



## MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DE ILUMINÂNCIAS INTERNAS – DESENVOLVIMENTO – PARTE 1

**Roberta Vieira Gonçalves de Souza (1); Fernando Oscar Ruttkay Pereira (2)**

(1) Universidade Federal de Minas Gerais, R. Paraíba, 697 – Funcionários, BH/MG 30.130-140,  
Telefone: +31 3269 1851, fax: +31 3269 1822

E-mail: [roberta@arq.ufmg.br](mailto:roberta@arq.ufmg.br)

(2) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura, CTC, Campus  
Trindade, Florianópolis/SC +48 3319393.

### RESUMO

Este artigo descreve as etapas seguidas na construção de modelos matemáticos empíricos para o cálculo de iluminâncias internas e sua implementação em uma ferramenta desenvolvida em planilha eletrônica. O trabalho é parte do trabalho de tese da primeira autora (SOUZA, 2004) que visa identificar as variáveis mais influentes no processo de distribuição da luz natural em ambientes internos, e analisar sua inter-relação, o que foi feito através de regressões múltiplas de iluminâncias externas e internas, as últimas medidas em maquetes. Equações para a estimativa de iluminância difusa em plano horizontal externo,  $E_d$ , e para o cálculo de iluminâncias internas,  $E_i$ , foram posteriormente incorporadas em uma ferramenta simplificada de análise de níveis e de distribuição de iluminação natural para o projeto de edificações.

### ABSTRACT

This paper describes the methodology followed in the construction of empirical mathematical models to calculate internal illuminances and their implementation in a electronic sheet tool. This work is part of the thesis of the first author (SOUZA, 2004) and aims to identify the variables that most influence the internal daylight distribution process and also to analyse their interrelation, which was done through the use of multiple regression of measured and estimated variables. The developed equations for internal daylight estimative were afterwards incorporated in a electronic work sheet.

### 1. INTRODUÇÃO

O que a pesquisa aqui apresentada pretende é usar uma metodologia de obtenção de modelos empíricos para a análise do comportamento luminoso de ambientes internos, quando iluminados por luz natural. Modelos estes desenvolvidos a partir de um número limitado de variáveis, que descrevam com precisão aceitável o fenômeno da iluminação natural em ambientes internos. Este tipo de modelo poderá ser usado para avaliações iniciais do desempenho luminoso de sistemas de iluminação natural lateral, em ambientes de forma regular que possuam proporção entre área de abertura e área de piso entre 1/4 e 1/7, ou seja, uma relação entre área da janela e área das superfícies internas de 10 a 20%.

Buscou-se a identificação do peso de diversas variáveis, da edificação e do clima luminoso, no resultado final da distribuição e dos níveis de iluminação internos obtidos.

## **2. METODOLOGIA**

### **2.1 Metodologia para obtenção de modelos empíricos**

A metodologia aqui apresentada foi desenvolvida através da medição simultânea de iluminâncias internas e externas em maquetes para o desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para o cálculo de iluminâncias em ambientes internos. Esta metodologia foi inspirada em trabalho relatado por Givoni (GIVONI, 1999) em que o autor gera modelos empíricos para a avaliação de desempenho térmico de ambientes desenvolvidos a partir de medições de temperatura. Estas medições são realizadas simultaneamente no ambiente interno e externo da edificação, buscando-se a partir delas inter-relacionar as variáveis medidas de forma a melhor descrever o comportamento térmico do ambiente.

Neste trabalho fez-se a suposição de que esta metodologia composta do levantamento simultâneo de variáveis internas e externas ao ambiente luminoso possa ser desenvolvida para a caracterização de iluminâncias em ambientes internos iluminados naturalmente. Tal se explica pelo fato de que, assim como as condições térmicas internas são afetadas e podem ser descritas pelo estado de algumas variáveis do ambiente externo, mediadas pelo envelope da edificação (resultando nos processos de transferência de calor), as condições de iluminação natural interna também podem ser descritas pelas condições externas de iluminação, mediadas por algumas características da edificação, resultando no processo de admissão e distribuição da luz natural no ambiente interno.

