



**XIENCAC**  
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

**VIIELACAC**  
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

## **QUÃO CONFIÁVEIS PODEM SER OS MODELOS FÍSICOS EM ESCALA REDUZIDA PARA AVALIAR A ILUMINAÇÃO NATURAL EM EDIFÍCIOS?**

**Fernando O. Ruttkay Pereira (1); Roberto C. Pereira (2); Alexander González Castaño (3)**

(1) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, LabCon/ARQ/UFSC feco@arq.ufsc.br

(2) Dr, Professor do Instituto Federal do Rio Grande do Sul – IFRS, Rio Grande/RS

(3) Arquiteto, MSc em Arquitetura e Urbanismo, PósARQ, UFSC.

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Cx Postal 476,  
Florianópolis–SC, Brasil, 88040-900, Tel.: (48) 3721 4974

### **RESUMO**

A iluminação natural apresenta-se como uma das estratégias individuais de maior potencial para redução do consumo de energia nos edifícios. Para a realização deste potencial é essencial caracterizar precisa e quantitativamente o ambiente luminoso. Por outro lado, sabe-se que a aceitação do ambiente luminoso se dá essencialmente pela apreciação visual do usuário. Neste contexto, há várias décadas, o método experimental com modelos físicos em escala reduzida tem sido empregado para avaliação da iluminação natural. Entretanto, apesar das qualidades, o método tem sido alvo de críticas que apontam os erros encontrados como sendo deficiências intrínsecas do mesmo. Este estudo visa avaliar duas das fontes de erro mais citadas: medição sob condições de céu real e o efeito de escala. O estudo foi desenvolvido em duas etapas: 1) comparação de iluminâncias medidas simultaneamente num ambiente real e num modelo físico em escala reduzida, expostos ao céu real; e 2) comparação de iluminâncias medidas em modelos físico construídos em 3 diferentes escalas, submetidos a um céu artificial tipo “caixa de espelhos”. Na primeira etapa, os erros foram inferiores a 5%, exceto naquelas situações onde a componente refletida foi relevante. Na segunda etapa, os resultados foram ainda melhores, mostrando uma insignificância do efeito de escala, com divergências inferiores a 4%. Através deste estudo, é possível afirmar que o método é confiável, desde que cuidados sejam tomados na confecção dos modelos e nas medições, em especial no que tange às propriedades ópticas das superfícies, condições de exposição dos modelos (entorno), precisão dimensional e procedimentos fotométricos.

Palavras-chave: iluminação natural, método experimental, modelos físico.

### **ABSTRACT**

Daylight is presented as an individual strategy with one the greatest potential for reducing energy consumption in the buildings. To realize this potential is essential to precisely and quantitatively characterize the luminous environment. Moreover, it is known that the acceptance of luminous environment occurs mainly by user visual assessment. In this context, the experimental method with reduced-scale physical models has been employed for daylight evaluation. However, despite its qualities, the method has been the target of criticism which have pointed errors as its intrinsic shortcomings. This study aims to evaluate two of the most cited as sources of error: measurement under real sky conditions and the effect of scale. The study was developed in two stages: 1) comparison of illuminances measured simultaneously in a real environment and a physical model in reduced scale, exposed to the real sky, and 2) comparison of illuminances measured in physical models built on three different scales subjected to an artificial sky type "mirror box". In the first stage, the results showed errors less than 5%, except in those situations where the reflected component was relevant. In the second step, the results were even better, showing an insignificance of scale effect, with differences less than 4%. Through the results, it is clear that the method is reliable provided that care is taken in producing the models and the measurements, especially in regard to the surfaces optical properties, the conditions of exposure models (surroundings), dimensional accuracy and photometric procedures.

Keywords: daylighting, experimental method, physical models.

## 1. INTRODUÇÃO

Modelos arquitetônicos são ferramentas utilizadas para avaliar a iluminação natural no processo de projeto desde que os seres humanos decidiram não viver mais em cavernas, mas construir sua própria habitação. Modelos (físicos) são ferramentas de projeto que os arquitetos têm empregado há muito tempo para explorar e estudar diferentes aspectos do projeto e construção de edificações.

A literatura científica na área é categórica ao afirmar que, ao contrário de outros modelos físicos nos quais o comportamento do fenômeno físico (transmitância térmica, tensões estruturais, fluxo de ar, etc.) sofre distorções pelo efeito da escala, o modelo para iluminação natural não requer compensações em função da escala. Um modelo arquitetônico que duplica perfeitamente um espaço real, exposto às mesmas condições de céu apresenta um padrão de distribuição da iluminação interna idêntico. Isto é devido ao comprimento de onda da luz visível ser extremamente reduzido em comparação ao tamanho dos modelos em escala; assim, a luz reflete nas superfícies internas do modelo da mesma forma que no espaço real (BAKER & STEEMERS, 2002). Vários pesquisadores têm reportado uma correlação bastante alta entre resultados obtidos em ambientes reais e os obtidos em modelos em escala reduzida (KIM et al, 1985).

As principais vantagens do estudo através de modelos físicos em escala são:

- ✓ dados quantitativos precisos, mesmo com modelos simplificados;
- ✓ adequado para lidar com geometrias complexas;
- ✓ facilidade nas comparações pela possibilidade de troca de componentes;
- ✓ permite avaliações qualitativas através de observação direta ou por fotografias;
- ✓ familiar para a maioria dos arquitetos;
- ✓ serve como ferramenta de comunicação com outros membros da equipe e clientes.

