



## **PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL COM CÉU ARTIFICIAL E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

**Alexander González (1); Roberto Pereira (2);  
Fernando O. R. Pereira (3); Anderson Claro (4).**

- (1) Pós-Graduação: Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído – CTC – Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e mail: bioclimarq@yahoo.com  
(2) Pós-Graduação: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGECC – Construção Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e mail: ctircp@yahoo.com.br  
(3) Laboratório de Conforto Ambiental – Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e mail: feco@arq.ufsc.br  
(4) Laboratório de Conforto Ambiental – Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil – e mail: ander@arq.ufsc.br

### **RESUMO**

**Proposta:** Este artigo apresenta uma análise comparativa entre dois métodos para a avaliação da iluminação natural. O primeiro método utiliza-se de maquetes sob céu artificial e o segundo baseia-se em simulação computacional. **Método de pesquisa/Abordagens:** Para a aplicação dos métodos de avaliação, selecionou-se um prédio de ensino com fachadas duplas, que proporcionam controle da radiação solar e transmitem a luz natural no interior das salas mediante as reflexões internas geradas entre seus planos. Foram construídos dois modelos de uma seção do prédio para esta avaliação, um modelo físico em escala 1:25 e um modelo digital para avaliação no software denominado APOLUX. Com um sistema de aquisição de dados composto por nove (9) fotocélulas e dois (2) sistemas de aquisição de dados Li-Cor, foram feitas medições da iluminação sob um céu artificial tipo “caixa de espelhos”. As mesmas condições de avaliação foram aplicadas no procedimento de simulação do APOLUX. **Resultados:** Através deste processo analisou-se quantitativamente a iluminação no interior da maquete no céu artificial e no modelo computacional. Foi possível perceber diferenças entre os modelos na distribuição da iluminação no interior da sala devido ao difusor de acrílico do teto, reflexão da luz pelo piso, paredes laterais do céu e pela própria maquete. **Contribuições/Originalidade:** Aplicação da modelagem virtual para avaliação do comportamento da iluminação em maquetes.

Palavras-chave: Céu artificial, maquetes, modelagem virtual e simulação computacional.

### **ABSTRACT**

**Proposal:** This article presents a comparative analysis between two methods for the evaluation of the natural illumination. The first method employs models under artificial sky and the other one is based on computer simulation. **Methods:** For the application of the evaluation methods, a teaching building was selected as a model. Its double façades allow for controlling the solar radiation and transmit the natural light inside the rooms by the internal reflections generated between the two plans. Two models of a building section were built for this evaluation, a physical scale model (1:25) and a digital model for evaluation in the software denominated APOLUX. With an equipment of data acquisition composed by nine (9) photocells and two (2) Li-Cor Dataloggers, measurements of the illumination were made inside a mirror-box artificial sky. The same evaluation conditions were applied in APOLUX simulation procedure. **Findings:** Throughout the process the illumination inside the model in the artificial sky and in the computer model were quantitatively analyzed. It was possible to notice differences between the models in the illuminance distribution inside the room due to the acrylic

diffuser roof, the reflection of the luminous flux by the sky floor and lateral walls and by the model itself. **Originality/value:** Application of the virtual modeling for evaluation of the illumination behavior in scale models.

Keywords: Artificial sky, scale models, virtual modeling and simulation computational.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Estudos de iluminação natural com maquetes

Os estudos de iluminação com maquetes partem da definição espacial do projeto e da construção da maquete em escala. Esta consideração tem como objetivo reproduzir com o maior grau de precisão possível o espaço interior, tendo em conta a geometria e as características das aberturas, as cores e as texturas dos acabamentos. As maquetes, em geral, são fáceis de construir e permitem uma avaliação constante das condições luminosas de uma edificação, além de possibilitar avaliações quantitativas mediante o uso de fotocélulas; além disso, uma vez que o comprimento de onda da luz é muito pequeno em comparação às dimensões de uma edificação, seu comportamento não é significativamente afetado pela efeito de escala (GONZALEZ *et al.*, 2005).

