

Método para caracterização do comportamento luminoso de aberturas com elementos de controle solar

Method for characterizing the daylight performance of windows with solar control devices

Amilcar José Bogo
Fernando Oscar Ruttkay Pereira
Anderson Claro

Resumo

A avaliação da admissão de luz natural através de aberturas com elementos de controle solar (ECS) não é uma tarefa simples, uma vez que a adição de obstáculos junto à abertura modifica a quantidade e a direção da luz natural transmitida. O principal objetivo deste trabalho é definir um método para a caracterização do comportamento luminoso de aberturas com ECS, produzindo informações sobre o fluxo luminoso resultante e sua distribuição espacial. O método baseia-se na definição de um modelo virtual análogo ao goniôfotômetro, equipamento utilizado em estudos fotométricos laboratoriais. A proposta foi implementada por meio de um programa de simulação computacional do comportamento da luz natural, APOLUX 1.0. Os parâmetros de análise foram o fluxo luminoso admitido e a luminância equivalente da abertura voltada ao ambiente interno, caracterizando sua distribuição espacial. O estudo foi realizado com diferentes tipos de ECS, horizontais e verticais. Os resultados obtidos permitem apontar o método desenvolvido como bastante satisfatório para os objetivos propostos, apresentando também vantagens em relação aos métodos experimentais de laboratório, como menor tempo de análise, menor custo e facilidade de acesso à maioria dos pesquisadores.

Palavras-chave: Iluminação natural. Fluxo luminoso. Aberturas. Elementos de controle solar.

Amilcar José Bogo
Laboratório de Conforto
Ambiental - LACONFA,
Departamento de Arquitetura e
Urbanismo
Universidade Regional de
Blumenau - FURB
Rua Antônio da Veiga, 140
Victor Konder, Blumenau - SC -
Brasil
Caixa Postal 1507
CEP 89012-900
Tel.: (47) 3321-0273
E-mail: arqbogo@furb.br

**Fernando Oscar Ruttkay
Pereira**
Laboratório de Conforto
Ambiental - LabCON,
Departamento de Arquitetura e
Urbanismo, Centro Tecnológico
Universidade Federal de Santa
Catarina
Tel.: (48) 3721-7080
E-mail: feco@arq.ufsc.br

Anderson Claro
Laboratório de Conforto
Ambiental - LabCON,
Departamento de Arquitetura e
Urbanismo, Centro Tecnológico
Universidade Federal de Santa
Catarina
E-mail: ander@arq.ufsc.br

Abstract

The evaluation of daylight admission through windows with solar control devices is not an easy task, once the addition of elements beside the window modifies the amount and direction of transmitted daylight. The aim of this study is to define a method for assessing the daylight behaviour of fenestration with different types of solar control devices, producing information about the resultant luminous flux and its spatial distribution. The method is based on the definition of a virtual model analogous to a goniophotometer, equipment used in laboratory for photometric studies. The proposal was implemented through a daylight computer simulation program, APOLUX 1.0. The analysis parameters were the admitted luminous flux and the window equivalent luminance turned to the inside, characterizing the incoming flux spatial distribution. The study was developed with different types of solar control devices, horizontal and vertical ones. The results suggest that the method is adequate for the proposed objectives, and also has some advantages in relation to laboratory experimental methods, such as a shorter analysis time, reduced cost and accessibility to most researchers.

Keywords: Daylighting. Luminous flux. Windows. Solar control devices.

Recebido em 11/08/08
Aceito em 21/08/09

Introdução

A quantidade de luz natural transmitida através dos vidros varia segundo suas propriedades ópticas de transmitância (τ), refletância (ρ) e absorvância (α), definidoras das parcelas de energia radiante transmitida, refletida e absorvida nos envidraçados, que influenciam na quantidade de energia térmica admitida ao interior das edificações.

Segundo Mccluney (1987), as propriedades de transmitância, refletância e absorvância são influenciadas pela direção de incidência sobre o material e para cada comprimento de onda de radiação.

Na Figura 1, é ilustrado esse comportamento segundo as parcelas transmitida, absorvida e refletida.