Talvez a razão mais importante de se construir modelos arquitetônicos de iluminação natural seja porque eles podem responder questões sobre diferentes aspectos do projeto do ambiente construído além da iluminação natural. Dados quantitativos são usados para avaliar a eficácia da iluminação natural em atender exigências visuais; projeções sobre necessidades de iluminação artificial e condicionamento térmico podem também ser feitas através destes dados. Dados qualitativos podem ajudar na definição do conforto visual e na percepção clara das características espaciais do ambiente interno.

Uma vantagem dos modelos físicos sobre modelagem computacional torna-se aparente quando se considera situações reais de projeto: muitos ambientes não são formados por simples planos retangulares, especialmente aqueles projetados para fazer o melhor uso da luz natural. Programas de computador que conseguem modelar geometrias complexas (Genelux, Radiance, Dialux, AGI32, etc.) não são muito "amigáveis". Não apenas geometrias complexas podem ser analisadas, mas modificações simples de geometria podem ser efetuadas num modelo e os resultados podem ser avaliados de forma expedita tanto pelos seus efeitos visuais como pelos níveis de iluminação resultantes.

Resultados bastante úteis podem ser alcançados com pouco investimento se a escala e os detalhes do modelo estiverem adequados às questões a serem respondidas - em outras palavras, não construa um modelo perfeito e elegante para responder a uma pergunta simples. A consideração orçamentária mais importante é a integração das questões e estudos de iluminação natural durante os diversos estágios do processo de projeto arquitetônico. Questões respondidas adequadamente e cedo neste processo (p.ex., balanço entre iluminação natural, sombreamento e insolação) podem evitar a necessidade e/ou elevação de gastos posteriores (p.ex., equipamento de ar-condicionado mais potente, maior consumo de energia elétrica para iluminação artificial, etc.). Recomendações sobre escalas adequadas e cuidados a serem tomados para a construção e teste dos modelos podem ser encontrados em bibliografia específica (BAKER & STEEMERS, 2002)

Entretanto, deve-se considerar que para o desenvolvimento de avaliações quantitativas precisas, é necessário contar com instrumentação fotométrica adequada, aspecto que pode limitar este exercício só a laboratórios especializados e grandes escritórios profissionais, pelo custo dos equipamentos. Este método também requer tempo elevado para o desenvolvimento das avaliações (MOORE, 1991; SCHILER, 1987; KIM et al, 1985).

Os testes de iluminação com maquetes em escala podem ser desenvolvidos sob céu real ou sob céu artificial. Para avaliações qualitativas, os testes sob céu real são recomendados pela distribuição das suas luminâncias, reprodução das cores e a qualidade que apresenta a luz dia, proveniente da abóbada celeste. Os testes qualitativos de iluminação sob céus reais permitem fazer avaliações conjuntas da incidência solar nos projetos, usando-se um simples relógio solar construído para a latitude do local do projeto. Assim, é possível verificar de forma expedita o funcionamento conjunto e a efetividade dos sistemas de iluminação e controle da radiação solar direta.

Para avaliações quantitativas de iluminação, as condições de variabilidade do céu real podem afetar consideravelmente o levantamento de dados de iluminação no interior das maquetes. A variabilidade das luminâncias medidas da abóbada celeste pode ser de até 15%, mesmo em dias aparentemente idênticos (MOORE, 1991). Esta condição introduz nos estudos de iluminação a dependência do fenômeno climático, sendo pouco efetivas essas análises em função do tempo necessário para o seu desenvolvimento.

Um dos principais obstáculos encontrados na simulação com modelos físicos, durante décadas, tem sido o ceticismo de alguns profissionais, que fizeram desta opção um território órfão. Enquanto os cálculos analíticos são exatos, os ensaios utilizando modelos apresentam constantemente resultados de medições não muito precisas, sendo afetados pela dispersão dos dados, o que na verdade caracteriza a maioria dos procedimentos experimentais.

Experimentos feitos por Mardaljevic (2002) mostraram erros de avaliações com maquetes sob céu real encoberto superiores a 50%. Para céus claros foram estimados erros de 100% a 250% entre a maquete e o edifício real monitorado. Sob céus reais ocorre uma maior dependência dos fenômenos ambientais, com variabilidade maior nos níveis de iluminação. Na Tabela 1 são apresentados os principais fatores do erro para avaliação quantitativa de iluminação com maquetes em escala.

Tabela 1: Fatores de erro entre método experimental com modelos em escala e a situação real

Fatores Físicos	Divergência Relativa entre Escala Reduzida x Real	Referência Bibliográfica
Detalhes do modelo Opacidade das paredes Efeito da escala Refletâncias das superfícies Vazamentos de luz		Schiler (1987)
Calibração dos sensores Refletâncias das superfícies Reprodução do modelo e entorno Detalhes das aberturas Tamanho dos sensores Faixa de medição dos sensores Posicionamento dos sensores	30% a 50%	Love & Navvab (1991)
Precisão dimensional Efeito da escala Reprodução do entorno Refletâncias das superfícies Transmitância dos envidraçados Manutenção e limpeza	10% a 25%	Cannon-Brookes (1997)
Exposição a céus reais Tamanho dos sensores Posicionamento dos sensores Calibração dos sensores Sensibilidade a deslocamentos Precisão e tempo de resposta da instrumentação	até 50% sob céus encobertos	Mardaljevic (2002)
	100% a 250% sob céus claros	

Como uma resposta as dificuldades de estudo sob céus reais, céus artificiais têm sido empregados há décadas. A principal vantagem é ter a garantia de condições confiáveis e reproduzíveis para simular o ambiente luminoso externo. (EVANS et all, 1997). Por serem ambientes com iluminação padronizada e controlada, os céus artificiais garantem o desenvolvimento de avaliações quantitativas de iluminação natural e a possibilidade de se comparar estudos desenvolvidos em diferentes simuladores. Estes equipamentos têm sido desenvolvidos em utilizados em centros de pesquisa e escolas de arquitetura para aplicações acadêmicas e profissionais. Existem diversos modelos de céus artificiais, e quanto a sua forma podem ser classificados em dois tipos: Hemisféricos e Retangulares. Os primeiros podem simular distribuição de luminâncias complexas, tais como as do céu claro (inclusive a luz direta do sol) e os segundos, o mais conhecido é do tipo “caixa de espelhos”, simulam a distribuição do céu encoberto. Diversos céus artificiais têm sido propostos nos últimos anos, sendo que a maioria busca expandir as possibilidades de simulação de diferentes

distribuições de luminâncias (BAKER & STEEMERS, 2002; NAVAAB, 1981; MOORE, 1991; COOKSY et al, 1989; BODART, 2004).

