmpadas, potencializando o fluxo luminoso, além de minimizar as manchas no plano difusor (FIG.6b).

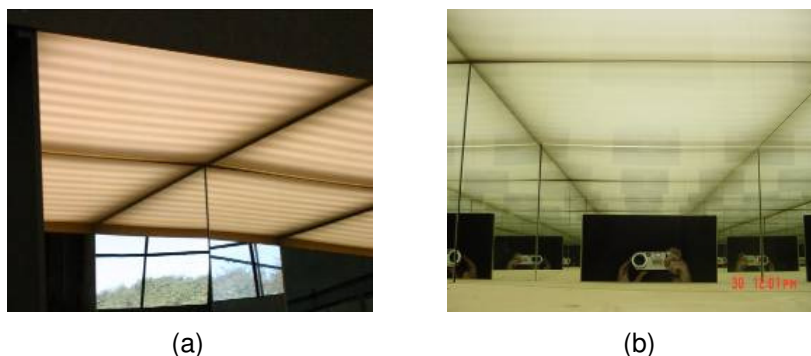


Figura 6 – Plano difusor sem espelho sobre as lâmpadas (a) e plano difusor com espelho sobre as lâmpadas (b) minimização do efeito de vales escuros entre as lâmpadas.

Mecanismo para Calibragem

O mecanismo construído para calibrar o céu artificial foi concebido a partir de ensaios preliminares, que possibilitaram perceber que existe uma relação entre a área de espelhos interna à caixa e a distribuição de luminâncias proporcionada pela absorção do material (espelho) a cada reflexão da fonte luminosa, o que permite alcançar uma distribuição semelhante a do céu padrão C.I.E.

Ensaio Preliminar

Para identificar a perda de luminância a cada imagem obtida com os espelhos paralelos e desta forma prever o número de imagens necessárias para obter a proporção 1:3 entre o zênite e o horizonte foram dispostos paralelamente dois pequenos espelhos localizados sob uma lâmpada fluorescente, simulando o que ocorre no céu artificial retilíneo. Foram tomadas as luminâncias, com auxílio do luminômetro LMT L1003, em três direções para as diversas imagens geradas pela lâmpada (FIG.7)

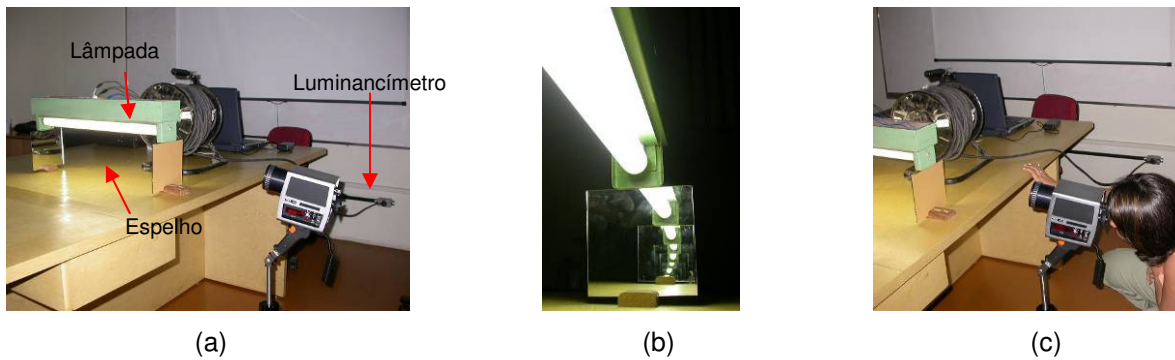


Figura 7 – Sistema de espelhos paralelos com a lâmpada fluorescente (a), imagens da lâmpada reproduzida no espelho (b) e leitura das luminâncias com o luminancímetro (c).

Os testes mostraram que, em direção à normal do espelho, o índice de reflexão aproxima-se de 0,9. Admitindo-se o índice de reflexão 0,9 do espelho, pode-se calcular quantas reflexões são necessárias para atingir a proporção desejada 1/3. Na TAB.2 observa-se que, partindo de 3 cd/m², são necessárias 10 reflexões para atingir 1 cd/m².

Tabela 2 – Cálculo do nº de reflexões necessárias para atingir a relação 1/3

Nº de Reflexões	Luminância cd/m ² Ângulo de 90º	Reflexões
0	3	0,9
1	2,7	0,9
2	2,43	0,9
3	2,187	0,9
4	1,9683	0,9
5	1,77147	0,9
6	1,594323	0,9
7	1,4348907	0,9
8	1,2914016	0,9
9	1,1622615	0,9
10	1,0460353	0,9
11	0,9414318	0,9

Nota: são necessárias 10 reflexões para atingir aproximadamente a relação de 1/3.