Para aberturas simples, sem obstáculos ou elementos de controle, a estimativa da luz natural transmitida pode ser uma tarefa fácil, dependendo principalmente da transmitância do vidro e do ângulo de incidência da luz. Entretanto, a adição de obstáculos junto à abertura, como os elementos de controle solar, pode modificar a trajetória da luz

natural transmitida, assim como sua quantidade, afetando significativamente a iluminação natural no interior das edificações. Essa influência ocorre devido aos múltiplos processos de reflexões entre os elementos de controle solar.

Em vista disso, diferentemente de uma abertura somente com vidro incolor comum, que transmite luz para o ambiente interno em determinada direção, de acordo com a situação de incidência externa (Figura 2a), uma abertura com diferentes tipos de obstruções, como os elementos de controle solar (Figura 2b), transmite luz em diferentes direções, em função das parcelas transmitidas de forma direta, por reflexão primária ou por múltiplos processos de inter-reflexões, até o interior dos ambientes.

Neste trabalho é apresentado um método para estimativa da quantidade de luz admitida (fluxo luminoso) e sua distribuição espacial interior (luminância equivalente), através de janelas com elementos de controle solar, visando à caracterização de seu comportamento luminoso.

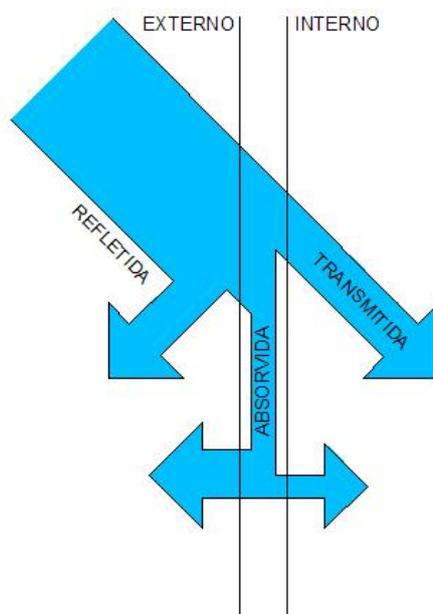
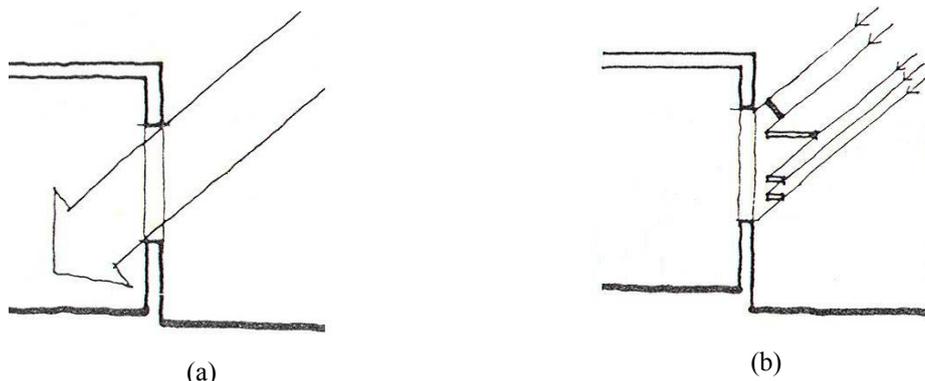


Figura 1 - Radiação solar incidente num vidro e as parcelas transmitida, refletida e absorvida



Fonte: adaptado de Bittencourt (1988)

Figura 2 - Incidência de luz natural em dois tipos de aberturas de uma edificação

Revisão bibliográfica

A avaliação da luz natural admitida através de aberturas de geometria complexa e/ou com elementos de controle solar (ECS) pode ser realizada por meio de métodos caracterizadores do comportamento luminoso de aberturas. Nesses métodos, a abertura como fonte de luz é tratada de maneira complexa devido a suas características, como um plano radiante assimétrico de luz em função das obstruções existentes, como os elementos de controle solar que alteram a trajetória da luz para o ambiente interno em certa quantidade e numa distribuição espacial variada.

Para determinar essa variação quantitativa e a respectiva distribuição espacial da luz admitida para o interior, necessita-se conhecer o comportamento radiante ou luminoso da abertura, em que a admissão da luz para o ambiente interno sofre um conjunto de intervenções (obstruções, reflexões).