Atualmente muitos pesquisadores, segundo Thanachareonkit et al (2005), consideram que os erros da imprecisão na construção de maquetes possam ser elevados, mas estes são mais frequentes quando as maquetes são expostas a condições de céus reais. Sob céus artificiais os erros são menores, fazendo com que este método seja competitivo em sua qualidade, frente a outros métodos de avaliação quantitativa de iluminação natural. Mesmo assim, ainda existe muito ceticismo e desconfiança pelos resultados obtidos em avaliações com modelos físicos em escala reduzida expostos a céus reais e artificiais, em especial devido à falta de atenção para com muitos dos principais fatores físicos de erros apresentados na Tabela 1. Um dos fatores que costuma estar no topo da lista das causas de erro é o efeito de escala, seria mesmo nulo? quais as distorções mínimas? Enfim, para tentar reduzir parte destes questionamentos foi desenvolvido o presente estudo.

## 2. OBJETIVO

Avaliar a capacidade de modelos físicos em escala reduzida de simularem a iluminação natural em ambientes reais e a influência da escala do modelo físico nos valores da iluminâncias internas medidas num céu artificial tipo “caixa de espelhos”.

## 3. MÉTODO

O método proposto baseia-se em duas etapas: 1) comparação de iluminâncias medidas de forma simultânea em ambiente real e em modelo físico em escala reduzida, ambos expostos ao céu real; e 2) comparação de iluminâncias medidas em modelos físico construídos em 3 diferentes escalas, submetidos a iluminação de um céu artificial tipo “caixa de espelhos”. Cabe salientar que o presente estudo fez parte de uma avaliação mais abrangente, onde o principal objetivo foi o de desenvolver procedimentos para avaliação/validação de ferramentas de simulação computacional da iluminação natural baseados em mapeamento digital da distribuição de luminâncias da abóbada celeste, conforme descrito na Figura 1 (PEREIRA, 2009)

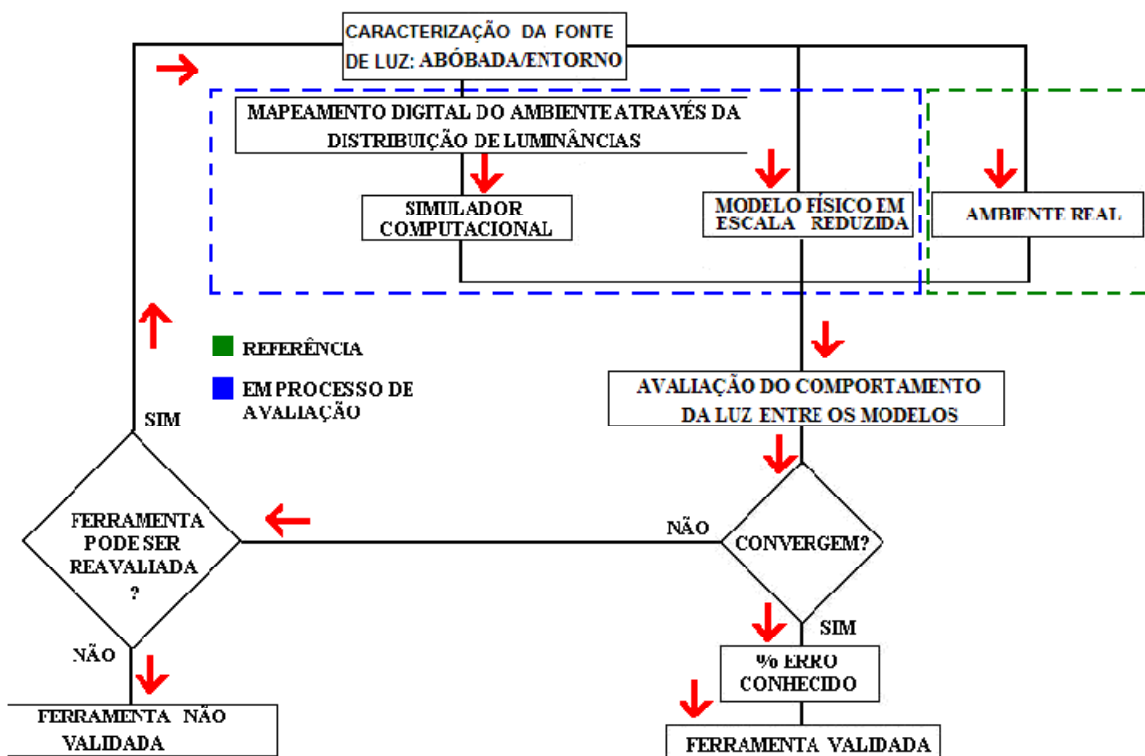


Figura 1 - Procedimentos esquemáticos para avaliação do desempenho de ferramentas computacionais e experimentais com modelos físicos em escala reduzida (PEREIRA, 2009)

### 3.1. Os objetos de estudo: ambiente real x ambiente em escala reduzida

O levantamento foi realizado no prédio da sede do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, situado no campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na cidade de Florianópolis. A Figura 2 mostra o

prédio e o arranjo de suas janelas orientadas para o sul. Na janela superior, à direita, localiza-se o ambiente real. Na esquerda, outro ambiente, com sua abertura destinada a posicionar o modelo físico em escala.