Mecanismo Construído

Para variar a altura interna da caixa de espelhos, uma de suas laterais, a que contém a abertura, foi fixada ao fundo, formando uma única peça em “L”, a qual é elevada por meio do sistema mecânico de elevação com parafuso sem fim e rolamento apropriado. Este sistema de elevador possibilita ajustes referentes à calibragem e posicionamento da linha do horizonte.



Figura 8 – Mecanismo para Suspensão da Base do Céu Artificial.

Calibragem

Na calibragem buscou-se determinar a altura (h) (FIG.3) cuja distribuição das luminâncias mais se aproximasse do modelo C.I.E. ou seja, com a luminância do zênite três vezes superior a luminância no horizonte. (CIE 110,1995).

Para tanto foi utilizado um luminômetro LTM L 1003 posicionado em local equivalente ao meio de uma maquete hipotética (a 18cm da abertura do céu e a 4,5cm de altura em relação à base) e no centro do equipamento para determinar a luminância do zênite do céu artificial (FIG.9).



Figura 9 – Foto do Luminômetro posicionado para calibragem do céu artificial.

Devido às pequenas dimensões do céu artificial há grande influência da abertura adotada (janela máxima de 36cm x 18cm) na altura da linha do horizonte. Optou-se por calibrá-lo a partir da linha superior da imagem da abertura.



Figura 10 – Fotos ilustrativa da obstrução causada pela abertura do equipamento.

A calibragem foi feita para quatro alturas (h) distintas: 31cm, 36cm, 40,5cm e 52cm. Para cada uma dessas alturas foram realizadas medidas variando tanto o ângulo vertical do luminômetro como o ângulo

horizontal, além da medida de luminância do zênite. Pode ser observado na FIG.11 que os ângulos superiores a 25° apresentam luminância constante e igual à fonte luminosa, pois estão sempre direcionados para o plano superior do céu artificial.

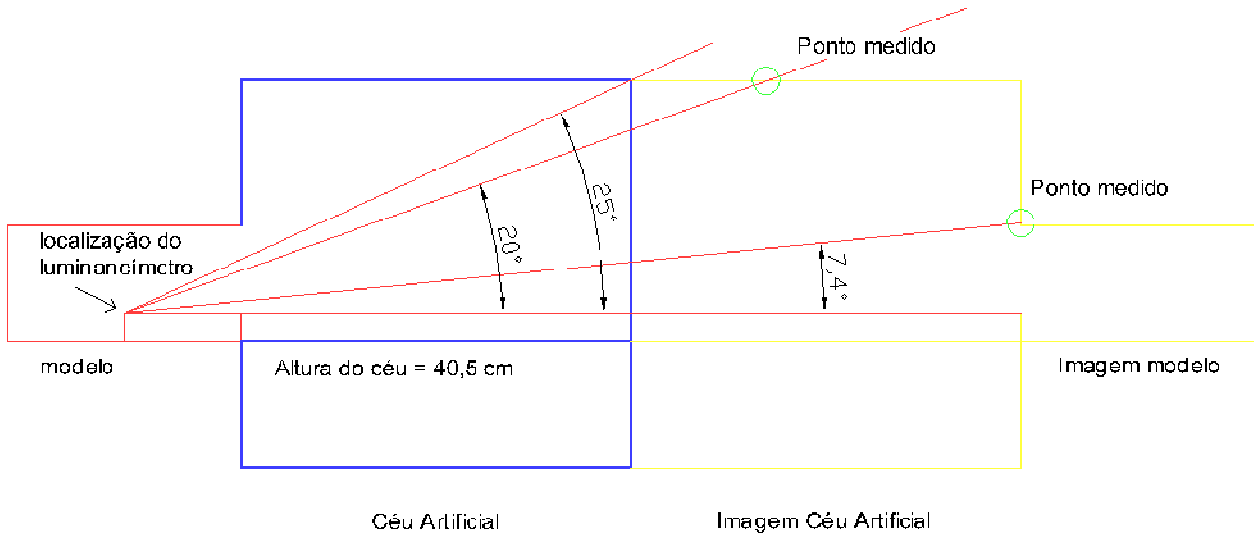


Figura 11 – Ilustração do esquema utilizado na calibração com a variação angular para a vertical.

Para cada ângulo vertical foram realizadas cinco medidas distintas variando o ângulo horizontal.