As análises quantitativas com maquetes podem apresentar dificuldades no estudo sob condições de céu real, pela alta variabilidade das luminâncias que apresenta a abóbada celeste, especialmente com um céu parcialmente nublado. Condições de céu completamente claro e completamente nublado são recomendadas para fazer avaliações com maquetes, mas estas situações introduzem nos estudos uma alta dependência do fenômeno ambiental, tornando estas análises pouco efetivas em função do tempo. A possibilidade de ter um ambiente de exposição da luminância controlada, tal como um céu artificial, permite o desenvolvimento de análises quantitativas precisas e rápidas, além de proporcionar estudos comparativos do desempenho de avaliações com outros métodos, tais como os aplicativos computacionais e métodos gráficos. Entretanto, este ambiente tem que ser calibrado para que possa representar as características de distribuição de luminâncias semelhantes a um céu real (EVANS, 1997).

O Céu Artificial do Labcon é do tipo “caixa de espelhos” e consiste num volume cúbico, com iluminação artificial no plano superior e um forro de acrílico translúcido. Apresenta-se fechado em seus quatro lados com espelhos verticais que produzem uma diminuição contínua e regular da iluminação em função do ângulo de altura (Figura 1), visando reproduzir a distribuição do céu encoberto, conforme definida pelo Internacional Commission on Illumination (CIE, 1970).



**Figura 1. Céu Artificial, construído com o apoio do Procel Edifica/Eletróbrás.**

Este trabalho também visa identificar as estratégias para a calibração do céu artificial utilizando simulação computacional como uma das ferramentas de análise e comparação. Faz parte do estudo a utilização de maquetes colocadas no interior do céu para avaliações quantitativas e simulação em modelo digital através do aplicativo computacional denominado APOLUX.

## **1.2 O aplicativo computacional APOLUX**

O programa de simulação de iluminação denominado APOLUX é uma ferramenta criada no LabCon/ARQ, na Universidade Federal de Santa Catarina, pelo professor Anderson Claro e é utilizada para simular a iluminação natural nas edificações. Emprega um modelo matemático denominado Modelo Vetorial Esférico que determina a visibilidade do céu para diferentes pontos de uma superfície de uma edificação tanto interior como exterior. Assim, pode estabelecer relações de visibilidade entre os diferentes pontos das superfícies do projeto. Permite realizar um conjunto de operações de preparação para que um modelo tridimensional desenvolvido em CAD possa ser processado pelo módulo principal do programa, que calcula a iluminação natural tanto devido à incidência direta de luz solar quanto da contribuição proveniente da abóbada celeste, utilizando o algoritmo da “radiosidade”. Cabe salientar que a distribuição das luminâncias da abóbada celeste modelada pelo APOLUX é a mesma distribuição para um céu encoberto pela CIE (CLARO, 1998).

A utilização do programa visou integrar o procedimento de desenho por computador ao modelo físico representado pela maquete. Além disso, buscou-se definir uma metodologia de cálculo coerente com as necessidades de simulação da iluminação natural, gerar diferentes ferramentas analíticas como imagens, gráficos, planilhas e relatórios e gerar arquivos que permitam processamentos posteriores dos resultados obtidos. Outro aspecto, foi o de possibilitar a opção de diferentes condições de simulação, tais como, escolha dos parâmetros de análise da abóbada, determinação da resolução das imagens e precisão das soluções calculadas. Assim é possível ter um melhor controle do processo de simulação.

## **2. OBJETIVO**

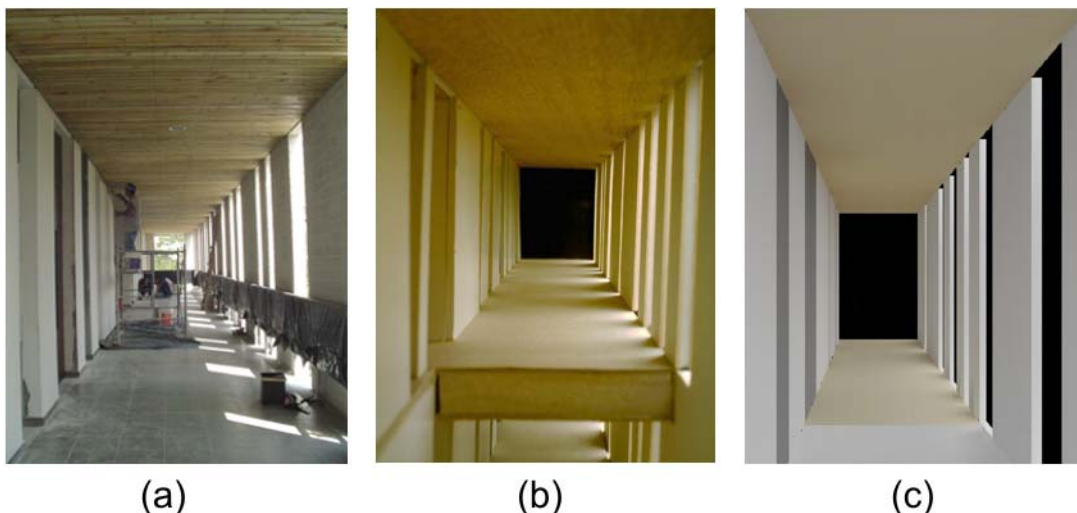
O trabalho tem como objetivo definir procedimentos para comparar dois métodos de avaliação do aproveitamento da iluminação natural, o primeiro utilizando maquetes sob céu artificial e o segundo utilizando simulação computacional. Pretende-se através de ambos os métodos encontrar no interior dos modelos distribuições equivalentes nos níveis de iluminâncias. Tal análise contribuirá para o entendimento do desempenho da iluminação no processo de utilização do céu artificial.