Figura 2 - Localização do ambiente real e o arranjo de suas janelas orientadas para o Sul

O ambiente real (ver Figura 3), tem um comprimento de 4m, largura de 2,10m, um pé direito de três metros e apresenta paredes de cor branca, piso de cor palha e teto de cor alecrim, com refletâncias conhecidas respectivamente por 75%, 64% e 34%. A sala foi pintada com tintas da fabricante Suvinil. O ambiente possui uma única janela (75x75cm<sup>2</sup>), disposta a 1,05m do piso, centralizada na parede frontal em relação à entrada. Localizados em uma linha central, no piso da sala, foram montados os sensores Li-Cor 210SA. A calibração das fotocélulas foi realizada com um sistema portátil de calibração de sensores, denominado LI-1800-02 da Li-Cor (PEREIRA, 2009).

O primeiro sensor está disposto a um metro da janela, outro no centro da sala e o terceiro a três metros da janela. Além desses, colocaram-se dois sensores no plano vertical, com a finalidade de medir a iluminância na parede direita e esquerda da sala a uma altura de 0,75m do piso. Parte dessas disposições segue de uma orientação da IEA (2006), que, através da Tarefa 21, sugere o posicionamento dos sensores em sistemas que utilizam luz natural. Esta distribuição foi repetida no modelo físico em escala reduzida.

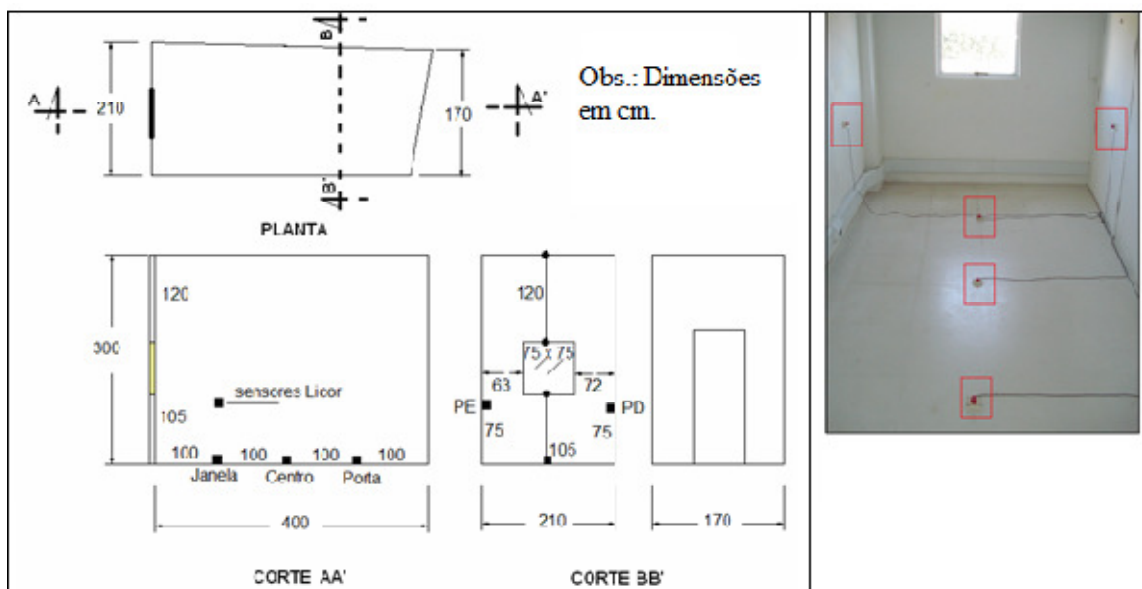


Figura 3 - Planta, cortes e foto do ambiente real, com a disposição dos sensores fotométricos.

O modelo físico foi construído em escala 1:5, de compensado, com 2 cm de espessura. Apresenta possibilidade de abertura no piso, no teto, e para os registros de fotografia, foi feita uma abertura circular no fundo do modelo (ver Figura 4).

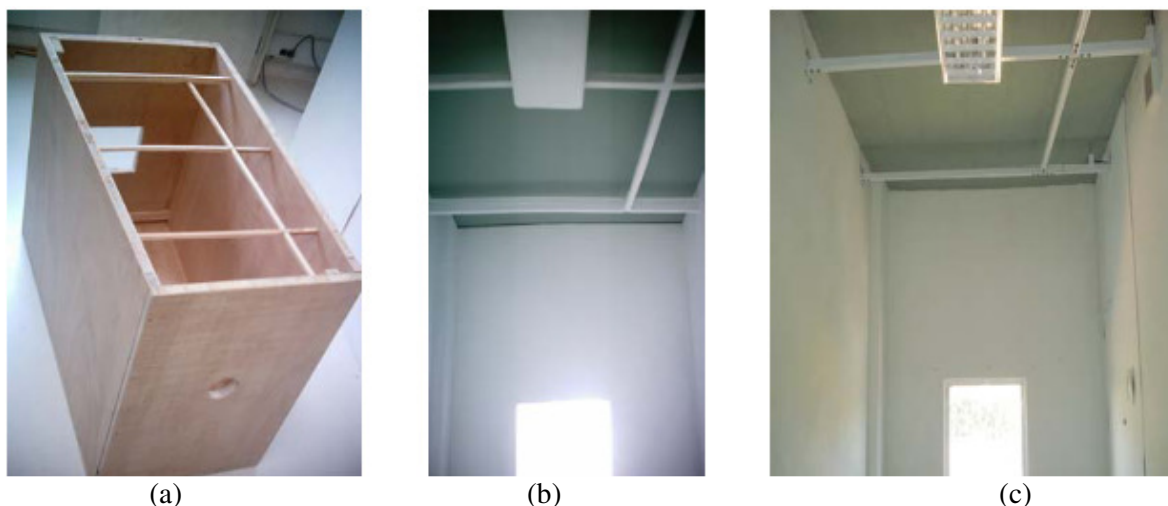


Figura 4 - a) modelo em construção; b) vista interna do modelo (teto); c) foto interna do ambiente real.