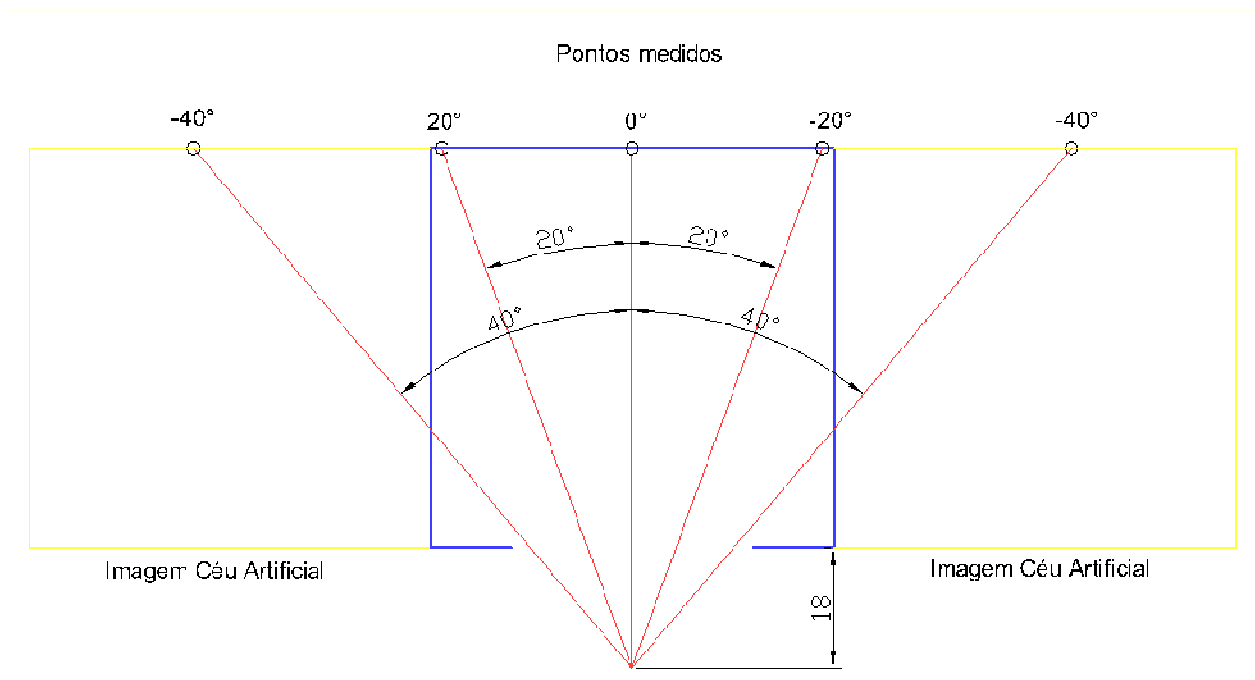


Figura 12 – Ilustração do esquema utilizado na calibração com a variação angular para a horizontal.

A média dos valores medidos nas diversas posições horizontais para cada altura e para cada um dos ângulo verticais foi confrontada com o céu teórico, cujos resultados foram calculados segundo a expressão matemática de distribuição das luminâncias do céu encoberto CIE, (EQ.1; TAB.4; FIG.13).

$$Loc(Y) = L_{zoc} \times \frac{1 + 2 \sin \alpha}{3} \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

Loc(Y) – luminância no ponto do céu com altura Y;

Lzoc – luminância no zênite.

Tabela 4 – Comparação entre as médias dos valores de luminância medidos e os valores teóricos calculados.

Ângulo em °	Luminância em cd/m ²				
	Valor teórico	H= 31 cm	H= 36 cm	H= 40,5 cm	H= 52 cm
7°	1905	2098	1507	1550	952
20°	2602	3046	3094	2382	3930
45°	3717,28	3280	3280	3280	3280
60°	4181,94	3600	3600	3600	3600
90°	5100	4646,6	4646,6	4646,6	4646,6