Para a obtenção do resultado pretendido, a elaboração de modelos empíricos, a metodologia desta fase do trabalho foi dividida em três etapas:

- medição de valores de iluminância interna simultaneamente a dados de iluminância externa,
- delineamento das variáveis para desenvolvimento dos modelos,
- e método de geração de equações matemáticas.

### **2.2 Obtenção de dados**

Para a obtenção de dados de iluminação interna foram realizadas medições em maquetes, cujos valores medidos são tomados simultaneamente a valores de iluminação externa medidos pela Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis (SOUZA E PEREIRA, 2004). Os dados obtidos foram tratados estatisticamente de forma a avaliar as variáveis de maior influência ao fenômeno e descrevê-lo de forma mais adequada possível.

O modelo matemático desenvolvido não considera a componente refletida externa ou a componente de reflexão do piso.

### **2.3 Modelos em escala**

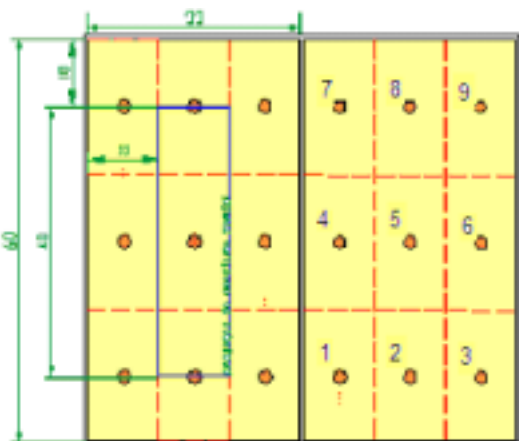
Para a análise da influência das variáveis internas e externas aos ambientes no nível final de iluminação natural obtido em um ambiente interno, foram construídas maquetes na escala 1:10, em que se variaram: o tamanho da abertura, a cor das superfícies internas e se fizeram medições simultâneas em nove pontos internos.

Foram construídas duas maquetes idênticas compostas por duas salas cada, com aberturas laterais intercambiáveis (ver da Figura à Figura 2.1). Para a obtenção dos dados de iluminação natural que servem de base para o desenvolvimento dos modelos matemáticos empíricos, cada sala recebeu pintura látex de refletividade diferente e cada uma das salas foi medida sob condições reais de céu, intercambiando-se as aberturas que correspondiam a 30% ou 50% da área da parede.

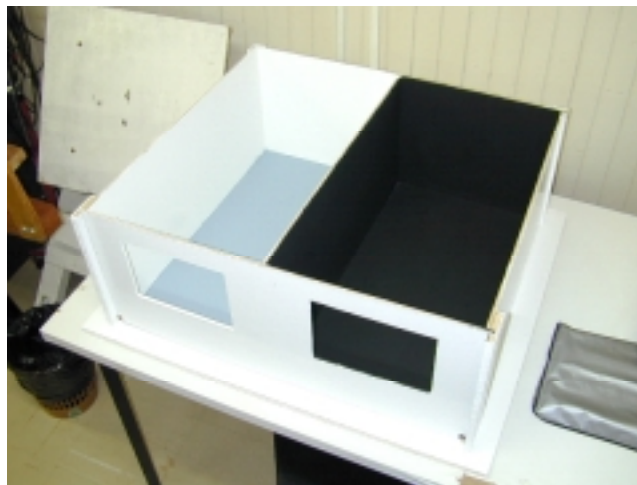
As maquetes representam salas com dimensões de 3,3 x 6,0 m com pé direito de 2,8 m, na escala de 1:10, sendo pintadas de tinta PVA branca, cinza clara, cinza escura e preto fosco, com refletividades de 0,73, 0,32, 0,17 e 0,07, respectivamente. Neste trabalho considera-se que a sala preta possui refletividade nula, apesar dela apresentar uma refletividade de até 7%. Tal procedimento visou caracterizar que a luz incidente nos sensores posicionados nesta sala seja proveniente apenas da

componente celeste, CC, ou seja, ela chega ao sensor vinda apenas da porção de céu vista a partir da janela.