## **3. METODOLOGIA**

A metodologia do presente estudo consistiu na determinação dos níveis de iluminação natural no interior de uma edificação, através de dois métodos distintos: medição em modelo físico em escala reduzida exposto a um céu artificial e simulação computacional. Não se trata simplesmente de comparar um método com o outro, mas de buscar referenciais para avaliar os principais aspectos a serem considerados no processo, em especial no caso da avaliação da iluminação com modelos expostos a um céu artificial.

### **3.1 O Objeto de Estudo**

O edifício da Faculdade de Engenharias da Universidade Pontifícia Bolivariana de Medellín, Colômbia (Figura 2 (a)), tem 4 andares com 16 salas para aulas teóricas. A edificação, construída no ano de 2005, apresenta um sistema de controle da radiação solar com fachadas duplas e aberturas de piso a teto com uma modulação geométrica que não permite a entrada dos raios solares no interior das salas. O ingresso da luz natural ocorre através de múltiplas reflexões nas superfícies internas do espaço intermediário da fachada dupla. O prédio foi escolhido para este estudo pelas características de iluminação natural, pois os aportes de luz natural se misturam entre a componente de céu direto e a componente refletida em suas superfícies internas, além de ser um prédio real para futuras confirmações de seu desempenho em avaliações de pós-ocupação.



**Figura 2. (a) O Edifício. (b) A Maquete. (c) O Modelo no APOLUX**

### 3.2 Os modelos físico e virtual

Para este estudo foi executada uma maquete em escala 1:25 de uma das salas de aula e duas fachadas duplas e considerado uma seleção de materiais que representassem as propriedades óticas das paredes, tetos e pisos através de suas cores e da sua textura; além disso, foi considerado o tamanho das fotocélulas para gerar um plano de dados seguindo uma escala que representa o plano de trabalho, posicionado a 75 cm do chão para as tarefas visuais das salas.

Na construção da maquete foram considerados os aspectos das cores e superfícies de tijolos de concreto de cor areia nas fachadas, concreto cinza polido no chão, reboco e tintas brancas nas paredes interiores das salas, e madeira ao natural no teto. Algumas seções do modelo foram fechadas com superfícies escuras para não apresentar influência na iluminação das salas (Figura 2 (b)). O planejamento da maquete considerou a montagem de uma superfície para o suporte de 8 fotocélulas LI-Cor 210 SA, este elemento permitiu levar para fora da maquete os fios condutores que ligaram as fotocélulas ao Datalogger LI-Cor LI-1000 (Figura 3 (a)), para este estudo foi analisada uma das salas do quarto andar.