Essas características proporcionam total flexibilidade para a colocação dos sensores Li-Cor 210SA, facilitando as medições de iluminâncias no seu interior. A espessura do compensado permite que os sensores fiquem embutidos e no mesmo plano do piso e da parede da maquete. Tal qual na sala real, foram dispostos cinco sensores, três com espaçamentos simétricos de 20 cm ao longo do comprimento do modelo, e dois verticais (parede direita e esquerda) com uma altura de 15 cm (ver Figura 5.(a)).

A Figura 5.(b) apresenta a maquete no céu artificial de tipo caixa de espelhos, e a Figura 5.(c) quando submetida ao céu real e entorno natural. Nesta segunda situação, o modelo é colocado em um recinto fechado de 2,5 x 1,3m, em uma janela ao lado do ambiente de estudos, nivelado e projetado para fora do prédio, com a finalidade de aproximar o ângulo de visão do exterior observado em ambiente real.

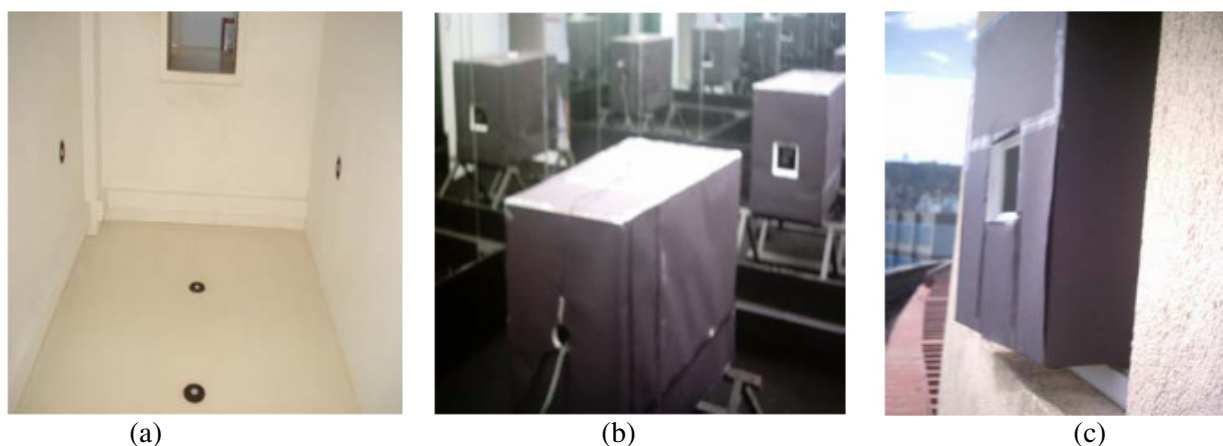


Figura 5 - a) Posicionamento dos sensores na maquete;  
 b) Posicionamento da maquete para medição no céu artificial;  
 c) Posicionamento da maquete para a medição no céu real + entorno.

A maquete apresenta materiais com as mesmas propriedades da sala de estudo. As paredes, o teto e o piso foram cobertos por tinta Suvinil de refletâncias conhecidas, iguais respectivamente a 75%, 34% e 64%. As medições do comportamento luminoso no ambiente real e no modelo físico foram realizadas sem a presença do vidro da abertura. Esse procedimento evitou possíveis distorções caracterizadas pela transmitância e especularidade do material, difíceis de serem modeladas no modelo em escala. Cabe salientar que o modelo físico em escala foi recoberto com papel preto para reduzir a interferência das reflexões externas na caracterização do ambiente luminoso interno do céu artificial, conforme recomendado por Castaño (2007).

Foram realizadas 25 medidas entre os dias 02/02/2007 e 12/04/2008, em horários que variaram desde 08h30min até 15:00h, com distintas condições de céu. Além das medidas de iluminâncias, também foi realizado o mapeamento digital das luminâncias da abóbada celeste, para fins de validação de ferramentas de simulação computacional (PEREIRA, 2009).



### 3.2. O céu artificial tipo “caixa de espelhos”

O céu artificial tipo “caixa de espelhos” do LabCon/ARQ/UFSC foi construído em 2005, no contexto do "Projeto de Revitalização/Capacitação do LabCon-UFSC", com apoio financeiro da Eletrobrás/Procel Edifica. O céu consiste num 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 e as quatro paredes revestidas com placas de espelhos (ver Figura 6).

O céu foi calibrado em 2006 com o auxílio de um sistema de mapeamento digital de luminâncias IQCam Lumetrix que possibilitou a caracterização precisa da distribuição de luminâncias do simulador, proporcionando a sua calibração para produzir uma distribuição de luz semelhante à do Céu Encoberto CIE, conforme se verifica na Figura 7 (CASTAÑO, 2007).



