



DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA DE CONFECÇÃO DE MODELOS FÍSICOS PARA PREDIÇÃO E AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Eunice B. Rocha (1); Cynthia M. L. Santos (2); Teresa M. F. da Costa (2); Raquel Faraco (3)

(1) Departamento de Tecnologia da Construção (DTC), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Rio de Janeiro – FAU/UFRJ, Brasil, e-mail: eunicebomfim@fau.ufrj.br

(2) Arquiteta, Mestranda do PROARQ – UFRJ, Brasil

e-mail: c.marconsini@terra.com.br; tfragoso@infolink.com.br

(3) Arquiteta, Mestranda PEP/COPPE – UFRJ, Brasil, e-mail: rmfaraco@gmail.com

RESUMO

Modelos físicos de simulação da iluminação natural permitem fornecer informações sobre o desempenho do ambiente luminoso bem como sobre o desenho do sistema de iluminação proposto ou existente. Este artigo tem como finalidade fornecer uma metodologia de confecção e aferição de um modelo físico de simulação dos aspectos qualitativos e quantitativos da iluminação natural em um ambiente construído. O modelo físico aqui proposto tem como especificidade a reprodução dos aspectos reais do ambiente luminoso tais como geometria, cor, características transmissivas e reflexivas dos materiais e do entorno circundante. Admite-se que a máxima aproximação das características dos ambientes, real e modelado, depende do ajuste do modelo construído. O ajuste aqui realizado será feito por comparação dos resultados qualitativos (observação visual direta ou de imagens digitalizadas de registros fotográficos) e quantitativos (medidas com células fotoelétricas situadas em determinados pontos do modelo e do ambiente), obtidos nos meios luminosos de ambos os ambientes. O modelo será considerado validado quando os resultados obtidos estiverem dentro das margens de erro desejadas. A aferição do modelo possibilita a avaliação e aplicabilidade desta metodologia em futuros modelos físicos de simulação da iluminação natural.

Palavras-chave: Iluminação natural, modelos reduzidos, simulação lumínica

ABSTRACT

Physical models of daylighting simulation are commonly used to evaluate the performance of the luminous environment and the performance of proposed or existent lighting system designs. This paper intends to develop a construction and testing methodology for physical models of qualitative and quantitative daylighting simulation in built environments. Adjustments may be necessary to guarantee accurate and validate scale models. The physical model type chosen here reproduces the real aspects of the luminous environment such as geometry, colours, reflectance and transmittances of the materials and from the exterior environment. A validation test needs to include comparison of qualitative results (direct observation or digital photographic records) and quantitative (illuminance measurements using photometer sensors), from both scale model and the real full-scale room. To validate the model, results with acceptable divergence are needed. Checking the scale models allows methodology and applicability assessment for future daylighting lighting simulation studies.

Key words: daylighting, physical models, lighting simulation.

1. INTRODUÇÃO

A iluminação natural é um elemento chave em todo projeto de arquitetura bem sucedido. No entanto, a extrema complexidade do comportamento da luz natural acaba levando arquitetos a privilegiar a iluminação artificial, de controle mais fácil, negligenciando as qualidades intrínsecas da iluminação natural. (BODART et alli, 2004) .

O desempenho da luz natural no interior dos ambientes depende de vários fatores entre eles, a altura solar, a latitude, a orientação da edificação, o tipo de céu, as características do entorno, os elementos arquitetônicos como as esquadrias e os elementos de proteção solar, as características físicas do interior do ambientes, a refletância dos materiais.

