



**ENTAC2006**

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO | XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

## **AValiação DE DISPOSITIVOS REFLETORES TIPO PRATELEIRAS DE LUZ**

**Luciana S. Ferreira(1); Marcia P. Alucci(2); Norberto C. S. Moura (3); Bruna Luz(4).**

(1) FAUUSP - LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética / Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Brasil – e-mail: lu\_schu@yahoo.com.br

(2) FAUUSP - LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética / Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Brasil – e-mail: marcia\_lu@terra.com.br

(3) FAUUSP - LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética / Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Brasil – e-mail: norbertomoura@terra.com.br

(4) FAUUSP - LABAUT Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética / Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Brasil – e-mail: bruzisluzis@yahoo.com.br

### **RESUMO**

**Proposta:** Em iluminação natural, a avaliação do desempenho luminoso de dispositivos refletores (prateleiras de luz) tem sido objeto de diversos estudos no meio especializado, mas a complexidade do cálculo analítico, somada à “caixa preta” representada pelas ferramentas computacionais, dificulta a avaliação do fenômeno. Buscando contribuir nesse sentido, este artigo é uma análise comparativa entre ensaios sob céu real, utilizando modelos em escala reduzida, e simulações computacionais (RADIANCE). O objetivo é caracterizar tanto a influência das prateleiras de luz no plano de trabalho como verificar a correspondência entre os ensaios e as simulações. **Método de Pesquisa/Abordagens:** Definição do modelo reduzido de acordo com recomendações nacionais e internacionais; execução de dois modelos similares para identificar o desempenho da prateleira de luz; análise referenciada na disponibilidade de luz natural exterior. **Resultados:** Mesmo com algumas distorções, as ferramentas testadas mostraram boa correlação nos estudos de iluminação natural. **Contribuições / Originalidade:** Avaliação de desempenho de prateleiras de luz; verificação do comportamento das ferramentas para predição da luz natural, identificando eventuais deficiências e ajustes necessários para maior precisão e confiabilidade nas decisões de projeto.

Palavras-chave: Avaliação de desempenho luminoso; prateleiras de luz; dispositivos de reflexão da luz.

### **ABSTRACT**

**Proposal:** In daylighting, the reflectors devices (light shelves) luminous performance evaluation has been object in several studies in the specialized area, but the complexity in the analytic calculation, added to the "black box" represented by the computer tools, interferes in the phenomenon evaluation. As a kind of contribution, this article is a comparative analysis considering real sky essays, by using reduced scale models, and computer simulations (RADIANCE). The aim is to characterize both the light shelves influence in the work plan and the essays and simulations correspondence. **Methods:** Reduced scale model definition in agreement with national and international recommendations; two similar models execution to identify the light shelf performance; analysis based on external natural light availability. **Results:** Despite some distortions, the tested tools presented good correlation in the daylighting studies. **Originality/value:** Light shelves performance evaluation; daylight prediction tools behavior verification, identifying eventual deficiencies and the necessary adjustment for higher precision and reliability in project decisions.

Keywords: Luminous performance evaluation; light shelves; light reflection devices.

## 1 INTRODUÇÃO

A iluminação natural é uma área de pesquisa ainda em consolidação. Mesmo contando atualmente com diversos recursos, principalmente aqueles introduzidos pela informática, existem dificuldades em adequar o modelo ao real, devido à complexidade envolvida no fenômeno. Curiosamente, ainda convivem ferramentas simples, como maquetes, diagramas e tabelas, com ferramentas extremamente complexas, representadas pelos aplicativos desenvolvidos especificamente para predição da luz natural no ambiente construído. Aqui, cabe considerar a necessidade de validação destes aplicativos, uma tarefa que exige muito trabalho. Neste aspecto, o RADIANCE é um aplicativo consolidado no meio especializado. Quanto à sua validação, destaca-se o trabalho de Mardaljevic (1999), mostrando a correspondência dos resultados obtidos nas simulações com condições de céu real, mas também alertando quanto às especificidades envolvidas na predição da luz natural.

Utilizando dois modelos similares em escala reduzida, foram realizados ensaios sob céu real, aplicando em apenas um dos modelos o dispositivo refletor (prateleira de luz) para investigar a sua influência na iluminação do ambiente. As dimensões dos modelos seguiram a modulação padrão recomendada pela FDE – Fundação para Desenvolvimento da Educação – para salas de aula. Os resultados dos ensaios foram comparados com simulações computacionais (RADIANCE).