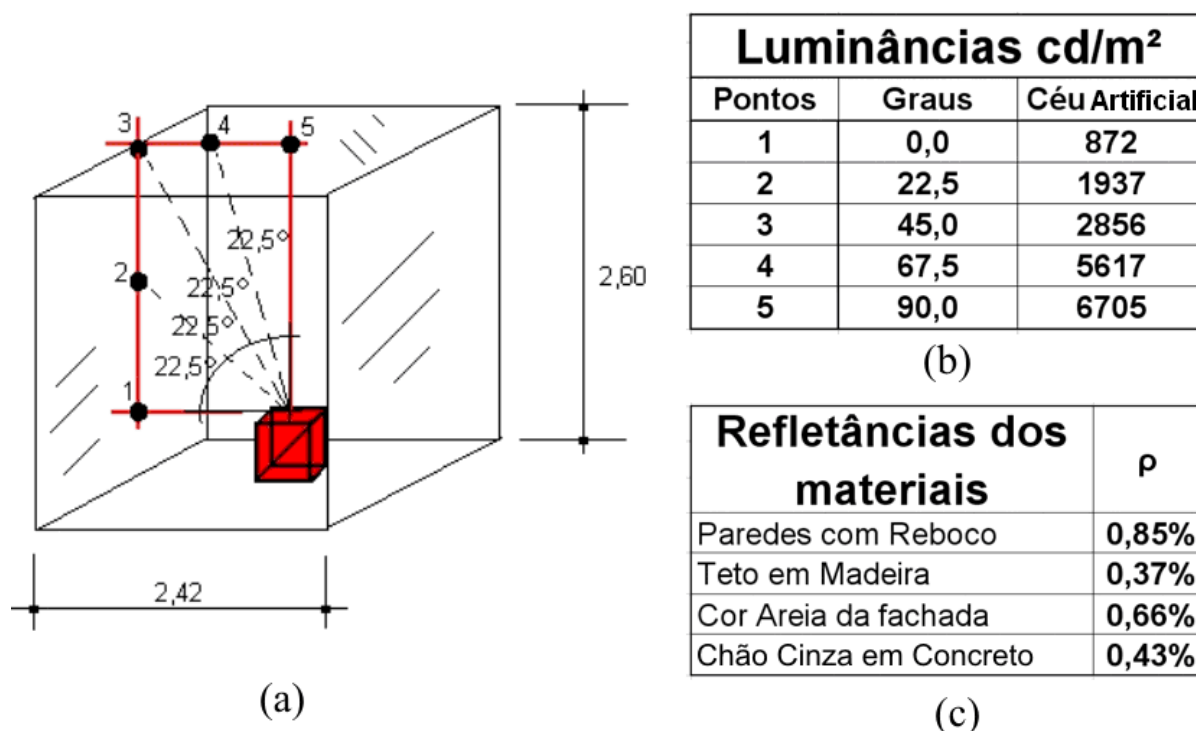


**Figura 3. (a) Fotocélulas Li-Cor dispostas na Maquete. (b) Fotocélulas simuladas no modelo do APOLUX.**

O modelo digital foi construído seguindo a estrutura física da maquete e exportado ao APOLUX a partir do desenho digital em CAD, simulando tridimensionalmente a sala para a avaliação de todos os planos de fachadas que apresentam relação com os efeitos da iluminação no seu interior (Figura 2 (c)). Este processo considerou cada uma das oito fotocélulas como parte do modelo digital, a fim de atender aos efeitos destas na maquete e determinar o plano de trabalho onde foram obtidos os dados (Figura 3 (b)).

### 3.3 Dados de entrada

Nesta etapa da pesquisa o levantamento de dados experimentais foi realizada no céu artificial, para alimentar as informações no APOLUX e obter na simulação computacional um ambiente virtual próximo ao da maquete. Esses dados foram: distribuição da luminância no céu artificial e o levantamento das refletâncias dos materiais da maquete. Para a medição dos níveis de luminâncias foi utilizado um luminômetro (Minolta LS-110), tomando os valores em cinco pontos no céu artificial a partir do horizonte da maquete (ponto 1) até o zênite (ponto 5), com uma altura angular de 22,5 graus (Ilustração 1 (a)). Os valores obtidos (Ilustração 1 (b)) foram comparados com a distribuição das luminâncias do céu encoberto modelado no APOLUX, a fim de observar a intensidade e a distribuição da iluminação na maquete.