Assim como são utilizados diversos tipos de goniofotômetros para caracterizar o comportamento luminoso (quantidade e distribuição espacial) de lâmpadas, pode-se também adotar variações desses tipos de equipamentos para conhecer o comportamento luminoso de sistemas de aberturas complexos, sendo a abertura considerada como a fonte de luz de análise, de modo análogo à situação das lâmpadas.

Para a caracterização luminosa das aberturas com diferentes tipos de ECS que influenciam na admissão da luz natural para o ambiente interno, podem ser adotados os métodos experimentais de laboratório, no qual, por meio de instrumental próprio, a luz transmitida pela abertura é determinada, possibilitando inclusive a certificação de janelas com diferentes tipos de vidros. Para aberturas com elementos de controle

solar, é necessária a reprodução adequada do tipo de proteção solar a ser ensaiado, ou ainda um modelo em escala reduzida.

Visando atender a esse objetivo, pode-se citar o radiômetro escaneador direcional, que utiliza a esfera integradora (scanning radiometer ou direcional radiometric scanner) e que foi desenvolvido no Lawrence Berkeley Laboratory, em 1981, para medir a transmitância e a refletividade direcional da luz em janelas e seus componentes (KESSEL; SELKOWITZ, 1984). Esse equipamento consiste numa esfera integradora para medição do fluxo radiante ou térmico total transmitido que afeta a iluminação natural e o desempenho térmico do sistema de aberturas, apresentado na Figura 3.

Esses autores citam que o uso da esfera integradora serve para determinar a transmitância hemisférica direcional de materiais envidraçados, sistemas de aberturas (incluindo complexos sistemas de sombreamento). Com uma simples medição da iluminância interior, a esfera integradora proporciona informações equivalentes ao somatório de medições de muitas luminâncias devido ao hemisfério no qual se está testando a transmitância. Historicamente, a esfera foi usada pela primeira vez na medição do fluxo luminoso de saída de lâmpadas analisadas em seu interior. Independentemente da distribuição espacial do fluxo vindo da lâmpada, a iluminância na esfera é proporcional ao fluxo total, e é possível comparar seu valor com o de uma fonte de referência.

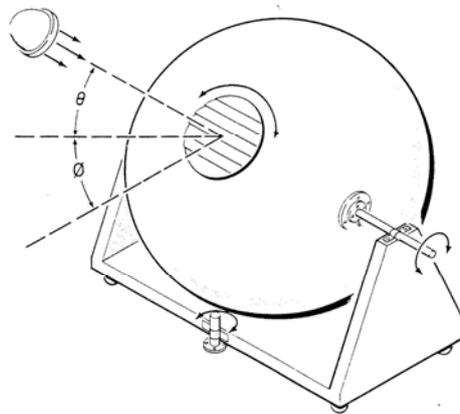
Papamichael, Klems e Selkowitz (1988) afirmam que, para sistemas de aberturas simples, com uma ou mais camadas de vidro claro, pintado ou pigmentado, em que os principais efeitos ópticos são a absorção, a transmissão unidirecional e a reflexão especular, procedimentos normalizados de cálculo, baseados em medições fotométricas de propriedades ópticas de materiais, são

adequados para a determinação da transmissão solar; para esses sistemas, existem programas computacionais para cálculo dos níveis internos de iluminação.

Os autores afirmam ainda que, para situações com venezianas, persianas, cortinas nas quais a transmitância difusa e/ou a reflexão espacial são heterogêneas e são usadas para controle do ganho de calor solar e níveis de iluminação, os procedimentos normalizados à época para a determinação da transmitância solar não eram adequados

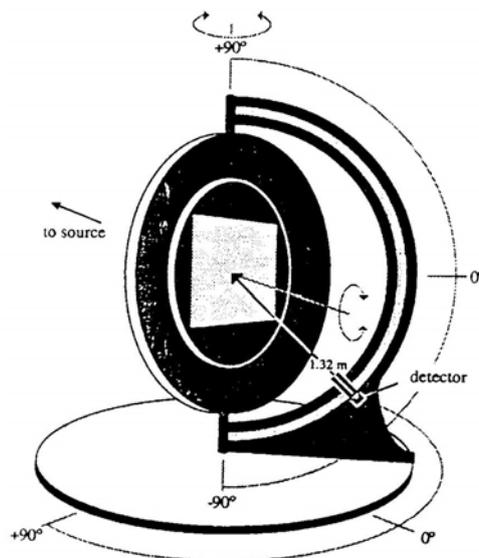
Assim, Papamichael, Klems e Selkowitz (1988) apresentam o uso do radiômetro escaneador bidirecional para a determinação das