Nas figuras 1 e 2 a seguir, mostram-se uma planta com a distribuição dos nove pontos de medição interna e uma foto da maquete. Os pontos 1, 2 e 3 são chamados pontos da frente; os pontos 4,5 e 6 são denominados pontos do meio e os pontos 7, 8 e 9 são os pontos do fundo, mais distantes da abertura.



**Figura 1 – Planta baixa do modelo em escala utilizado com dimensões e localização dos pontos de medição.**



**Figura 2.1 - Vista da maquete construída, mostrando o interior das salas branca e preta. Aberturas com 30% da área da parede (o piso da sala branca foi pintado de preto).**

As maquetes foram expostas ao céu real: claro, encoberto e parcialmente encoberto, buscando-se verificar a possibilidade da criação de um modelo genérico que pudesse caracterizar a dinâmica do ambiente frente a qualquer condição de céu. Foram feitas medições simultâneas às realizadas pela Estação de medição de Iluminação Natural de Florianópolis, EMIN-Floripa, tomadas minuto a minuto, ao longo dos anos de 2002, 2003 e 2004. As medições nos modelos foram realizadas no mesmo local onde está instalada a Estação, de forma a garantir a menor obstrução possível, com maior disponibilidade de luz natural.

## 2.4 Seleção de variáveis

A seguir descrevem-se as variáveis selecionadas para o uso na elaboração de modelos matemáticos para a descrição da iluminação natural em ambientes internos, iluminados por luz natural difusa. A luz solar direta foi excluída do estudo, uma vez que sua maneira de incidência, nível de iluminação e influência na distribuição de luz do ambiente são completamente distintas das proporcionadas pela luz difusa. Considera-se que a incidência de luz solar direta deve ser evitada em planos de trabalho e sua eliminação consiste num problema de geometria solar, mais que de iluminação natural. Crê-se, ainda, que a qualidade de iluminação natural de um ambiente possa ser “plenamente” verificada pela distribuição dos níveis de luz natural difusa, tanto em termos de distribuição quanto de níveis de iluminação obtidos.

Como o objetivo do trabalho desenvolvido foi o de encontrar um modelo simplificado de fácil aplicação, trabalhou-se com a conjugação de iluminância externa (que fornece a disponibilidade de luz) e azimute solar (que, ao dar a posição do sol em relação à abertura, fornece um indicativo da proporção da luz disponível na abóbada que pode chegar à abertura) e não com a distribuição de luminâncias de céu, embora tal procedimento pudesse obviamente induzir a uma menor precisão do modelo.

A qualidade da insolação direta de determinado ambiente interno deve ser avaliada em função do tipo de ambiente, limitando-se a admissão máxima de luz solar direta, com relação ao número de horas de insolação em função da época do ano e horário de incidência, e/ou delimitando planos que possam ou

que não possam ser atingidos por luz solar direta. Para tal deve-se adotar um procedimento de análise da geometria solar e não métodos de cálculo de níveis de iluminação natural.

### Variáveis climáticas externas

No desenvolvimento deste trabalho foi testada a influência de diversas variáveis relativas ao clima luminoso externo de forma a identificar aquelas que possuíssem influência mais marcada na determinação dos níveis internos de iluminação natural. As seguintes as variáveis foram selecionadas:

- Iluminância difusa horizontal externa,  $E_d$ .
- Iluminação vertical externa,  $E_v$  – Pressupõe-se que a iluminação vertical apresente melhores correlações com os níveis internos que a  $E_d$ , uma vez que diz respeito à meia hemisfera vista diretamente pela abertura do modelo. No entanto, como os modelos de  $E_d$ , possuem melhor correlação do que os modelos para iluminação difusa em superfícies verticais com os dados de Florianópolis, deu-se preferência a modelos que utilizem a variável horizontal.
- Azimute solar,  $\psi$
- Ângulo entre o sol e o centro da abertura (azimute do sol em relação à fachada),  $\psi_f$