## 2 OBJETIVO

Através da análise comparativa entre os ensaios e as simulações pretende-se:

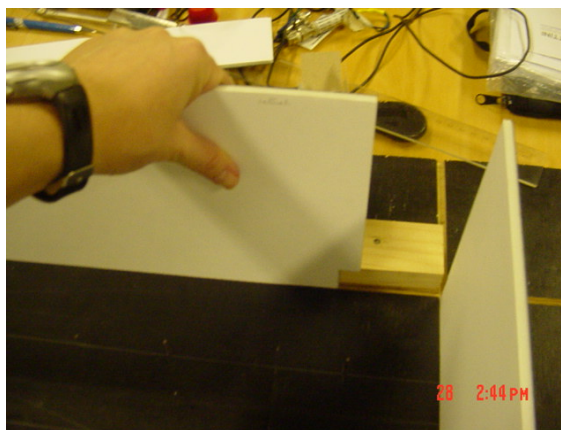
- Caracterizar a influência da prateleira de luz na iluminação do plano de trabalho;
- Verificar a correspondência entre os resultados dos ensaios e das simulações computacionais;

## 3 DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO EM ESCALA REDUZIDA (MAQUETE)

O modelo físico foi construído em papel pluma dupla face, nas cores branca e preta. A base em madeira permite estruturar os vedos verticais que são encaixados em estreitos sulcos executados na base. No lado externo dos sulcos, foram colocados sarrafos de madeira para facilitar a fixação e obtenção do esquadro entre os planos. Além de estruturar o modelo, a base em madeira evita a movimentação do modelo pela ação dos ventos nos ensaios a céu aberto, pois o papel pluma é muito leve (Figura 1).



(a)

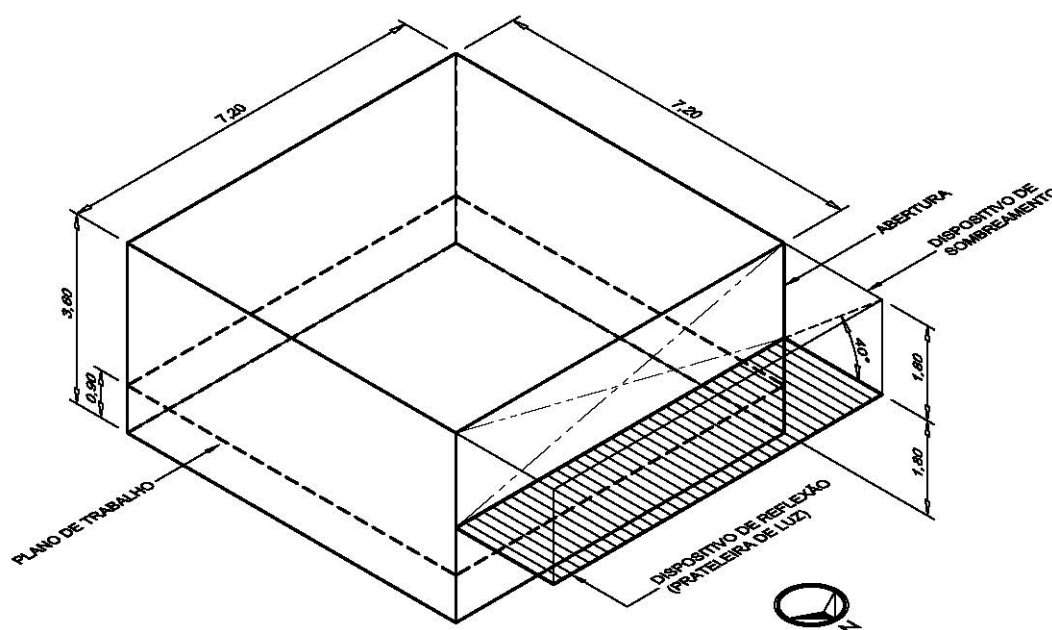


(b)