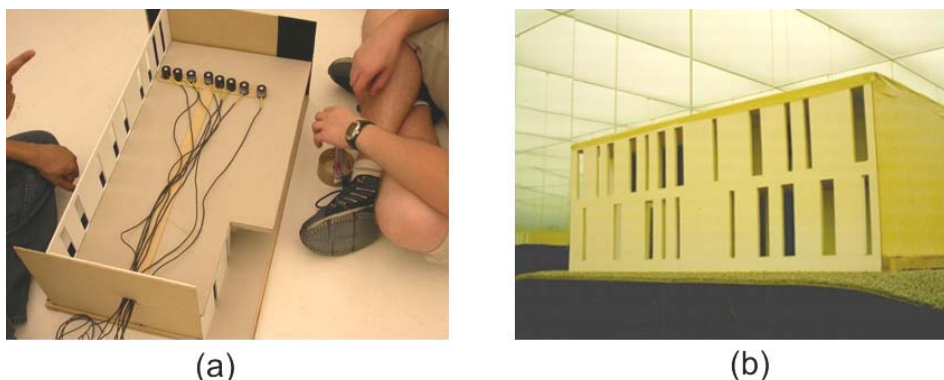


**Ilustração 1: (a) Pontos de referência para a tomada das luminâncias; (b) Valores das luminâncias no Céu Artificial; (c) Dados das refletâncias dos materiais da maquete.**

Os valores das refletâncias dos materiais da maquete foram tomados no interior do céu artificial, por ser este um ambiente de iluminação estável e controlado. Estes valores foram caracterizados para alimentar a base de dados de referência na construção e avaliação do modelo digital no APOLUX. Para obter os valores das refletâncias do chão, paredes, tetos e fachadas da maquete foi aplicado o método prático do luminômetro (MOORE, 1984), os valores estão apresentados na Ilustração 1 (c).

### 3.4 Levantamento de dados na Maquete

No levantamento de dados com a maquete foram feitas avaliações prévias para determinar o comportamento da distribuição das luminâncias que oferece o céu artificial, tais como: a presença de pessoal dentro do céu durante o processo de medição, o tratamento do piso e das paredes verticais para não ter reflexão abaixo da linha do horizonte do modelo, e finalmente a altura da bancada para o posicionamento da maquete. Todas estas situações de análises fazem parte do roteiro de calibração e uso do céu artificial, bem como para o trabalho de preparação de maquetes nas avaliações quantitativas, pois foi revelada uma alta variabilidade dos dados diante dos aspectos previamente relatados.



**Figura 4. (a) Disposição das fotocélulas. (b) Maquete no Céu Artificial.**

Para os dados deste artigo a maquete foi posicionada no centro do céu artificial com uma bancada de 75 cm de altura, o chão foi forrado com tapetes de cor cinza e as partes inferiores das paredes de espelho foram encobertas com plástico preto na linha de horizonte da maquete. Para a tomada de dados de iluminâncias foram utilizadas oito fotocélulas Li-Cor dispostas em linha, de forma que as distâncias entre elas e as paredes da maquete permitiram uma distribuição uniforme na largura da sala, esta disposição das fotocélulas (Figura 4 (a)), pode ser registrada simultaneamente pelo datalogger da Li-Cor. Para uma avaliação de todo o plano de análise, foram calculadas oito posições para a linha de fotocélulas ao longo do comprimento da sala. Com este procedimento foram levantados dados para um total de 64 pontos uniformemente distribuídos na sala. Cada uma das linhas de dados foi tomada no céu artificial (Figura 4 (b)) sem a presença de pessoas no interior.

### 3.5 Avaliação do modelo com o APOLUX

Como na maquete, a análise digital foi feita com 64 pontos na área total da sala, para isto foi necessária a construção de oito modelos no APOLUX, cada um com uma posição diferente da linha com as oito fotocélulas no comprimento da sala. Desta forma as duas avaliações conservaram na prática os mesmos aspectos do levantamento e simulação dos dados (Figura 5). As informações referentes às cores e refletâncias dos materiais da maquete foram incluídas na base de dados do APOLUX seguindo os valores obtidos experimentalmente e apresentados na Ilustração 1 (c).

O procedimento de avaliação com o software apresentou três etapas principais, a determinação do número de fracionamentos das superfícies do projeto no módulo Fractal, depois no módulo Luzsolar a determinação dos parâmetros da análise do globo para o cálculo dos fatores de forma, e finalmente o cálculo da radiosidade com a definição de um céu encoberto que propiciasse uma iluminância global horizontal igual à medida no céu artificial de aproximadamente 11,2 kLux.





**Figura 5. (a) Vista lateral da sala com o Apolux. (b) Vista frontal da sala com o Apolux**

Embora os cálculos dos oito modelos apresentem os resultados da totalidade do espaço, com 390 planos em cada modelo digital, o ponto central desta pesquisa foi determinar os valores da iluminação registrados no plano superior de cada uma das fotocélulas.