### Variáveis do modelo físico

Com relação ao ambiente físico, aqui representado por maquetes, buscou-se identificar o peso de diversas variáveis no nível final de iluminação interna obtido, quais sejam:

- Refletância média das superfícies internas,  $\rho$
- Fator de forma da abertura para entrada de luz, relativo a cada ponto de observação,  $FF$ , calculado pelo método de projeção em hemisfera unitária, como descrito por SOUZA (1997).
- Fator de forma das demais superfícies (paredes),  $FF_p$ , aqui tomado simplificado como  $FF_p = 1 - FF$ , quando as paredes e o teto apresentam refletância média única.
- Ângulo sólido de visão da abertura para entrada de luz, corrigido para o plano horizontal, relativo a cada ponto de observação,  $\Omega'$ . Esta variável foi proposta como substituição dos fatores de forma de obtenção mais complexa. A fórmula adotada para seu cálculo foi:

$$\Omega' = (A / d^2) \cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3 \quad \text{Eq. 01]}$$

Os ângulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$ , são respectivamente os ângulos horizontal e vertical que o plano normal de visão do ângulo sólido fazem com a superfície vertical (a abertura) e o ângulo entre a normal ao sensor e o centro da janela. Para janelas muito extensas ou para pontos muito próximos à abertura, deve-se proceder ao cálculo do ângulo sólido subdividindo-se a janela em sessões de forma a se evitar desvios no cálculo desta variável.

- Ângulo entre a normal do ponto considerado e o centro da janela,  $Z_i$

## **3. RESULTADOS OBTIDOS**

### **3.1 Cálculo da Iluminância interna, $E_i$**

O cálculo da iluminância interna do através do método do fluxo dividido é feito pela somatória das componentes celeste, refletida interna e refletida externa, esta última não tendo sido levada em consideração no presente trabalho.

A componente refletida interna representa um acréscimo devido à reflexão da luz que entra pela abertura nas superfícies internas do ambiente. Neste trabalho, o valor obtido para a componente refletida interna, CRI, foi estimado não como um valor a ser somado à componente celeste, CC, mas como sendo um fator percentual de ganho devido à reflexão interna que pudesse posteriormente ser multiplicado à componente celeste. A expressão matemática para a  $E_i$  fica então:

$$E_i = CC_{abs} \cdot CRI \quad (\text{lux}) \quad \text{[Eq. 02]}$$

Foram obtidas equações distintas para o cálculo da CC e para o cálculo da CRI. Estas equações são multiplicadas e desta forma obtém-se o resultado final para o cálculo da iluminação interna. Aqui são apresentadas duas equações para cada tipo de céu: uma que leva em conta a variável “fator de forma”, FF (que deve ser calculado graficamente), e outra que leva em conta o ângulo sólido,  $\Omega'$ .

Foram desenvolvidas as seguintes equações para o cálculo da CC e da CRI para as condições de céu claro e de céu encoberto, apresentadas com seus correspondentes coeficientes de correlação múltipla, r. Não se encontrou boa correlação entre as variáveis para céus intermediários, com o que não foram desenvolvidas equações para este tipo de céu.