Apesar da evolução dos programas de simulação computacional nos últimos anos, os modelos físicos reduzidos ainda representam o método mais utilizado para avaliação dos aspectos da iluminação natural no interior da edificação. (SCHILER, apud THANACHAREONKIT et alli, 2005)

O modelo físico reduzido é uma ferramenta bastante interessante no estudo da iluminação natural, pois permite reproduzir o efeito visual da luz no espaço real (BODART et alli, 2004). O que se vê dentro do modelo tanto sob céu real como sob céu artificial, é idêntico ao que se vê no espaço real. Não é possível reproduzir esta sensação visual de outra forma, nem mesmo pela modelagem virtual. O modelo possui ainda a vantagem de permitir estudos precisos com orçamentos pequenos, podendo-se ainda trabalhar com formas complexas.

Os modelos de iluminação natural se diferem pela finalidade a que se destinam. Podemos distinguir três tipos distintos de modelos utilizados para simulação da luz natural: modelo do exterior do edifício e de seu entorno, que tem a finalidade de investigar o percurso solar em relação ao edifício e ao meios circundantes; modelo do ambiente real para estudo das características de desempenho da luz natural na edificação, que tem a finalidade de investigar a penetração e distribuição da luz natural direta e difusa, níveis de iluminância, contraste e ofuscamento; e a maquete para estudo de aberturas individuais da edificação, que tem a finalidade a investigação do comportamento da luz em determinada abertura ou de elementos de proteção solar.

1. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo fornecer uma metodologia de confecção de um modelo físico para avaliação dos aspectos qualitativos e quantitativos da iluminação natural em um ambiente construído.

O modelo experimental proposto consiste em um modelo de simulação concebido para avaliar os aspectos qualitativos e quantitativos da luz natural no interior do ambiente, tanto por meio da observação visual direta e/ou de imagens digitalizadas de registros fotográficos dos ambientes, como por meio da fotometria do ambiente real e modelado. O modelo será considerado validado quando os resultados qualitativos e quantitativos obtidos estiverem dentro das margens de erro desejadas.

2. METODOLOGIA

2.1. Escolha do ambiente para simulação

Diante o objetivo do trabalho em questão – fornecer uma metodologia de confecção de um modelo físico de avaliação dos aspectos qualitativos e quantitativos da luz natural –, na escolha do objeto de estudo procurou-se levar em conta um ambiente com características volumétricas que facilitasse o transporte do modelo bem como a reprodução dos aspectos reais tais como geometria, cor, características transmissivas e reflexivas dos materiais e do entorno circundante.

Dentre os ambientes que preenchiam os requisitos anteriormente mencionados optou-se por tomar como objeto de estudo a sala de maquetes do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio de Janeiro, situado no Bloco D deste edifício (Figura 1).

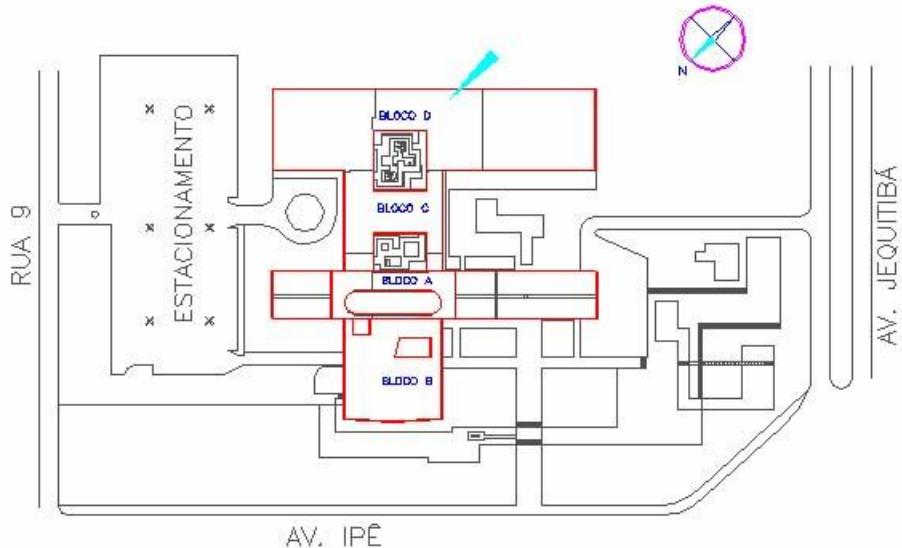


Figura 1-Planta de situação indicando a localização do Bloco D e a Fachada Sudeste onde localiza-se o Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da FAU UFRJ