**Figura 1 - Vista da Base do Modelo Físico (a). Encaixe dos Planos Verticais na Base (b)**

A planta é quadrada, 7,20 x 7,20m, com pé-direito de 3,60m. A abertura em apenas uma fachada abrange toda sua extensão, com peitoril e altura de 1,80m. Todo o perímetro da abertura recebe dispositivos de sombreamento e / ou reflexão - adequados à latitude de São Paulo (23,5° S) - configurando uma caixa aberta em duas faces opostas, por onde penetra a luz direta e difusa para o ambiente. A base desta caixa tem função de reflexão, a face superior de sombreamento e as faces laterais ora refletem ora obstruem a luz, dependendo da posição solar. A diagonal das faces laterais define um ângulo vertical de 40°, apresentando obstrução total da radiação solar direta entre 11 e 13hs, para a cidade de São Paulo, quando a abertura é orientada para Norte. No Solstício de Inverno, o rendimento da face inferior é máximo, permitindo a penetração solar em praticamente toda sua superfície, mas sem atingir o interior do ambiente. Esta face atua como uma prateleira de luz direcionada para o forro do ambiente (Figura 2).

A face branca do papel pluma foi direcionada para o interior do modelo e do dispositivo de sombreamento, e a face preta para o exterior. Todas as superfícies aproximam-se do difusor perfeito.



**Figura 2 - Geometria e Dimensões do Modelo Físico**

A escala adotada 1:20 está conforme o Projeto de Norma ABNT 02:135.02-004:2003, que recomenda como escala mínima 1:40. Em relação à dimensão dos sensores, as fotocélulas devem ter a menor dimensão possível. O diâmetro da fotocélula utilizada (Li-COR modelo LI-210SA) é 0,8 cm, de acordo com o Projeto de Norma, que recomenda o diâmetro máximo de 1cm para a escala adotada (1:20)

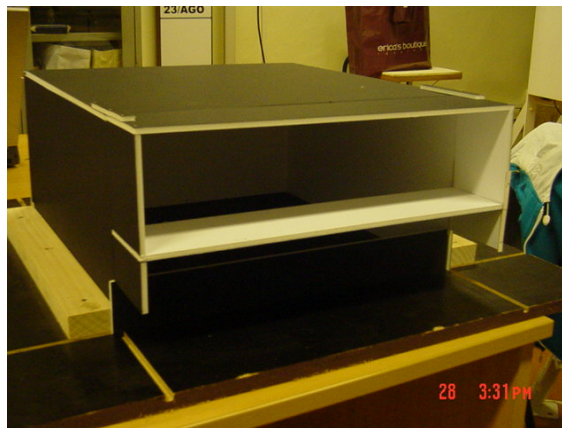
Para possibilitar ensaios simultâneos com luz natural, foram elaborados dois modelos similares. Em um deles, a prateleira de luz foi retirada e o piso externo, lindeiro à abertura, foi revestido na cor preta, visando a análise comparativa do desempenho da prateleira com radiação solar direta.

A abertura não recebeu qualquer material transparente. Embora o comportamento da luz seja independente da escala (ANDER, 1995, p.74), é difícil reproduzir no modelo as mesmas características do elemento transparente, como também dos caixilhos, pela reduzida dimensão de seus componentes. Qualquer adaptação nesses elementos pode distorcer os resultados e comprometer sua confiabilidade.

Foi prevista uma pequena abertura lateral próxima ao piso para passagem da fiação dos sensores (Figura 3a), que estão apoiados em pequenos suportes cilíndricos de madeira, posicionando as fotocélulas no nível do Plano de Trabalho (0.90). Após a instalação dos sensores, a abertura lateral foi devidamente vedada com fita isolante preta, para evitar ao máximo qualquer vazamento indesejado de luz que pudesse interferir nas medições.



(a)



(b)

**Figura 3 - Passagem para Fiação dos Sensores (a). Vista Frontal do Modelo Físico (b)**

A simplificação do modelo pretendeu aumentar seu grau de precisão, permitindo identificar, através dos ensaios, o potencial e a influência da prateleira de luz na iluminância do plano de trabalho, na distribuição e na qualidade da luz natural proporcionada em todo ambiente.

#### **4 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS**

De acordo com os recursos disponíveis, os ensaios em maquete foram feitos em espaço externo, com pequena interferência do entorno, buscando avaliar o desempenho do modelo em condições reais de céu e Sol.