#### 4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

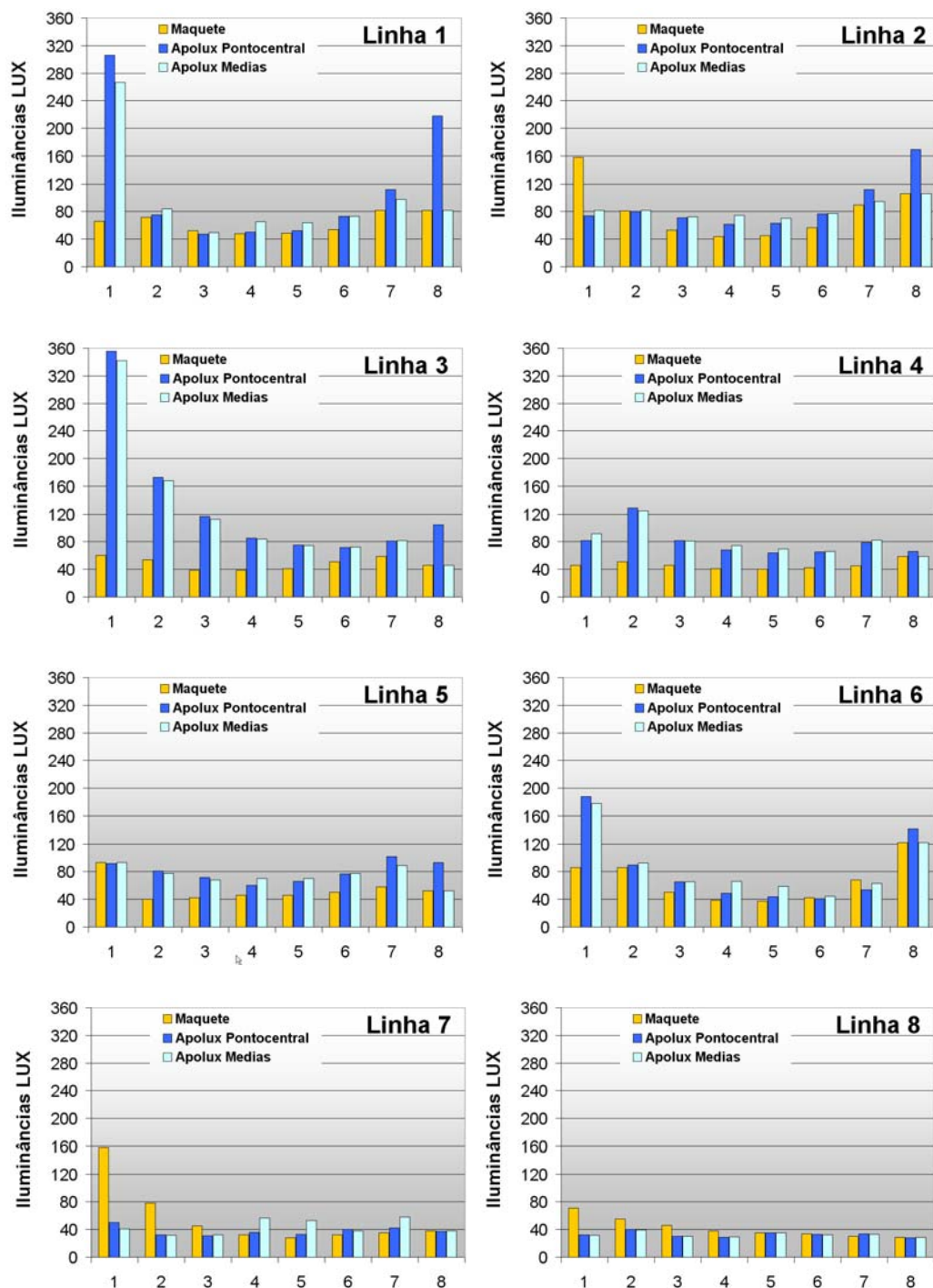
Para as duas metodologias, os valores de iluminação em lux, foram obtidos e dispostos em uma malha de 8 x 8 pontos, atribuindo para cada dado de iluminância medida pelas oito fotocélulas a sua respectiva linha, como pode ser ilustrada pelas Tabelas 1 e 2.