propriedades óptico-solares de transmitância bidirecional (quantidade e distribuição espacial da luz) de sistemas de aberturas visando avaliar o desempenho térmico e luminoso. Esse equipamento consiste basicamente numa superfície vertical circular móvel (em dois eixos), onde é posicionada uma amostra de elemento de controle solar a ser analisada, dirigida a uma fonte de luz; no lado oposto à fonte, existe um detector que pode ser posicionado em diversos pontos de “varredura” da luz natural que atravessou a amostra em estudo, identificando, assim, a luz natural admitida após a passagem pela influência de determinado elemento de controle solar. Esse radiômetro é apresentado na Figura 4.



Fonte: Kessel e Selkowitz (1984)

Figura 3 - Radiômetro escaneador direcional pelo uso da esfera integradora



Fonte: Papamichael, Klems e Selkowitz (1988)

Figura 4 - Radiômetro escaneador bidirecional

Segundo a LBNL (2004), o método do radiômetro escaneador bidirecional é preciso para a medição do ganho de calor solar de sistemas de aberturas com proteções solares diversas como lâminas, persianas, cortinas e uma variedade de tipos de vidros, tintas, pigmentos e espessura de vidros, utilizando, entre outros equipamentos, uma esfera integradora.

Sobre a caracterização do comportamento luminoso de materiais, a International Energy Agency (IEA, 1999) apresenta medições de características luminosas de diversos materiais para iluminação natural, como medições direcionais e bidirecionais da transmitância da luz; estas últimas, representativas da distribuição espacial da luz. O trabalho citado apresenta essas medições para sistemas de iluminação natural de filme prismático para vidro, vidro direcionador-solar (*lumitop*), e *plexiglas*. Para tais medições bidirecionais, utiliza o goniofotômetro bidirecional da Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), com base em técnicas de imagem digital. Para a medição de propriedades térmicas e radiantes dos materiais analisados, a IEA cita que existem diferentes métodos normalizados de medições calorimétricas e cálculos.

Também são apresentados pelo autor outros equipamentos visando à medição bidirecional da transmitância/refletância da luz, como um aparato para medição de grandes amostras de material do Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), e o goniofotômetro espiral da *Berlin University of Technology* (TUB). Esse equipamento consiste em duas fontes de luz fixas, uma amostra exemplo ajustável e uma célula solar móvel como um detector. Todas as posições angulares são controladas por computador, usando-se uma estação de trabalho para armazenamento dos dados das medições.

Maamari *et al.* (2006) apresentam trabalho sobre validação experimental de métodos de simulação da propriedade de transmissão bidirecional da luz para o nível de desempenho da iluminação natural, citando como métodos de avaliação dessas propriedades o videogoniofotômetro bidirecional e o goniofotômetro numérico.

O videogoniofotômetro bidirecional faz as análises por meio de técnicas de imagem digital desenvolvidas no LESO-PB-EPFL; já sobre os goniofotômetros numéricos, os autores apresentam o do LESO-PB-EPFL, que reproduz virtualmente as condições experimentais de um goniofotômetro com o Programa TracePro (que trabalha com o modelo do raio-traçado); além do FHG-IBP, que representa um ambiente

automatizado, possibilitando testes virtuais, baseados na utilização do Programa Opticad (que usa também o modelo do raio-traçado).

De acordo com Papamichael, Klems e Selkowitz (1988) e a IEA (1999), para a caracterização do comportamento radiante de aberturas com ECS que influenciam na admissão da luz natural para o ambiente interno, duas propriedades ópticas são fundamentais de serem conhecidas: a transmitância direcional hemisférica (T_{dh}) e a transmitância bidirecional hemisférica (T_{bh}). A primeira propriedade avalia a quantidade total de luz admitida numa abertura, e a segunda avalia a distribuição espacial dessa luz.

Em estudos mais recentes sobre o tema, De Boer (2006) e Andersen e De Boer (2006) também apresentam medições realizadas com uso de goniofotômetro bidirecional e goniofotômetro numérico (baseado na ferramenta Opticad), com resultados para quatro tipos de materiais envidraçados e/ou elementos de controle solar: acrílico difusor, lâminas direcionadoras, vidro redirecionador e lâminas horizontais.