Os equipamentos e acessórios utilizados foram os seguintes:

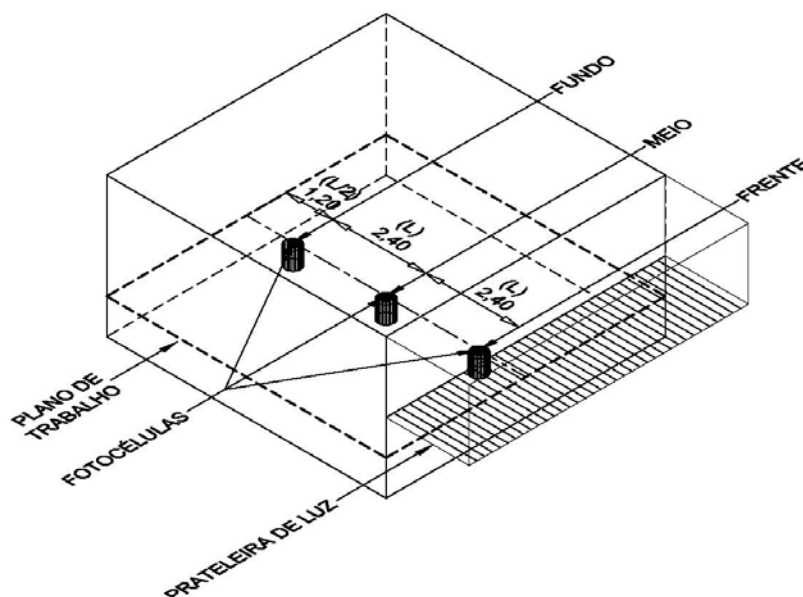
- 9 Fotocélulas Li-COR modelo LI-210SA
- Data Logger ELE international modelo MM 900
- Câmera Digital Nikon Coolpix 4500
- Lente hemisférica Nikon FC – E8. Projeção Eqüidistante
- Luminancímetro LMT
- Anel de obstrução CM/121. Kipp & Zonen

Adotaram-se duas tipologias de dispositivos na abertura. Ambas apresentam obstrução total da radiação solar direta para o ambiente, mas apenas uma agrega a função de reflexão da luz direta e difusa. Assim, a prateleira de luz (ver Figura 2) é retirada em um dos modelos, configurando a situação sem prateleira de luz para verificação comparativa de seu desempenho.

O Data Logger foi configurado para extrair a média por minuto das iluminâncias registradas por segundo. Como o período das medições foi relativamente longo, foram recalculadas as médias para cada 10 minutos, facilitando a manipulação e visualização dos resultados.

Os ensaios foram realizados na cidade de São Paulo - latitude  $23,5^\circ$  Sul e longitude  $46,5^\circ$  Oeste - das 10:30 às 15:00hs, em 13 de julho de 2005, nas condições de Céu Claro para avaliar o desempenho da prateleira de luz sob radiação solar direta. Foram utilizados dois modelos físicos similares, um com e outro sem prateleira de luz. A abertura foi orientada para Norte e, conforme projetado, o dispositivo de sombreamento apresentou obstrução total da radiação solar direta para dentro do ambiente, no período dos ensaios.

Foram instaladas seis fotocélulas interiores (três dentro de cada modelo) e três exteriores (duas protegidas da radiação solar direta pelo anel de obstrução e uma sem qualquer proteção, para registrar a iluminância devida à radiação solar global). As fotocélulas interiores foram posicionadas na linha de centro ortogonal à abertura, equidistantes entre si ( $L = 2,40\text{m}$ ). Assim, a distância resultante entre as fotocélulas extremas e as laterais do modelo é igual a  $L/2$  ( $1,20\text{m}$ ). Adotou-se a nomenclatura FRENTE, MEIO e FUNDO tomando como referência a abertura (Figura 4).