Figura 6 - Céu artificial tipo “caixa de espelhos” do LabCon/ARQ/UFSC

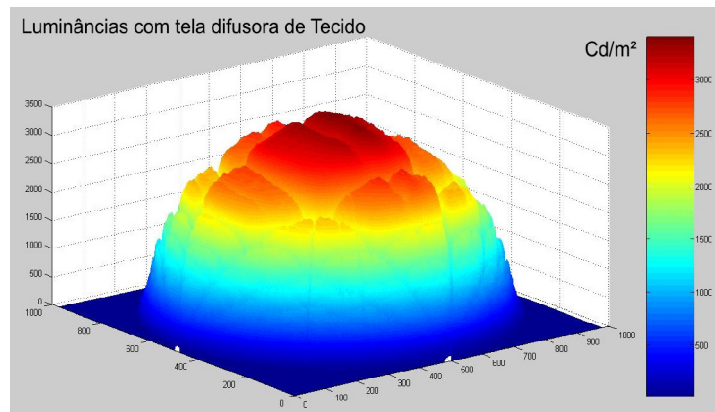


Figura 7 - Distribuição de luminâncias (em 3D) do céu artificial LabCon/ARQ já calibrado, semelhante a distribuição de um Céu Encoberto CIE.

### 3.3. Avaliação do Efeito de Escala

O efeito de escala no estudo da iluminação com modelos arquitetônicos é apontado por muitos pesquisadores como uma das principais fontes de erro deste método (THANACHAREONKIT et al, 2005). Este aspecto foi analisado como uma das principais determinantes da construção dos modelos arquitetônicos. Para esta investigação foram construídos 3 modelos arquitetônicos, em escalas 1:5, 1:7.5 e 1:10, para serem avaliados no céu artificial do LabCon/ARQ (ver Figura 8).

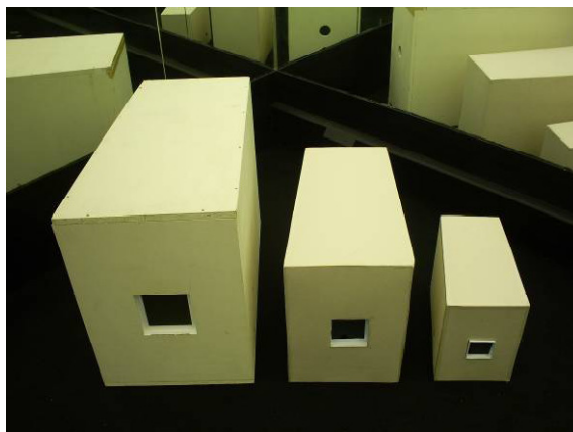


Figura 8 - Modelos arquitetônicos nas escalas 1:5, 1:7.5 e 1:10

No interior de cada modelo arquitetônico foram demarcados três pontos para a instalação das fotocélulas Li-Cor, conservando sua respectiva relação entre a distância e a abertura, na escala e na localização deles no piso de cada modelo arquitetônico. O posicionamento dos modelos arquitetônicos foi determinado mantendo-se como referência para todos os casos, a localização do centro geométrico da janela, orientada na direção de uma das paredes do céu artificial.

Todos os dados registrados no interior dos modelos arquitetônicos foram processados com a iluminância horizontal exterior para determinação do parâmetro DF (Daylight Factor).

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Comparação dos resultados no ambiente real X ambiente em escala reduzida

As divergências nas medidas foram avaliadas através do erro relativo, conforme equação abaixo.

$$\text{Erro M} = \frac{E_{AR} - E_M}{E_{AR}} 100(\%)$$

Onde, Erro M é o erro das medidas feitas no ambiente em escala em relação as do ambiente real [%]; EAR é a iluminância medida no ambiente real [lx]; e EM é a iluminância medida no ambiente em escala reduzida [lx];

As menores divergências, abaixo de 5%, ocorreram nos sensores mais próximos à janela, conforme esperado, nas posições do piso e nas superfícies verticais, à direita e à esquerda. Os resultados do sensor no piso no centro da sala e junto à porta (mais afastados da janela) apresentaram as maiores divergências, em torno de 15% a 20% (ver Figura 9).

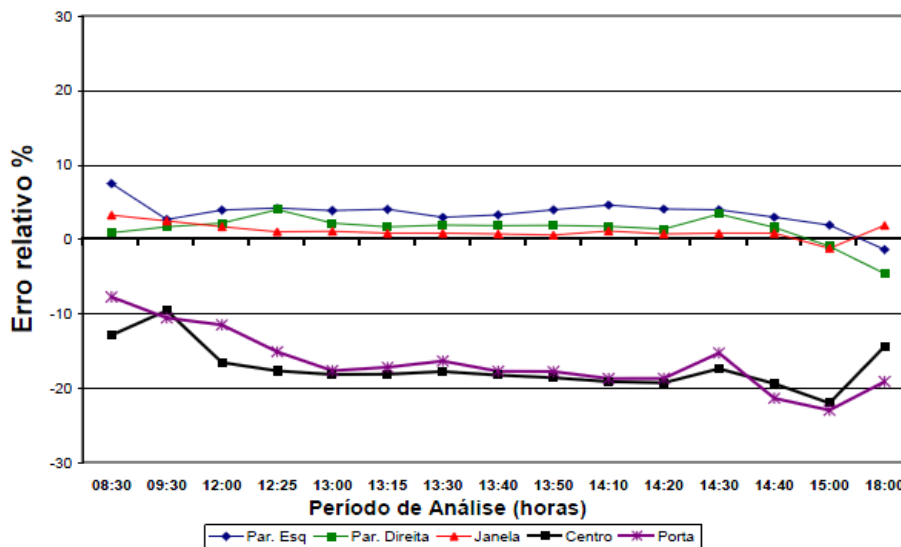


Figura 9 - Erro relativo entre o ambiente em escala e o real.