#### Céu claro

**Tabela 1 – Equações para a CC e para a CRI para céu claro.**

Componente celeste (lux)	r	Componente Refletida interna (%)	r
$CC_{cl} = 0,33 E_d^{0,93} FF^{0,55} e^{(0,21 \text{ sen}Zi - 0,13 \text{ cos}\psi_i)}$ [Eq. 03]	0,958	$CRI_{cl} = 1,78 E_d^{0,08} FF^{-0,11} \rho^{0,64} e^{(0,14 \text{ sen}Zi)}$ [Eq. 05]	0,930
$CC_{cl} = 0,90 E_d^{0,73} \Omega'^{0,63} e^{(0,23 \text{ sen}Zi + 0,05 \text{ cos}\psi_i)}$ [Eq. 04]	0,949	$CRI_{cl} = 3,14 E_d^{0,06} \Omega'_p{}^{3,4} \rho^{0,67} e^{(0,02 \text{ sen}Zi)}$ [Eq. 06]	0,954

#### Céu Encoberto

**Tabela 2 – Equações para a CC e para a CRI para céu encoberto.**

Componente celeste (lux)	r	Componente Refletida interna (%)	r
$CC_{en} = 1,01 E_d^{0,74} FF^{0,82} e^{(0,16 \text{ sen}\psi_f - 0,18 \text{ cos}\psi_f)}$ [Eq. 09]	0,945	$CRI_{en} = 1 + 0,48 E_d^{0,23} FF_p^{4,36} \rho^{0,54} e^{(0,05 \text{ sen}Zi)}$ [Eq. 11]	0,920
$CC_{en} = 1,63 E_d^{0,68} \Omega'^{0,79} e^{(0,11 \text{ sen}\psi_f - 0,29 \text{ cos}\psi_f)}$ [Eq. 10]	0,960	$CRI_{en} = 2,16 E_d^{0,06} \Omega'_p{}^{3,50} \rho^{0,25} e^{(-0,06 \text{ sen}Zi)}$ [Eq. 12]	0,859

#### Avaliação estatística dos modelos para o cálculo de $E_i$

Quando é feita a avaliação dos modelos para o cálculo de  $E_i$  (multiplicação dos modelos para o cálculo de CC e CRI), encontram-se os seguintes desvios, apresentados nas Tabela 5 céu claro e céu encoberto.

Os valores calculados foram comparados aos valores medidos de iluminância interna horizontal,  $E_i$  para as condições de céu claro e encoberto, de dados medidos ao longo dos anos de 2002, 2003 e 2004 e seu desempenho é mostrado a seguir. Para determinar a precisão dos modelos desenvolvidos ao longo deste trabalho, foram utilizados como indicadores estatísticos o desvio médio MBD (Mean Bias Deviation),

$$MBD = \sum(y_i - x_i)/n \quad [\text{Eq. 07}]$$

e o desvio quadrático médio RMSD (Root Mean Square Deviation),

$$RMSD = [\sum(y_i - x_i)^2/n]^{1/2} \quad [\text{Eq. 08}]$$

onde  $y_i$  é o valor estimado,  $x_i$  é o valor medido e  $n$  é o número de medidas consideradas.

O MBD indica a tendência do modelo à subestimação ou superestimação, conforme seu sinal, sendo o seu valor ideal zero. O RMSD nos oferece uma medida de desvio dos valores previstos pelos modelos em relação aos valores medidos. É um valor sempre positivo e quanto mais próximo do valor zero, maior a precisão do modelo. Nas tabelas deste trabalho os valores de RMSD e de MBD foram expressos como porcentagens do valor médio experimental.

**Tabela 5 - Indicadores estatísticos para o cálculo de  $E_i$  sob céu claro e céu encoberto.**

Ponto	Céu Claro				$E_i$ médio (lux)	Céu Encoberto				$E_i$ médio (lux)
	Equ.03 x Equ.05		Equ.04 x Equ.06			Equ.09 x Equ.11		Equ.10 x Equ.12		
	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)		RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	
Todos	31,77	6,02	35,10	-12,05	739	34,78	7,2	32,94	4,71	1.646
Frente	20,61	-6,31	27,29	-17,94	1.387	23,77	1,25	22,11	-2,99	3.711
Meio	40,05	21,02	39,25	-2,39	578	46,66	32,49	48,26	35,10	971
Fundo	51,28	27,07	38,79	-6,24	324	65,33	25,64	66,78	33,74	249