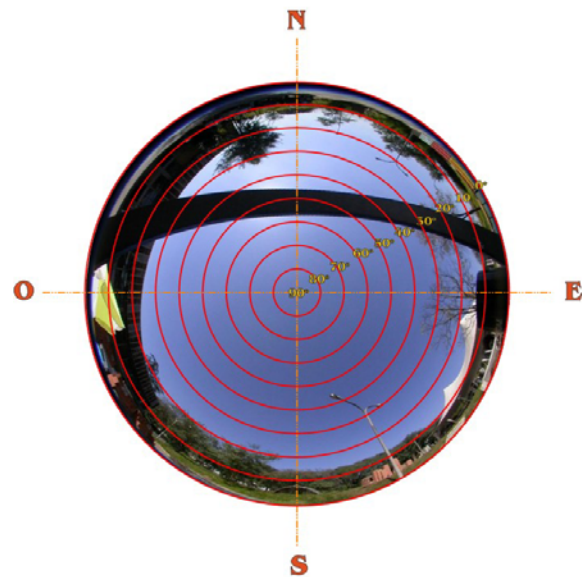


**Figura 4 – Posicionamento das fotocélulas dentro da maquete**

As fotocélulas sob o anel de obstrução foram orientadas para registrar a luz difusa no plano horizontal desobstruído e no plano vertical Sul (Figura 5a). Cabe observar que, no local escolhido para os ensaios, o entorno na orientação Este apresenta obstrução praticamente constante a uma altura média de  $10^\circ$  e, na orientação Oeste, a  $20^\circ$ . A Lente hemisférica Nikon FC gera a imagem em projeção equidistante. A Figura 5b ilustra o ponto de vista da fotocélula no plano horizontal sob o anel de obstrução da radiação solar direta.



(a)



(b)

**Figura 5 – Disposição dos equipamentos e das maquetes(a). Vista do Céu Sob o Anel de Obstrução (b)**

A cada hora foi verificada a luminância da prateleira de luz, que mostrou pouca variação entre as 11:45 e 13:45 h (21275 a 21850  $\text{cd/m}^2$ ), mas observou-se uma redução significativa às 15:00 h, atingindo 14203  $\text{cd/m}^2$ .

Adotou-se a nomenclatura Ensaio A para o modelo com prateleira de luz e Ensaio B para o modelo sem prateleira de luz.

## 5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Buscando reproduzir as mesmas condições dos ensaios, foram feitas simulações computacionais através dos aplicativos RADIANCE / ECOTECT para uma avaliação comparativa dos resultados. Devido à interface mais amigável com o usuário oferecida pelo ECOTECT e à maior precisão de cálculo do RADIANCE, as simulações utilizaram os recursos de migração entre esses aplicativos. Desta forma, a modelagem e apresentação dos resultados foi feita no ECOTECT, utilizando o RADIANCE no cálculo.

Nas simulações adotou-se a mesma numeração dos ensaios, com a seguinte correspondência:

- Simulação A → Ensaio A (com prateleira de luz)
- Simulação B → Ensaio B (sem prateleira de luz)

Não foram utilizados quaisquer ajustes ou artifícios nas simulações para colocá-las sob as mesmas condições dos ensaios, aplicando apenas a mesma data e horário, e adequando a localização geográfica e o tipo de céu (céu claro CIE).

Os horários estipulados foram: 11:00; 12:00 e 13:00h. Para cada horário simulado, foi verificada a iluminância no plano horizontal desobstruído conforme segue:

Horário	Céu Claro com Sol	Céu Claro sem Sol
11:00	58125 lux	9850 lux
12:00	60750 lux	9980 lux
13:00	58000 lux	9900 lux



## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios e nas simulações foram dispostos em tabelas e gráficos para uma análise comparativa. Teoricamente, ambos estão sob as mesmas condições, mas as variações intrínsecas à luz natural direta e difusa devem ser consideradas, podendo explicar possíveis desvios nas simulações. Nesta análise considerou-se apenas o horário 12:00h. Para obter um valor único nos ensaios, foram calculadas as médias entre 11:50 e 12:20h dos registros nos modelos com e sem prateleira de luz.