**Tabelas 1 e 2. Valores das iluminâncias obtidas para cada um dos 64 pontos da malha.**

<b>Tabela 1. Dados da Maquete no Céu Artificial de Caixa de Espelhos</b>								
<b>Linhas</b>	<b>Fotocélulas ( lux )</b>							
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	66	72	52	48	49	54	82	82
<b>2</b>	158	81	53	44	45	57	90	106
<b>3</b>	60	54	39	39	41	51	59	46
<b>4</b>	46	51	46	41	40	42	45	59
<b>5</b>	93	40	42	46	46	50	58	52
<b>6</b>	86	86	50	39	37	42	68	122
<b>7</b>	158	78	45	32	28	32	35	38
<b>8</b>	71	55	46	38	35	34	30	29

<b>Tabela 2. Dados das Fotocélulas Simuladas no APOLUX</b>								
<b>Linhas</b>	<b>Pontos Centrais ( lux )</b>							
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	306	75	47	50	52	73	112	218
<b>2</b>	74	80	71	62	63	77	112	169
<b>3</b>	356	173	117	85	75	72	81	105
<b>4</b>	82	129	82	68	64	65	79	66
<b>5</b>	92	81	72	60	66	77	102	93
<b>6</b>	188	90	65	49	44	41	54	142
<b>7</b>	50	32	31	36	33	40	42	37
<b>8</b>	32	40	30	29	35	33	34	28

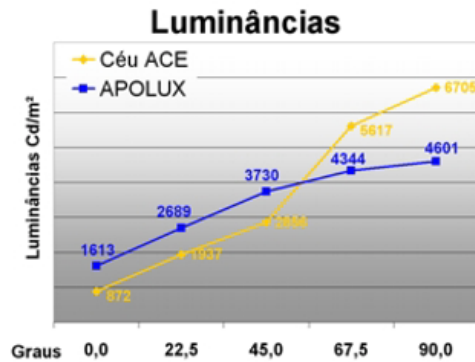
Em relação às fotocélulas localizadas no centro da sala pode ser observado um maior valor de iluminância medida pelas fotocélulas 1 e 2, 7 e 8 localizadas nas laterais da sala (Tabela 1). Para o modelo simulado pelo APOLUX foram tratados somente os valores da iluminação registrados pelas superfícies das fotocélulas e analisados os resultados médios simulados nestas superfícies, bem como o ponto central (Tabela 2). Este procedimento foi adotado por considerar significativa a área real da fotocélula em relação ao modelo.



**Ilustração 2. Comparação dos dados finais nas oito linhas da maquete e no modelo do APOLUX.**

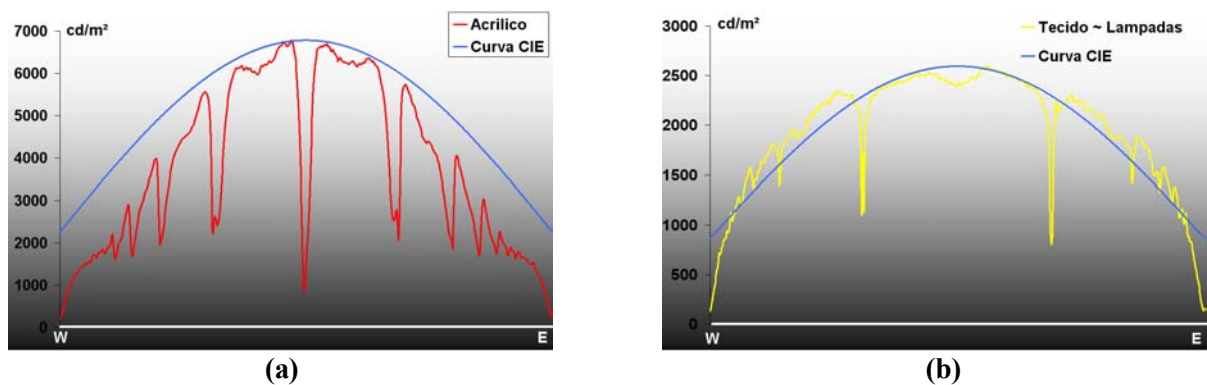
Pode ser observado que a iluminação obtida no modelo digital, comparada com os valores obtidos na maquete sob céu artificial, apresentou um comportamento semelhante para os lados e para o centro do espaço, correspondendo ao comportamento esperado do sistema de iluminação proposto no edifício. Os dados obtidos no modelo digital são mais altos que os dados da maquete, na maior parte dos pontos da malha de avaliação, especialmente naqueles em que a componente de iluminação interior está diretamente ligada visibilidade da fonte luminosa. Este comportamento em ambos os modelos está relacionado com a distribuição das luminâncias que apresenta o céu artificial, pois apresenta diferenças significativas com a distribuição fornecida pelo APOLUX (Figura 6.)