Pela Tabela 5 nota-se, que para a **condição de céu claro**, realmente que os desvios no cálculo da iluminância interna são relativamente “altos”, o que já era de se esperar dados os já “altos” desvios encontrados anteriormente no cálculo da componente celeste, CC. Os RMSD para todos os pontos obtidos na avaliação da CC para céu claro giraram em torno de 29 a 32%, enquanto os RMSD para a obtenção da CRI ficaram entre 11 e 14%. Os desvios obtidos no cálculo da  $E_i$  por sua vez giraram em torno de 31 a 36%, o que indica que a utilização conjunta dos dois tipos de modelo apresentou uma boa aderência, e um aumento do desvio não muito elevado, ficando os RMSD para todos os pontos pouco superiores àqueles apresentados para o cálculo da CC.

Outro fato que cumpre destacar aqui é uma tendência ao aumento dos desvios à medida em que se afasta da abertura com sobre-estimações também crescentes. Isso indica que os modelos tendem a fornecer valores maiores que os medidos no fundo da sala. Tal fato é em parte explicado pela tendência diferenciada na distribuição interna dos níveis de iluminação apresentada por ambientes com maior e menor refletividade.

Nos ambientes de maior refletividade há uma tendência à uma maior “uniformização” das iluminâncias, enquanto em ambientes mais escuros, há uma marcante diminuição dos níveis de iluminação à medida em que se afasta da abertura. Esta proporção de diminuição dos níveis pode ser tão pequena quanto 1/3 nos ambientes de cores claras (p. ex.: de 3.000 para 1.000 lux) e tão grande quanto 1/12 nos ambientes de cores médias e escuras (p.ex.: de 1.800 para 150 lux). Como as equações propostas, tanto para céu claro quanto para céu encoberto representam um comportamento médio do fenômeno, pontualmente é bastante normal que grandes desvios sejam encontrados.

Este modelo é o que apresenta menor RMSD, pouco superior a 30% quando todos os pontos são considerados conjuntamente e bastante melhor estimativa da luz próxima à abertura, com um RMSD de 20% e pequena subestimação contra RMSDs da ordem de 28% com subestimações acima de 17% dos demais modelos. Este modelo no entanto é o que apresenta pior estimativa dos níveis no fundo da sala, com sobrestimação de 27% e erro quadrático médio superior a 50%.

Os resultados finais para o cálculo da  $E_i$  sob **condição de céu encoberto** apresentam desempenho estatístico semelhante ao dos modelos desenvolvidos para céu claro, com RMSD entre 31 e 35%, à exceção do modelo dado pela Equação 5.30, quando todos os pontos são considerados simultaneamente (para céu claro estes RMSD variaram de 31 a 36%). Novamente há uma forte tendência ao aumento do desvio e da sobre-estimação dos valores à medida em que se afasta da abertura de iluminação natural. Acredita-se aqui que não somente a diferença na variação entre os níveis de iluminação próximos e afastados da janela quando salas de cores claras ou mais escuras são consideradas (neste caso, com 1/20 em ambientes escuros – p. ex. 3.100 lux para 150 lux – e 1/9 em ambientes claros – p.ex. 2000 para 220 lux), mas também a já citada diferença no brilho do céu que

produz iluminâncias que vão de 5.000 a 50.000 lux, sejam as responsáveis pelos altos desvios encontrados. Mudanças na distribuição externa da luz irão afetar diferentemente a distribuição da luz no ambiente interno. Abóbadas escuras, com horizontes pouco luminosos tendem a levar pouca luz em profundidade nos ambientes internos, enquanto abóbadas extremamente brilhantes, com distribuição mais uniforme tendem a levar mais luz em profundidade para os ambientes. E novamente ressalta-se que, como os modelos são desenvolvidos levando em conta o comportamento médio do fenômeno, tanto em termos da componente celeste quanto da luz que se distribui internamente no ambiente, altos desvios podem ser esperados quando os valores médios calculados pelas equações propostas são comparados a valores instantâneos medidos.