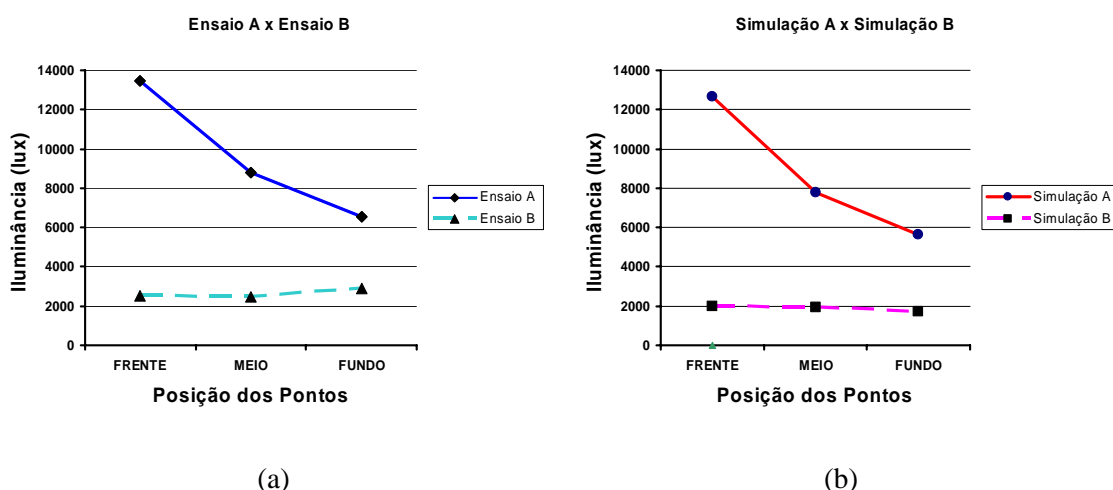
**Tabela 1 - Verificação Comparativa Ensaio (Céu Real) x Simulações (Radiance / Ecotect)**

Data: 13/06 Horário: 12:00	ILUMINÂNCIAS (lux)							
	INTERNAS						EXTERNAS	
	Modelo com Prateleira (A)			Modelo sem Prateleira (B)			com Anel	sem Anel
DESCRIÇÃO	FRENTE	MEIO	FUNDO	FRENTE	MEIO	FUNDO	HORIZONTAL	HORIZONTAL
Ensaio - Céu Real	13483	8809	6570	2507	2487	2910	8349	73328
Simulação: Radiance/Ecotect	12637	7752	5642	2004	1943	1720	9980	60750

O primeiro aspecto analisado refere-se à influência da prateleira de luz na iluminação do plano de trabalho. O Gráfico 1 ilustra o potencial desse dispositivo, quando sob a incidência da luz solar direta. Na posição FRENTE, o sensor do modelo com prateleira (Ensaio A) registrou um valor da ordem de 5,38 vezes o registrado na maquete sem o dispositivo (Ensaio B). Nas demais posições, MEIO e FUNDO, os valores do Ensaio A atingiram 3,54 e 2,26 vezes os valores do Ensaio B (Gráfico 1a).

Situação semelhante observa-se nas simulações computacionais (Gráfico 1b). Dividindo os resultados da Simulação A (com prateleira) pelos da Simulação B (sem prateleira), as proporções entre os pontos FRENTE, MEIO e FUNDO são: 6,30; 3,99 e 3,28.

Por outro lado, a uniformidade foi prejudicada pela prateleira de luz. Nos ensaios, a razão  $E_{\min}/E_{\text{med}}$ <sup>1</sup> passa de 0,68 para 0,94 quando a prateleira é retirada. As simulações confirmam este resultado, com a uniformidade passando de 0,65 para 0,91.