**Figura 6. Distribuição das luminâncias no Céu Artificial e APOLUX.**

Embora os dados obtidos não permitam fazer comparações mais precisas dos resultados de ambos os modelos, os procedimentos metodológicos aplicados nesta pesquisa geraram considerações importantes para o processo de calibração do céu artificial, especialmente na análise da distribuição das luminâncias. Foram desenvolvidas modificações no céu artificial visando aproximar a distribuição da iluminação ao modelo matemático definido pela CIE, parâmetro considerado como principal aspecto a ser analisado como proposta de calibração deste ambiente, as principais foram: colocação de uma forração de cor preta no piso e pintura preta nas laterais para reduzir os efeitos de reflexão da iluminação, troca do difusor de acrílico por um difusor melhor de tecido e colocação de duas lâmpadas no centro do ambiente (Figura 7). Todas as modificações propostas aproximaram a distribuição dos níveis de luminâncias do céu ao do modelo descrito pelo CIE, como pode ser observado pelos gráficos que seguem.



**Figura 7. Distribuição das luminâncias do Céu Artificial (a) original e (b) com as modificações.**

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados permitiram concluir que:

- A análise comparativa entre as duas metodologias permitiu verificar uma metodologia de trabalho identificando os erros nos processos desenvolvidos para a avaliação de iluminação no céu artificial, tais como:
  - Desalinhamento e desnivelamento das fotocélulas na maquete;
  - Imprecisão no deslocamento para o posicionamento de cada linha de fotocélulas;
  - Imprecisão na tomada dos dados das luminâncias no posicionamento do luminômetro;

- Presença de pessoal no interior.
- Para obter os valores das refletâncias do chão, paredes, tetos e fachadas dos materiais da maquete foi aplicado o método prático do luminâncímetro, para os próximos trabalhos será importante fazer medidas da refletividade dos materiais em laboratório especializado;
- As diferenças entre a distribuição de luminâncias no interior do céu artificial e a adotada pelo modelo digital foram provocadas pelo comportamento inadequado do difusor de acrílico do teto, pela reflexão da fonte luminosa através do piso, paredes laterais do céu e pela própria maquete. Estes aspectos foram corrigidos visando à calibração do Céu Artificial, para garantir a geração de uma distribuição de luminâncias próxima ao modelo matemático apresentado pela CIE para céus encobertos (Figura 7).

Todos os procedimentos avaliados neste trabalho de pesquisa metodológica serão aplicados nas futuras análises de iluminação no Céu Artificial e no APOLUX, para obter comparações quantitativas entre ambos os métodos.

## 6. REFERÊNCIAS

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A., STTEMERS, K., **Daylighting in Architecture – a European reference book**, Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science Research and Development, James & James Ltd., 1993.

CIE STANDARD, Spatial **distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky**. Commission Internationale de L'Eclairage. Publication CIE S 003.3/E-1996, Vienna, Austria, 1996.

CLARO, Anderson, “Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade aplicado à Iluminação Natural”. Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis, 1998

EVANS, J.M., BAROLDI, G.M., MARMORA, M.I., **Diseño y Construcción de un Cielo Artificial Tipo Espejo**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 1.N.1. Rio Cuarto, Cordoba, Argentina. Volumen 1, pp 121-124.

GONZÁLEZ, A.; GARCIA, A.; SALAZAR, J., **Estudios de Iluminación en Modelos a Escala**. Em: COTEDI 2005. IV Congreso Latinoamericano de Confort y Eficiencia Energética en la Arquitectura. 23 al 27 de Mayo de 2005. Ciudad de México, México. IN07 pág 307.

LI-COR, **LI-COR Radiation Sensors - Instruction Manual**, LI-COR inc. Publication No. 8609-56, Lincoln, USA, 1991.

MOORE, F., **Concepts and practice of architectural daylighting**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1984.

PEREIRA, F. O; CLARO, ANDERSON. **APOLUX – An Innovative Computer Code for Daylight in Architecture and urbanism. Proceedings of Building Simulation**. 9<sup>th</sup> International IBPSA Conference. Pag. 199 – 206. Editor Ibsen, Montreal 2005.