O ambiente possui uma planta retangular e a iluminação natural provem de uma grande janela situada na fachada sudeste (Figura 2)

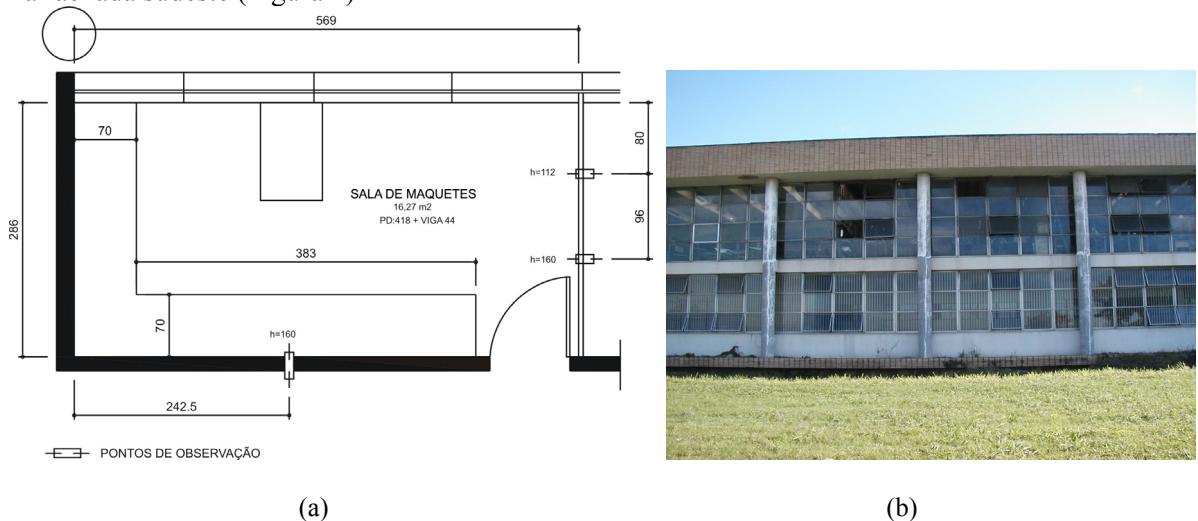


Figura 2-Planta baixa da Sala de Maquetes do Laboratório (a) e foto da Fachada Sudeste mostrando a configuração das janelas desta fachada.

2.2. Detalhes de construção do modelo físico reduzido.

A construção de uma maquete de iluminação destinada à avaliação do desempenho qualitativo de um sistema de iluminação natural tem exigências diferentes daquela destinada à avaliação do desempenho quantitativo desse sistema, distinguindo-se desta tanto pela maior quantidade de detalhes construtivos, como pela escala. Dessa maneira, a maquete proposta para este modelo experimental permitirá a avaliação com o mesmo grau de precisão tanto do desempenho qualitativo da iluminação como do desempenho quantitativo - cuja precisão pode ser obtida mesmo em maquetes grosseiras, as são inviáveis para estudos qualitativos.

Na confecção deste modelo, primeiramente, é de fundamental importância reproduzir fielmente as dimensões do ambiente real, na escala a ser adotada.

Existem alguns condicionantes, além daqueles voltados para a questão dos aspectos qualitativos e quantitativos da iluminação que determinam a escala do modelo. São eles: a) a largura mínima do ambiente a ser estudado; b) a altura mínima da maquete para se trabalhar com máquina fotográfica.

Para garantir a existência de área suficiente para a localização do equipamento fotográfico recomenda-se que o pé-direito da maquete (altura entre piso e teto) não seja inferior a 13cm. (BAKER et alli, apud ROCHA, E.B.)