**Gráfico 1 – Verificação Comparativa: Ensaio A x Ensaio B (a). Simulação A x Simulação B (b)**

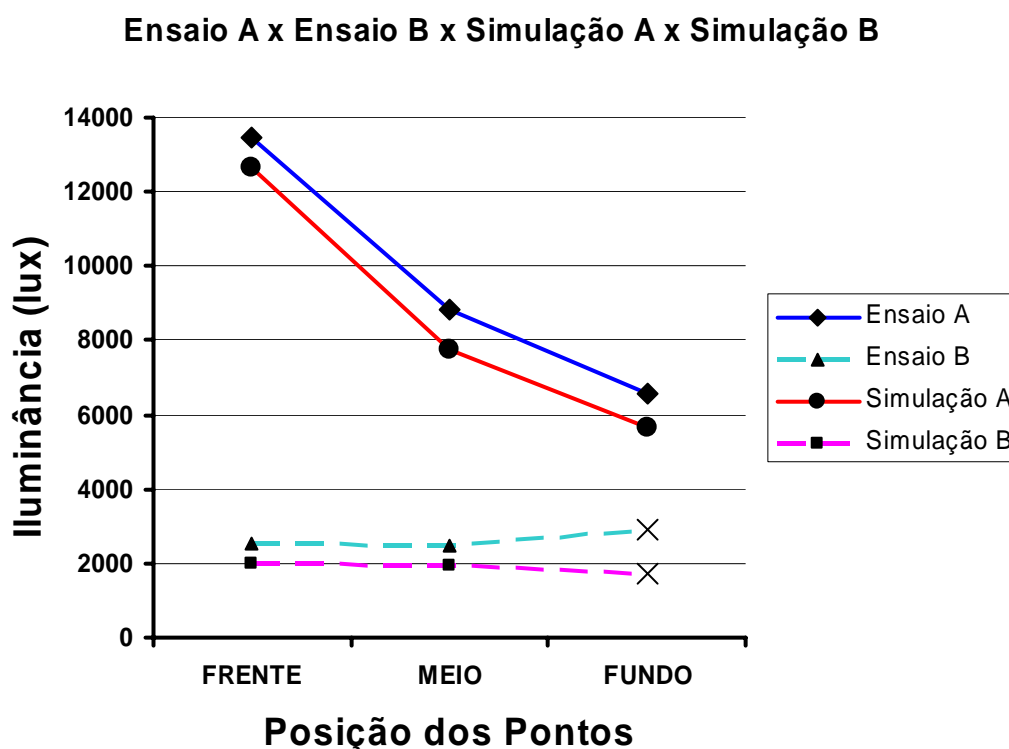
<sup>1</sup> Uniformidade (U) = Iluminância mínima ( $E_{\min}$ ) / Iluminância média ( $E_{\text{med}}$ ).

Quanto à correspondência entre os ensaios e as simulações, observa-se praticamente a mesma variação das iluminâncias no Ensaio A e na Simulação A, mas os valores permaneceram um pouco abaixo na simulação. Se considerarmos que a iluminância externa, no plano horizontal desobstruído, é menor no cálculo do RADIANCE que no registro do ensaio (Tabela 2 – Iluminância Externa sem Anel), tal correspondência irá se aproximar ainda mais sob as mesmas condições.

No Ensaio B, o sensor FUNDO registrou o valor mais alto no ambiente, contrariando a expectativa para esta posição. Este fenômeno poderia ser decorrente da maior parcela de céu visível no ponto. Entretanto, a Simulação B contrariou esta hipótese, e a iluminância decresceu ao se afastar da abertura. Assim, o Ensaio B e a Simulação B apresentaram variação semelhante no padrão da curva dos pontos FRENTE e MEIO, mas divergiram no ponto FUNDO (Gráfico 2)<sup>2</sup>.

Observou-se ainda que, no dia do ensaio, a faixa de céu próxima ao horizonte até uma altura aproximada de 20°, apresentava uma névoa com alto brilho na orientação Norte, registrando luminâncias em torno de 9 kcd/m<sup>2</sup>. Este aspecto pode ter influenciado na iluminação do fundo do ambiente, e talvez justifique os desvios observados entre o Ensaio B e a Simulação B, pois foge do modelo matemático que determina as equações de céu.

Como na Simulação A, os valores da Simulação B também permaneceram abaixo dos registrados no Ensaio B. Entretanto, conforme ilustrado na Tabela 2, a iluminância externa no plano horizontal proveniente apenas do céu<sup>3</sup> é superior, nas simulações, à registrada nos ensaios. Portanto, os resultados entre a Simulação B e o Ensaio B irão se afastar sob as mesmas condições, diversamente do que ocorreu entre a Simulação A e o Ensaio A, pois a luz da abóbada é mais significativa, na iluminação do ambiente, quando não é aplicada a prateleira.



**Gráfico 2 – Verificação Comparativa: Ensaio A x Ensaio B x Simulação A x Simulação B**

<sup>2</sup> Estes pontos estão indicados com X no Gráfico 2.

<sup>3</sup> Iluminância Externa com Anel de Obstrução



## 7 CONCLUSÕES

A influência da prateleira de luz mostrou-se significativa tanto no nível como na distribuição da iluminação. Observou-se que a maquete sem prateleira apresentou maior uniformidade, mas os níveis são muito inferiores, quando comparados à maquete com prateleira. Esta constatação revela o elevado potencial de superfícies refletoras sob a radiação solar direta.