Além das divergências serem quantitativamente menores junto à janela, os resultados mostram que as medições feitas no ambiente em escala subestimam as iluminâncias reais, fato que se explica pela maior área relativa dos sensores nos modelos reduzidos, o que reduz efetivamente o campo de visão dos sensores através da abertura. Enquanto, nos pontos mais afastados da janela os valores são superestimados, ou seja, são superiores às iluminâncias medidas no ambiente real.

A Figura 10 mostra a frequência de ocorrência de erros relativos nas diversas faixas de erro. As ocorrências de erros no intervalo de +/- 5% foram de 92% para as medidas junto à Janela, 88% na Parede Direita, 80% na Parede Esquerda, enquanto os erros das medidas nos pontos mais afastados da janela situaram-se na sua maioria no intervalo de -10% a -20% (80% para a Porta e 76% para o Centro).

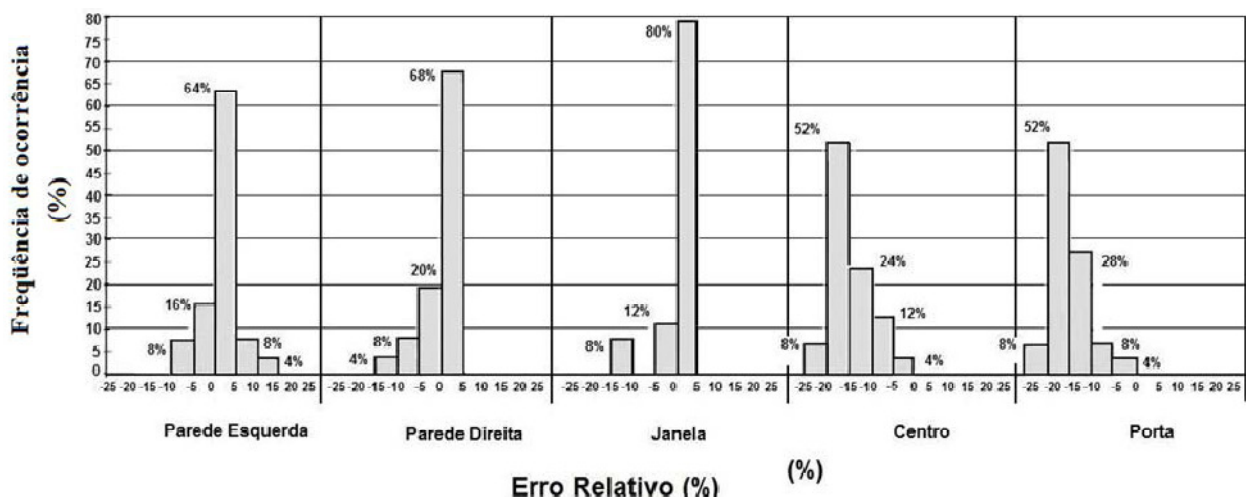


Figura 10 - Frequência de ocorrência dos erros relativos – ambiente real X ambiente em escala reduzida.



Mesmo considerando-se a diferença de proporção entre a dimensão dos sensores e as dimensões das aberturas (ambiente real e em escala) e o fato das medidas terem sido realizadas sob diferentes condições de céu real, a concordância entre os valores encontrados nas posições junto à abertura foi muito boa. As divergências encontradas nos pontos mais afastados da janela podem ter a explicação associada à maior influência da componente da iluminação refletida internamente. Em relação a isto, cabe salientar que apesar de ter sido usada a mesma cor, foram tintas distintas devido à natureza dos materiais, reboco fino no ambiente real e madeira de compensado lixada no ambiente em escala. Diferenças na refletância final e, especialmente, na distribuição da luz refletida podem ser a causa desta superestimação das iluminâncias no ambiente em escala reduzida.

#### 4.2. Comparação dos resultados em modelos físicos em diferentes escalas,

As medições foram realizadas no céu artificial tipo “caixa de espelhos” do LabCon/ARQ com uma iluminância média de aproximadamente 7.400 lx, na altura de referência do piso de 0,70m. A Tabela 2 apresenta os valores de iluminâncias e DF para cada dos 3 pontos (P1-janela, P2-centro e P3-porta), para cada uma das 3 escalas.

Tabela 2 - Dados de iluminância obtidos nos modelos arquitetônicos em escala.

<b>Avaliação por Escalas</b>				
<b>E exterior</b>	<b>7425</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>
<b>1: 5</b>	E (lux)	220	136	92
	DF (%)	2,96	1,84	1,24
<b>1: 7.5</b>	E (lux)	214	130	90
	DF (%)	2,88	1,75	1,21
<b>1: 10</b>	E (lux)	210	128	89
	DF (%)	2,83	1,72	1,20

A Figura 11 apresenta a variação gráfica dos valores de DF (%) para os 3 pontos nas 3 escalas distintas.