### 3.2 Limitações do modelo

Os modelos de CRI propostos são válidos para ambientes cujas proporções são semelhantes às preconizadas em dispositivos construtivos, para ambientes de permanência prolongada, ou seja, próximas 1/6, da área do piso, tendo sido desenvolvidos a partir de ambientes com proporção de 1/4 e 1/7 da área do piso. Este tipo de ambiente, com pé direito de 2,80m, terá uma razão entre a área de janela e área de superfícies internas de 10% a 20%.

- Em ambientes cuja área de superfícies internas for muito pequena em relação à abertura (por exemplo, uma estufa de vidro), a CC terá peso muito maior que a refletividade das superfícies internas e a  $CRI_{abs}$  poderá ser considerada desprezível em relação a esta componente.
- Ambientes cuja área de superfícies internas for muito grande em relação à abertura (por exemplo, um estádio) tenderão a apresentar  $CRI_{abs}$  também desprezível, uma vez a luz incidente no ambiente tenderá a ser totalmente absorvida pelas superfícies antes que possa atingir novamente determinado ponto interno. Este tipo de ambiente possuiria comportamento semelhante ou próximo ao de uma “cavidade negra” que absorve toda energia (luz) nela incidente.

As equações para a estimativa da CRI desenvolvidas neste trabalho não contemplam este tipo de situação, e sim um comportamento da refletividade em ambientes considerados ‘usuais’ como salas de aula, dormitórios, escritórios.

## 4. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE $E_I$

É senso comum que em iluminação natural pode-se esperar encontrar altos desvios entre modelos de cálculo e valores instantâneos medidos. Tal deve-se em alto grau à conhecida variabilidade da luz natural. A conjunção da posição do sol e do turvamento da atmosfera - presença de vapor d’água e de nuvens em suas diversas formas – faz com que haja infinitas variações na luz disponível para iluminar os ambientes internos. Esta variação traz conseqüentemente um alto grau de imprevisibilidade para a estimação dos níveis de iluminância internos. No entanto, não podemos nos ater às limitações, e, sim, seguir propondo métodos que nos permitam conhecer melhor o fenômeno e estimar com confiabilidade suficiente o desempenho luminoso de ambientes.

O método de cálculo proposto neste trabalho visa fornecer, de forma bastante descomplicada, níveis de iluminância em ambientes internos para avaliações expeditas da qualidade luminosa do ambiente interno. Mais que grande precisão no cálculo, a ferramenta visa criar um melhor entendimento do fenômeno e das variáveis que nele atuam. Os valores de iluminância interna fornecidos por este método foram comparados a valores medidos e a valores fornecidos por outros métodos propostos para o mesmo fim, de forma a verificar sua viabilidade de aplicação. Buscou-se comparar o método matemático aqui proposto a dois outros tipos de método: um gráfico e outro computacional, que, graças à tecnologia moderna, consegue resolver o fenômeno de trocas de radiação entre superfícies (através do método da radiosidade) com precisão bastante elevada. Como método gráfico foi selecionado o DCRL, desenvolvido pela autora em seu trabalho de mestrado (SOUZA, 1997) e ora componente do projeto de norma 02:135.02-003 da ABNT (2003, B). Como programa computacional foi selecionado o Lightscape 3.1, programa extensamente avaliado.

Encontraram-se diferentes tipos de desvio dos valores medidos e estimados em cada método, de acordo com a situação considerada, não sendo os desvios do método ora proposto considerados

maiores que os das outras duas ferramentas avaliadas. Considera-se que dois tipos de ajuste possam ser feitos: a proposição de índices de correção para a diminuição dos valores obtidos no fundo dos ambientes para salas de refletividade baixa e média ou a proposição de equações distintas para o cálculo da CRI em ambientes de refletividade alta e baixa.

Os resultados destas comparações dos três métodos serão apresentados em trabalho complementar a este.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho trouxe o desenvolvimento matemático de modelos matemáticos obtidos empiricamente para o cálculo de iluminâncias em plano horizontal de ambientes internos a partir de valores medidos experimentalmente em modelos em escala.