Segundo ROBBINS (1987) para documentar e avaliar o modelo por fotografias a escala mínima é ditada de certa forma pelo equipamento utilizado. Geralmente o pé-direito da maquete deverá ser maior que 12,5cm para garantir altura suficiente para o equipamento e para manuseá-la dentro da maquete. Além disso, é necessário que a menor medida da maquete não seja inferior à 30cm (BODART et alli, 2004). De acordo com esses condicionantes e analisando as dimensões da sala a ser estudada definiu-se a escala 1/10, na construção da maquete.

O material a ser utilizado para a construção do modelo deve ser leve, de modo que o transporte do mesmo não seja dificultado. O material escolhido, portanto, para execução das paredes, foi o papel pluma com espessura de 0,5cm, que se caracteriza por ser um material extremamente rígido, porém leve. De modo a garantir a opacidade das paredes foram utilizadas, em cada face do modelo, duas peças de papel pluma colados com fita dupla face.

A fim de evitar penetração de luz exterior indesejável no modelo, deve-se garantir a perfeita vedação das juntas (Figura 3). Para isso foi criado um sistema de encaixe das paredes de papel pluma, fixados com alfinetes e por fim, vedados com fita isolante. O teto deve ser removível, para facilitar o manuseio das células fotoelétricas no interior da maquete.

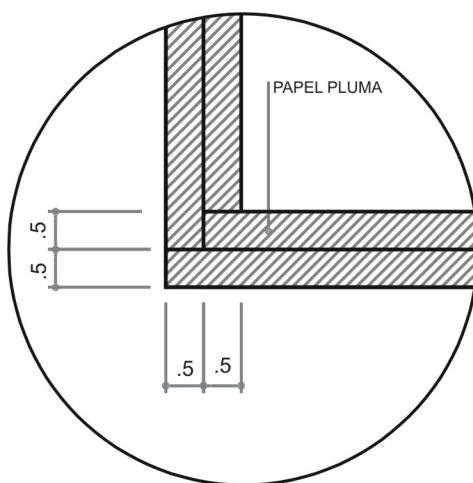


Figura 3 – Detalhe em planta do encaixe das paredes de papel pluma

Os pontos de observação também devem ser bem vedados quando os mesmos não estiverem sendo utilizados, para evitar a passagem de luz. Para isso foi criado um sistema de encaixe que garantisse a vedação do conjunto (Figura 4).

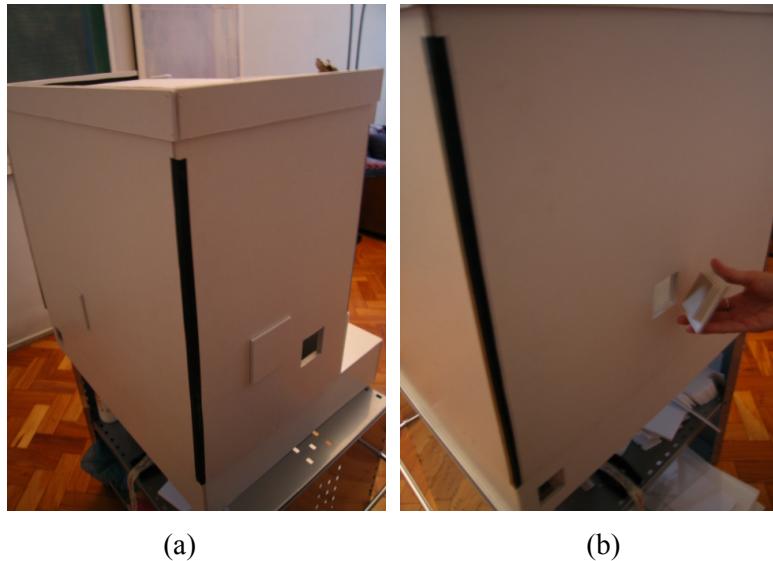


Figura 4 – Fotos dos fundos da maquete evidenciando os furos de observação e a vedação dos cantos com fita isolante (a) e o sistema de encaixe da tampa dos furos de observação (b).