O peitoril elevado e o dispositivo de sombreamento favoreceram a distribuição, apresentando valores de uniformidade difíceis de serem obtidos com a iluminação lateral (acima de 0,90). Desta forma, o ambiente tornou-se mais sensível à influência da prateleira de luz, pois qualquer elemento adicional interfere no equilíbrio anterior.

Embora a distribuição tenha sido prejudicada pela prateleira de luz, a posição relativa entre as superfícies de reflexão pode ser ajustada para direcionar a luz conforme convenha. Este recurso poderá corrigir eventuais deficiências no nível de iluminação com menor impacto na uniformidade da iluminação em todo ambiente.

Tanto o RADIANCE como os ensaios em maquete mostraram bom desempenho na predição da iluminação do ambiente. Utilizando recursos padrões do aplicativo e através de um modelo físico simples, os resultados, de maneira geral, estiveram bastante próximos. As maiores divergências foram observadas em relação à luz difusa da abóbada celeste. Esta fonte, comparada à luz solar direta, é mais complexa em relação ao modelo matemático, e sua correspondência com a realidade fica sujeita a diversas contingências. Mesmo assim, devido à sazonalidade e variação própria da luz natural, considera-se que os resultados foram satisfatórios, e ambos os procedimentos configuram ferramentas eficazes para as decisões de projeto.

A luz solar direta, normalmente descartada em iluminação natural por sua elevada intensidade, revelou grande potencial de aproveitamento por reflexão. Cabe salientar que a superfície da prateleira de luz adotada aproxima-se do difusor perfeito e que o RADIANCE incorpora sua influência no cálculo da iluminação no plano de trabalho.

Para avaliar o desempenho da prateleira de luz, os melhores resultados nas simulações foram obtidos ajustando o número de reflexões indiretas para 9. Este é o valor máximo admitido pelo RADIANCE e influencia sensivelmente no resultado final. Entretanto, para modelagens complexas, este ajuste está diretamente relacionado ao tempo de processamento do cálculo.

O desvio identificado na posição FUNDO entre o Ensaio B e a Simulação B deverá ser objeto de estudo futuro, para aprofundamento das questões levantadas.

## 8 REFERÊNCIAS

- ANDER, G. D. **Daylighting Performance and Design**. New York: VNR, 1995. p.74.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto 02:135.02-004:2003,:** **Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição**. Rio de Janeiro, 2003. 13 p.
- BERKELEY LAB. **Desktop Radiance 2.0 Beta**. Marinsoft & Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001
- COMMISSION INTERNATIONALE DE ÉCLAIRAGE. **CIE S 003.3/E-1996: Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky**. 1996. 5p.
- EGAN, M. D. **Concepts in Architectural Lighting**. New York: McGraw-Hill, 1983. p. 195-219.
- HOPKINSON, R.G.; PETHERBRIDGE,P.; LONGMORE,J. **Iluminação Natural**. 2.ed. Lisboa: C. Gulbenkian, 1975. p. 469-478
- IESNA, Illuminating Engineering Society of North America. **RP-5: Recommended Practice of Daylighting**. New York: IESNA, 1999. p. 16-9.
- MARDALJEVIC, J. **Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients**. 1999. 313 f. Tese (Doutorado). Leicester: De Montfort University. 2000
- MARSH, A. **Ecotect**. Square One, 2003.
- ROBBINS, C. L. **Daylighting: Design and Analysis**. New York: V. N. Reinhold, 1986. p. 221-234.
- SOUZA, R. V. G. **Daylighting Simulation: Pros and Cons**. In: PLEA 2001 – THE 18<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE. Florianópolis: novembro 2001. p. 197-201.
- UBBELOHDE, M.S.; HUMANN, C. **A Comparative Evaluation of Daylighting Software: SuperLite, Lumen Micro, Lightscape and Radiance**. In: INTERNATIONAL DAYLIGHTING CONFERENCE '98. Ottawa: 1998. p. 97-104.

## 9 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, CAPES e CNPq o apoio recebido para o desenvolvimento do projeto.