Foram desenvolvidos modelos para céu claro e céu encoberto, uma vez que as variações da iluminância interna registradas sob céus intermediários não permitiram a sua adequada representação através da ferramenta proposta.

Os modelos foram desenvolvidos usando um número reduzido de variáveis para a estimação do nível de iluminância horizontal em ambientes internos: como variáveis externas usou-se, o azimute solar em relação à fachada,  $\psi_f$ , o nível de iluminância externa, representado pela iluminância difusa horizontal,  $E_d$ , ou pela iluminância difusa vertical sul,  $E_s$ . Como variáveis internas usou-se a relação de troca de radiação entre a janela e o ponto dado pelo Fator de Forma, FF, ou pelo ângulo sólido corrigido,  $\Omega'$ , pela variável de localização do ponto em relação à abertura,  $Z_i$ , denominado ângulo interno e pela refletividade interna média das paredes vistas pelo ponto horizontal (acima do plano de trabalho),  $\rho$ .

O processo de elaboração dos modelos matemáticos baseou-se no método de divisão do fluxo, que forneceu resultados mais adequados do que quando a iluminação foi entendida como um fenômeno único. As equações desenvolvidas para os modelos foram obtidas através de regressão múltipla do grupo de variáveis consideradas em cada caso e a seleção das variáveis mais significativas em cada situação foi feita por seleção passo a passo, usando-se o programa Statgraphics 5.1.

Na avaliação estatística dos modelos propostos encontraram-se desvios RMSD de 21 a 42% quando todos os pontos foram analisados simultaneamente, conforme o tipo de céu considerado e conforme a combinação de variáveis em cada equação analisada. Quando o desempenho dos modelos foi analisado em função da posição do ponto no ambiente interno encontrou-se que os desvios tendem a ser maiores à medida que se afasta da abertura de iluminação natural, com forte tendência à sobre-estimação dos valores estimados.

Os resultados obtidos pela aplicação do método de cálculo matemático aqui proposto foram então comparados aos de outros dois tipos de método de estimação de iluminâncias internas para verificação da validade da ferramenta proposta. Verificou-se que todos os métodos apresentam desvios relativamente altos com relação a valores medidos e que os desvios apresentados pelas equações aqui propostas não são maiores que os apresentados pelos dois outros métodos avaliados.

Considera-se, no entanto, que estas equações sejam válidas e passíveis de ser usada como instrumento para a estimação de níveis de iluminância em ambientes internos de forma retangular, guardadas as proporções entre abertura e superfícies internas de 10 a 20%, sem que haja distorções demasiado grosseiras. Este tipo de ambiente contempla ambientes como escritórios, salas, salas de aula, dormitórios, etc.

## 6. AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho não seria possível sem o fomento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, dado através de bolsa PICDT e bolsa sanduíche, concedidas à primeira autora, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que financiou a montagem da Estação EMIN, e do apoio instrumental e computacional do Laboratório de Conforto Ambiental LABCON/UFSC.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT/CB-02, Projeto 02:135.02-002: *Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil, Agosto de 2003,
- GIVONI, B. (1999) “*Minimum climatic information needed to predict performance of passive building in hot climates*”, PLEA99, Conference on Passive Low Energy Architecture 1999, Edited by Steven Szokolay,. pp 197- 204.
- SOUZA, R. V. G. (1997), *Iluminação Natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas – desenvolvimento de ferramentas simplificadas*, Dissertação de mestrado - CPGEC, CTC - UFSC, Florianópolis.
- SOUZA, R. V. G. (2004) *Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a caracterização dos fenômenos de iluminação natural interna e externa*. Tese de doutorado, PPGEC, CTC/UFSC, Florianópolis.
- SOUZA, R. V. G.; PEREIRA, F. O. R. (2004) *Primeira estação de medição de iluminação natural em território Brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento*, Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 79-94.