Para reprodução da esquadria de alumínio, utilizou-se o papel pluma com pintura acrílica cinza. No local dos vidros optou-se por deixar os vãos abertos e utilizar um fator de correção em função da transmitância do vidro do ambiente real.

A reprodução do gradil existente também foi um ponto de difícil resolução, uma vez que na escala 1/10, a largura de cada haste possuiria 1,5mm, tornando inviável sua reprodução, uma vez que não foi possível encontrar no mercado material com tal espessura e rigidez necessárias para execução. Por isso optou-se por não reproduzi-la e adotar outro coeficiente de redução em função do fator de sombreamento do gradil.

Para escolha do revestimento interno das paredes da maquete é necessário o conhecimento das refletâncias dos materiais que compõem o ambiente real, pois os revestimentos do modelo devem possuir refletância o mais próxima possível do real, a fim de evitar discrepâncias nas simulações no modelo físico, quando comparado com o ambiente real.

Os materiais usados devem ter mesma cor, refletividade e texturas se forem utilizadas fotos coloridas. Para fotos em preto e branco, basta que sejam respeitadas refletâncias. (ROBBINS, 1987)

O laboratório de maquetes possui os seguintes materiais internos: a) Pastilha 2x2 cinza fosca, b)Cerâmica bege retangular fosca, c)Divisória em fórmica bege com estrutura em plástico preto, d)Pintura branca, e) Cerâmica retangular preta fosca, f)Vidro liso incolor e esquadria em alumínio natural, f)Gradil em ferro com pintura branca, g)Porta de madeira. Possui ainda os seguintes revestimentos externos: a) parede: pastilha cinza; b) calçada em cerâmica laranja.

Na presença de um luminancímetro a medição das luminâncias é extremamente fácil. Porém como não havia tal disponibilidade, foi adotado o método proposto por Robbins (1987) que consiste em determinar a razão da luz refletida pela luz incidente com o auxílio de um luxímetro. O valor da luz incidente na superfície é obtido colocando o fotômetro do luxímetro na superfície do material voltado para fora do mesmo, enquanto que para a obtenção do valor da luz refletida, o fotômetro deve ser colocado voltado para esta superfície, a aproximadamente 15 cm desta. A iluminação do material deverá ser feita com uma luz de fonte difusa. A precisão desse método tem sido de mais ou menos 10%. Seguindo estes passos foram encontrando os resultados conforme a Tabela 1.

Revestimento	Refletância	Papel	Refletância
Fórmica bege	61,57%	Color plus cinza claro	60,52%
Pastilha cinza	41,92%	Canson Gris Trianon	42,85%
Parede branca	78,26%	Ingres vidalon branco	80,48%
Parede cerâmica bege	33,55%	Papelão	32,25%
Piso cerâmica preta	14,28%	Color plus preto	17,39%
Piso calçada cerâmica laranja	27,69%	Canson Mi Tente marrom	24,42%

Tabela 1 – Refletância dos revestimentos internos do modelo real e do modelo reduzido

A fim de averiguar se as medições de refletância estavam corretas buscou-se como referência o trabalho de BODART et alli (2004) que apresenta uma relação de papéis encontrados comercialmente com as respectivas refletâncias. Esse trabalho estabelece para o papel Canson Gris Trianon, uma refletância de 40,41%, e para o papel Ingres Vidalon branco, uma refletância de 80,19%. Percebeu-se que os resultados encontrados aproximam-se dos resultados apresentados por BODART et alli (2004). Para a porta de madeira consegui-se utilizar no modelo o mesmo material existente no ambiente real.