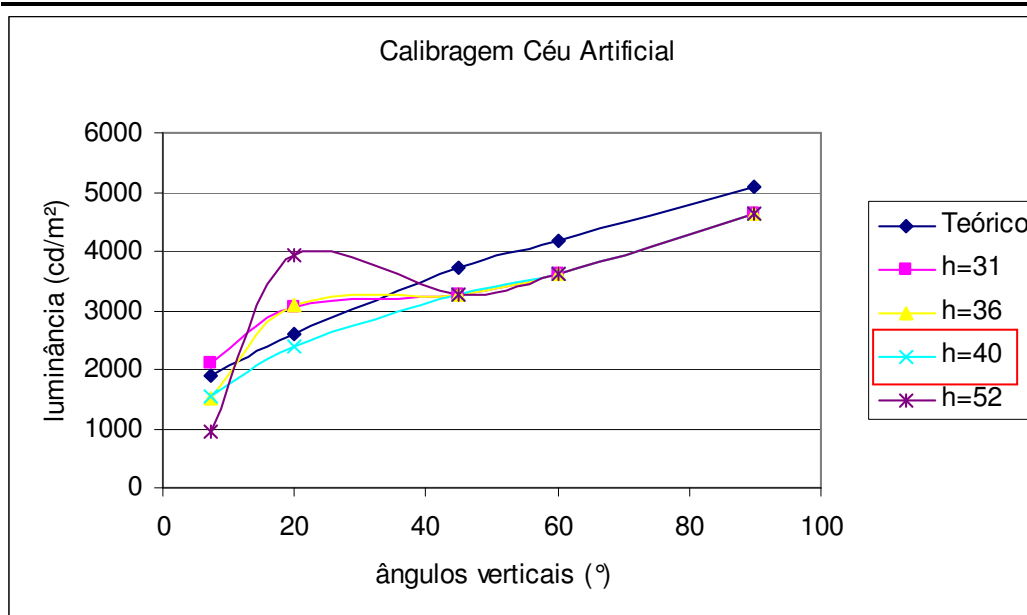


Figura 13 Gráfico da comparação entre as curvas das médias dos valores medidos com a curva teórica.

Nota: h = variação da altura interna do céu artificial.

Considerações Finais

Com base nos dados da FIG. 13 observou-se que a altura interna na qual a distribuição mais se aproxima da curva teórica seria de h= 40,5 cm. Portanto o céu artificial foi concluído com as seguintes dimensões: 60cm x 60cm x 40,5cm. A dimensão da abertura para posicionamento do modelo (36cm x 18cm) é um limitador de área/abertura máxima da maquete a ser ensaiada. Outro fator delimitante da escala da maquete é a dimensão do sensor a ser utilizado para aquisição de dados de ilumiâncias internas.

Destaca-se que para a calibragem do equipamento, simulador de condição de céu construído na FAUUSP, foi desenvolvido um mecanismo original para suspensão da base da caixa espelhada. Este mecanismo possibilita o ajuste da proporção de área espelhada interna levando a adequada distribuição de luminâncias. Ao construir um equipamento de pequenas dimensões para simulação de condição de céu – Céu Retilíneo, deve-se ter cuidado com o detalhamento das peças, encaixes, materiais e mão-de-obra para a execução. É fundamental evitar a flambagem das peças por meio de adequados travamentos. Para solucionar os “vales

escuras” entre as lâmpadas foi utilizado o espelho posicionado na parte superior destas, o que além de minimizar efeito de vales proporcionou o aumento das iluminâncias internas.

Referências

- ABNT 15215. Iluminação Natural – Parte 1: Conceitos básicos e definições. 2005.
- _____. Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação de iluminação natural em ambientes internos. 2005.
- _____. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações: Método de medição. 2005.
- ANDER, G.A. Daylighting. Performance and Design. New York, Van Nostrand Reinhold, 1995.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. CIE 110-1995 Spatial distribution of daylight; luminance distribution of various reference skies. Vienne, CIE. 1994. 30 p. (Technical Report).
- EGAN, M. J. Concepts in Architectural Lighting. New York, McGraw-Hill, 1983.
- HOPKINSON, R.G., PETHERBRIDGE, P. e LONGMORE, J. Iluminação Natural. Lisboa, Fundação Kalouste Gulbenkian, 1975.
- ILLUMINATION ENGINEERING SOCIETY – I.E.S. IES Lighting Handbook: Reference and Application. IES of North America, New York, 1995.
- LAM, William M. C. Sunlighting as Formgivers for Architecture. New York, McGraw-Hill, 1977.
- LI – COR, LI – COR Radiation Sensors – Instruction manual, LI – COR Inc. Publication n° 8609-56, Lincoln, USA, 1986.
- MARSH,A; RAINES,C. ECOTEC v5.20. Square One; Joondalup: Australia, 2004.
- MOORE, Fuller. Concepts and Practice of Architectural Daylighting. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- ROBBINS, Claude. Daylighting. Design and Analysis. New York, Van Nostrand, 1986.
- SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. Iluminação natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas; Desenvolvimento de ferramenta simplificada. Florianópolis: UFSC, 1997,159 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil, Construção Civil).
- SOUZA, Roberta Vieira Gonçalves de. Estudos sobre a iluminação natural externa e suas implicações no desempenho luminoso de ambientes internos. Florianópolis: UFSC, 2002. (Trabalho realizado para Exame de Qualificação, Doutorado em Engenharia Civil, Construção Civil).
- VIANNA, N. S, GONÇALVES, J. C. S. Iluminação e Arquitetura, Virtus s/c Ltda, São Paulo, SP, 2001.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) o apoio recebido para o desenvolvimento do projeto.