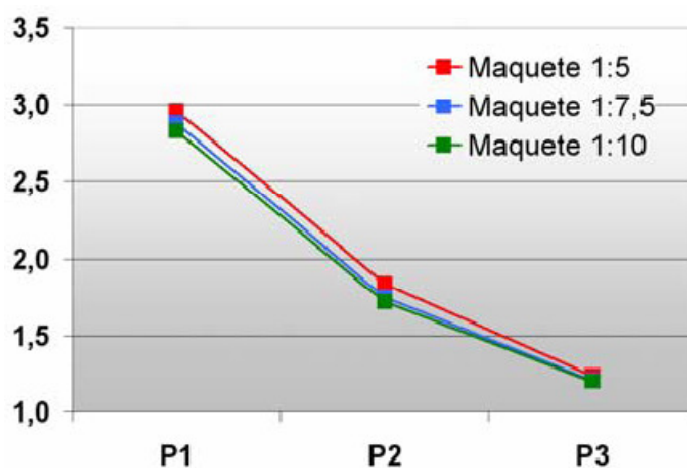


Figura 11 - DF (%) medidos nos modelos arquitetônicos 1:5, 1:7.5 e 1:10

As análises dos pontos avaliados mostraram que o modelo na escala 1:5 apresentou valores de DF superiores aos outros dois modelos. Os resultados dos modelos 1:7,5 e 1:10 mostraram-se muito próximos quando comparados com o modelo 1:5. Esta condição pode ser associada ao fato de que o material do modelo na escala 1:5 é madeira compensada pintada, enquanto que os modelos 1:75 e 1:10 foram construídos com papel Paraná, pintados com a mesma tinta. Assim, da mesma forma que as diferenças observadas entre o ambiente real e o ambiente em escala reduzida, as diferenças encontradas entre estes modelos de diferentes materiais podem ser decorrentes das variações na componente refletida interna.

Quantitativamente, as maiores diferenças foram de 6% no ponto P2 (centro) entre os valores dos modelos nas escalas 1:5 e 1:10. O erro médio situou-se entre 3% a 4%.

Com esses resultados, entende-se ser possível afirmar que o efeito da escala não representa um erro significativo na avaliação e no cálculo de DF com modelos físicos em escala reduzida no interior do céu

artificial tipo “caixa de espelhos”, considerando que as divergências dos valores que caracterizam a iluminação são inferiores a 4%.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nas duas etapas do método de estudo proposto, é possível verificar que o procedimento experimental com modelos físicos em escala reduzida pode ser um método bastante confiável para simular as condições de iluminação natural no interior de edificações.

Os erros relativos entre os valores medidos no ambiente real e em escala foram inferiores a 5%, exceto naquelas situações onde a componente refletida foi relevante. Nestes casos, a falta de garantia da obtenção das refletâncias iguais (em magnitude e distribuição) foi aparentemente a principal responsável pelos erros de até 20%.

A influência do efeito de escala também não se mostrou significativa, divergências inferiores a 4% não são representativas.

Entretanto, cuidados especiais na confecção dos modelos e na realização das medições são muito importantes, no que tange à caracterização das propriedades ópticas das superfícies participantes, reprodução das condições de exposição dos modelos (entorno), precisão dimensional e procedimentos fotométricos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKER, N. & STEEMERS, K., **Daylight Design of Buildings**, James X James Ltd., London, 2002.
- BODART, M. **The new Belgian artificial sky and sun and its validation**. IEA Task31, Symposium. Setembro de 2004.
- CANNON-BROOKES. Simple scale models for daylighting design: Analysis of sources of error in illuminance prediction. **Lighting Research and Technology**, v. 29, p. 135-142, 1997.
- CASTAÑO, Alexander G., **Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007
- 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**. Department of Architecture University of Washington. Washington, 1989.
- 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 I.N.1, 1991, Rio Cuarto, Cordoba, Argentina. Volumen I, pp 121-124.
- KIM, K. S.; BOYER, L. & DEGELMAN, L., Daylighting analysis through scale model, full scale measurements and computer analysis for a Texas A&M University Campus building. In: 2nd Annual Symposium "Improving Building Energy Efficiency in Hot and Humid Climate", Texas, USA, 1985, **Proceedings**, pp.16-21.
- LAM, W. M. C., **Sunlighting as Formgiver for Architecture**. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1986
- LITTLEFAIR, P. J., Measuring daylight - The effective use of scale models. In: UK-ISES Conference "Daylighting Buildings", London, UK, 1989, **Proceedings**, pp.43-54.
- LOVE, J. A., NAVVAB, M., Daylighting estimation under real skies: a comparison of fullscale photometry, model photometry and computer simulation. **Journal of the Illuminating Society**, 20 (1), pp 140-156, New York, 1991
- MARDALJEVIC, J. A **‘Gold Standard’. Dataset for the validation of illuminance predictions**. Institute of Energy And Sustainable development. Montfort University. 2002.
- MOORE, F., **Concepts and Practice of Architectural Daylighting**. (2nd ed.). Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1991
- NAVVAB, M, Scale model photometry techniques under simulated sky conditions, In: The 1995 IESNA Annual Conference, Illuminating Engineering Society of North America, **Proceedings**, summer, 1996. pp 160 – 171
- PEREIRA, R. C., **Metodologia para Avaliação de Ferramentas de Simulação de Iluminação Natural Através de Mapeamento Digital de Luminâncias**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009
- PEREIRA, R.C.; PEREIRA, F. O. R.; CLARO, A.; SOUZA, L. P. F. de. Metodologia para Avaliação de Ferramentas de Simulação da Iluminação Natural Através de Mapeamento Digital de Luminâncias. In: V Encontro Latino-Americano e IX Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2007, **Anais**, Ouro Preto/MG, ENCAC-ELAC 2007. CD-ROM, pp. 1431-1440.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Daylighting Simulation: Methods, Algorithms, Resources - Solar Heating and Cooling Programme** Task 21 / Energy Conservation in Buildings and Community. Systems Programme, Annex 29: Daylight in Buildings. December 2006.
- ROBBINS, C. L., **Daylighting: Design and Analysis**. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1986
- SCHILER, M. (Eds.), **Simulating Daylight with Architectural Models**. Daylighting Network of North America/University of Southern California, Los Angeles, USA, 1987.
- THANACHAREONKIT, A; ANDERSEN, M; SCARTEZZINI, J-L., Comparing daylighting performances assessment of buildings within scale models and test modules. **Journal Solar Energy**, v. 79, p. 107-220, 2005.