Devido à dificuldade em encontrar no mercado papéis com refletância idêntica às refletâncias encontradas no ambiente real, buscou-se trabalhar com papéis com refletâncias o mais próxima possível das dos materiais reais.

3. AFERIÇÃO DO MODELO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A última fase deste estudo consistiu na aferição do modelo a fim de avaliar se o mesmo reproduzia as características do ambiente real. Para isso foram efetuadas medições tanto no modelo reduzido quanto no ambiente real, medindo a quantidade de iluminância presente em um dado ponto do modelo e do ambiente.

Foi adotado como ponto de medição a bancada situada próxima à janela. Para que a altura da fotocélula não se configurassem como um elemento passível de provocar erros de medição, foi efetuado um furo na mesa do modelo e a fotocélula foi posicionada alinhada com a base superior da bancada (Figura 5).



Figura 5 – Foto do detalhe de fixação da fotocélula na bancada do modelo reduzido vista lateral (a) e vista frontal (b).



(a)



(b)

Figura 6 – Foto do detalhe da localização do leitor do luxímetro durante as medições (a e b).

A localização do modelo durante as medições também é um fator que requer bastante cuidado. A fim de que tanto o ambiente real quanto o modelo reduzido recebessem a mesma quantidade de iluminação natural e possuíssem o mesmo fator de céu visível, o modelo reduzido foi posicionado na lateral do ambiente real, apoiado no parapeito da janela da sala de maquete (figura 7).



(a)



(b)

Figura 7. – Foto do posicionamento do modelo reduzido durante as medições (a) e foto aproximada do modelo reduzido (b)

A observação fotográfica foi realizada para verificar se a parcela de céu e grama visível entre modelo e ambiente real eram aproximadas. A observação confirmou essa proximidade (figuras 8, 9 e 10).



(a)



(b)

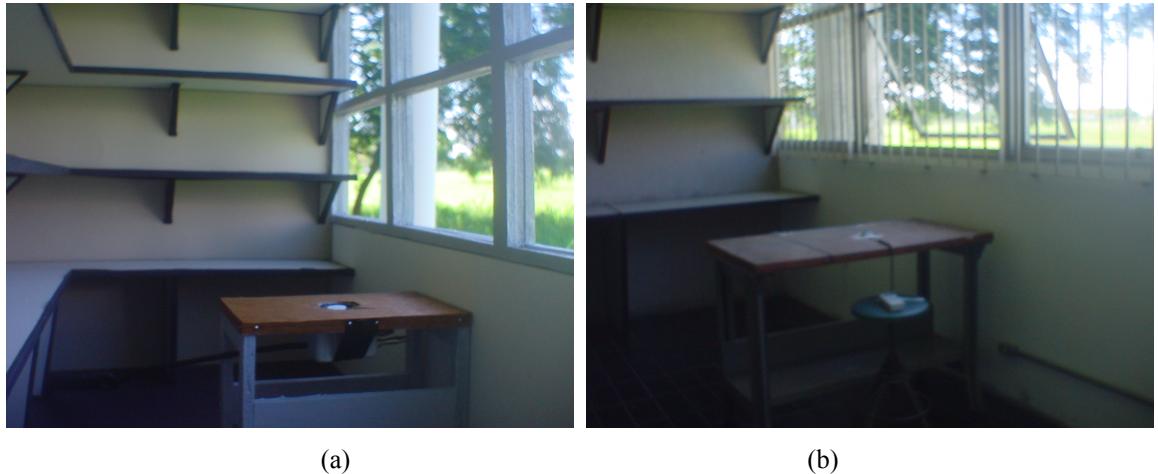
Figura 8. Registro fotográfico do modelo reduzido (a) e do ambiente real (b) realizado às 14:00hs do dia 10 de março de 2006



(a)

(b)

Figura 9. Registro fotográfico do modelo reduzido (a) e do ambiente real (b) realizado às 14:00 do dia 10 de março de 2006



(a)

(b)

Figura 10. Registro fotográfico do modelo reduzido (a) e do ambiente real (b) realizado às 10:00 do dia 13 de março de 2006

As medições de iluminância foram realizadas no dia 10 de março, sob condições de céu claro, no período de 10:00 as 17:00 horas (Tabela 2).

horas	céu	Er (ambiente real) - lux	Em (ambiente modelado) lux	100*(Er-Em)/Er %
10:00	claro	2560	3090	20,7
11:00	claro	2450	2940	20
12:00	claro	2250	2680	19
13:00	claro	2200	2610	18,6
14:00	claro	1640	1918	17
15:00	claro	1371	1590	16
16:00	Claro (neb.)	1119	1322	18
17:00	Claro (neb.)	845	988	17

Tabela 2. Medidas de iluminância no ambiente real e no ambiente modelado, realizadas no dia 10 de março de 2006

Os resultados encontrados indicam uma diferença máxima de 20,7% entre o modelo reduzido e o ambiente real, antes da aplicação dos fatores de correção relacionados à presença do vidro e o fator de sombreamento relacionado à presença da grade no ambiente real.

Foi calculado um fator de correção em função da presença do vidro e sujeira do mesmo no ambiente real, posicionando o fotômetro do lado de fora do vidro e seguidamente do lado de dentro do vidro a fim se avaliar a redução de iluminância devida à presença do vidro. Essa redução foi de 10,9% (tabela 3).

horas	céu	E chega no vidro - lux	E passa pelo vidro - lux	100*(Er-Em)/Er - %
16:00	Claro (neb.)	5060	4510	10,9

Tabela 3. Iluminância antes e imediatamente após o vidro, realizada no dia 10 de março de 2006

Com relação à presença da grade foi calculado um fator de sombreamento proporcionado pela junção de todas as hastes da grade que chegou a 11%.(Tabela 4)

Av (Área total de vidro)	Ag (Área total de grade)	Fator de sombreamento 100* (Ag/Av)
14,58m ²	1,74m ²	11,9%

Tabela 4. Cálculo do Fator de Sombreamento

Ao aplicar esse dois fatores aos valores encontrados no modelo reduzido e comparar as medições realizadas no modelo reduzido e no ambiente real, obteve-se uma diferença máxima de 10,5% e mínima de 6,8 (Tabela 5)

horas	céu	Er (ambiente real) - lux	Em (ambiente modelado) - lux	100*(Er-Em)/Er - %
10:00	claro	2 560	2385	6,8
11:00	claro	2 450	2269	7,4
12:00	claro	2 250	2068	8,1
13:00	claro	2 200	2014	8,4
14:00	claro	1 640	1480	8,7
15:00	claro	1 371	1227	10,5
16:00	Claro (neb.)	1 119	1020	8,8
17:00	Claro (neb.)	845	762	9,8

Tabela 5. Medidas de iluminância no ambiente real e no ambiente modelado com fator de correção

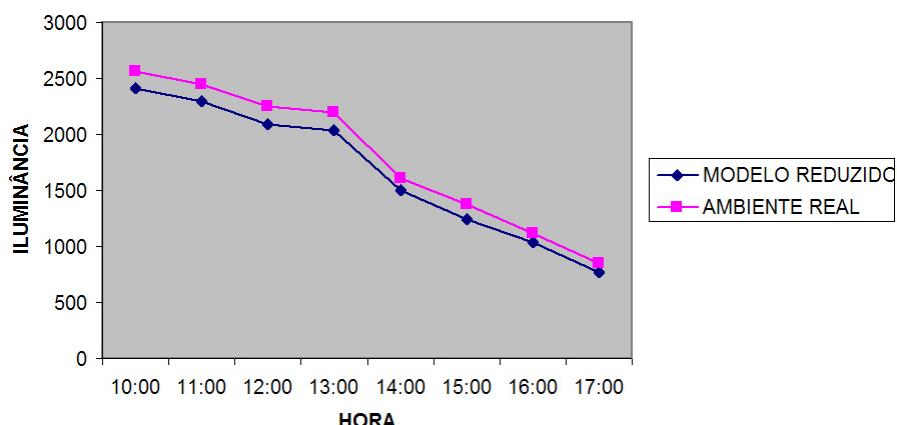


Gráfico 1. Gráfico das medidas de iluminância obtidas no modelo reduzido e no ambiente real, já descontados o fator de correção devido à ausência de vidro e o fator de sombreamento devido à ausência da grade no modelo reduzido.

As taxas de erro encontradas podem estar relacionadas a alguns fatores que devem ser mais cuidadosamente analisados em estudos futuros. São eles:

- a. **Cálculo da transmitância do vidro:** este cálculo foi feito tomando-se como ponto de referência apenas um pano de vidro da janela. É necessário que se verifique os demais panos de vidro da mesma.
- b. **Refletância dos papéis utilizados:** devido à dificuldade de encontrar no mercado papéis com refletâncias idênticas às dos materiais existentes no ambiente real, foram utilizados papeis com refletâncias parecidas. Essa diferença de refletância, apesar de pequena, contribuiu para a margem de erro.
- c. **Localização do modelo durante as medições:** o modelo deveria estar, durante as medições, com sua fachada alinhada com a fachada do ambiente real. Essa localização não foi possível, ficando o modelo ligeiramente mais à frente do ambiente real.

4. ESTUDOS FUTUROS

O modelo construído atende satisfatoriamente ao objetivo a que se destinada. A margem de erro encontrada (entre 6,8% e 10,5%) é considerada satisfatória. Porém novos estudos poderão ser realizados, procurando reduzir essa margem em virtude dos fatores anteriormente analisados. Portanto, algumas avaliações deverão ser efetuadas. São elas:

- a. Alteração dos materiais do modelo reduzido com a finalidade de avaliar o impacto das refletâncias nas medições realizadas no mesmo.
- b. Medições de iluminância em vários pontos do modelo reduzido e do ambiente real, através do posicionamento de uma malha de fotocélulas, a fim de avaliar se o padrão de distribuição de luz do modelo se aproxima do ambiente real.
- c. Mudança no posicionamento do modelo reduzido em relação ao ambiente real durante as medições a fim de avaliar o impacto gerado na margem de erro.
- d. Avaliação da qualidade e quantidade da iluminação em diferentes épocas do ano sob condições de céu real e artificial, tais como: junho: Céu nublado, Céu parcialmente nublado e Céu claro; março e setembro: Céu parcialmente nublado, Céu claro dezembro: Céu nublado Céu parcialmente nublado, Céu claro.
- e. Avaliação comparativa da qualidade da iluminação, com ênfase no ofuscamento, para o caso de inserção de monitores de computadores no ambiente real e modelado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ROBBINS, Claude. **Daylighting - Design & Analysis.** New York: VNR, 1986.

ROCHA, Eunice B. **Uma Metodologia De Avaliação Da Iluminação Natural Em Museus De Arte Com Modelos Físicos Em Escala Reduzida.** Cadernos do PROARQ nº 09. Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Arquitetura – UFRJ. 2005.

MAGALI, Bodart; ARNAUD, Deneyer; NELLY, Moenssens. **Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits.** Pour utilisation et mesures sous ciel artificiel au CSTB. Bélgica, Centro Scientifique et Technique de la Construction. 2004.

THANACHAREONKIT, A.; SCARTEZZINI, J.L.; ANDERSEN, M; **Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and teste modules.** Solar Energy 79. Lausanne, 2005.

6. AGRADECIMENTOS

As autoras desse artigo gostariam de agradecer aos estagiários Gabriela Silveira Bacharini e Tiago Castello Branco de Almeida, pela contribuição durante o levantamento das medições.