Entre os métodos já apresentados para a caracterização do comportamento luminoso de aberturas, podem-se destacar os que utilizam equipamentos rastreadores da luz direcionada a determinada amostra de análise, identificando de formas diferentes, segundo cada equipamento, a quantidade de luz existente e sua distribuição espacial interna. Entre os principais equipamentos citados, estão os radiômetros escaneadores direcional e bidirecional, identificados segundo os autores mencionados (KESSEL; SELKOWITZ, 1984; LBNL, 2004; PAPAMICHAEL; KLEMS; SELKOWITZ, 1988), assim como diversos tipos de goniofotômetros (ANDERSEN; DE BOER, 2006; IEA, 1999; MAAMARI *et al.*, 2006).

Este trabalho propõe um método alternativo para a caracterização do comportamento luminoso de aberturas com elementos de controle solar e apresenta resultados da admissão quantitativa (T_{dh} – quociente entre o fluxo luminoso transmitido e o incidente) e da distribuição espacial (T_{bh} – luminância equivalente da janela) para diferentes tipos de janelas com ECS, obtidos de acordo com o método descrito em Métodos.

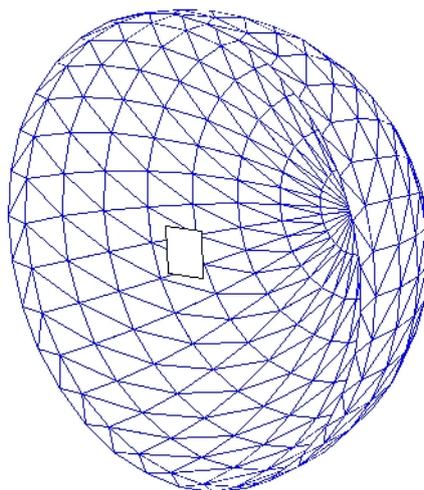
Método

O método proposto no presente trabalho visa caracterizar o comportamento luminoso de aberturas com ECS, mediante a determinação dos seguintes parâmetros: fluxo luminoso admitido e sua distribuição espacial. Para tal, emprega

simulação computacional do comportamento da luz natural com um modelo virtual análogo ao goniofotômetro, equipamento utilizado em estudos fotométricos laboratoriais. Esse modelo consiste numa hemisfera oca, para caracterizar o ambiente interno, com base vertical contendo uma abertura, caracterizando uma fonte de luz, conforme a Figura 5 (BOGO, 2007). Esse ambiente virtual de simulação é identificado na literatura como o modelo de estudo ideal para a

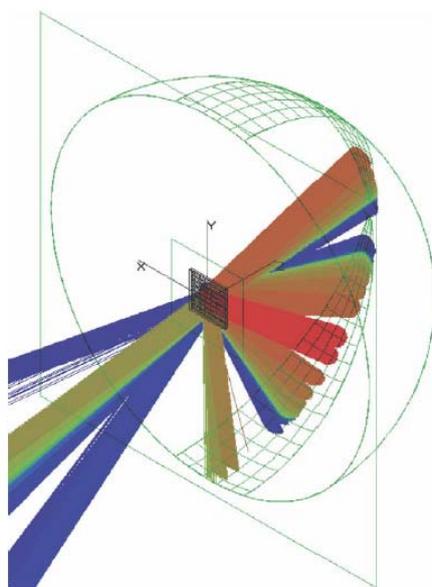
caracterização luminosa de aberturas quanto à luz admitida e sua distribuição espacial no interior, (ANDERSEN; DE BOER, 2006), conforme ilustrado na Figura 6.

No estudo desenvolvido foram avaliados comparativamente diferentes ECS no que se refere à admissão quantitativa de luz natural (fluxo luminoso) e sua distribuição espacial interior (luminância equivalente da janela).



Fonte: Bogo (2007)

Figura 5 - Modelo hemisfera oca com abertura para estudo da admissão quantitativa e direcional da luz natural



Fonte: Andersen e De Boer (2006)

Figura 6 - Modelo de configuração ideal com sol virtual e detector hemisférico da transmissão bidirecional da luz através de um sistema de aberturas

Programa APOLUX

Para a implementação do método foi utilizado um módulo especial do programa de simulação computacional do comportamento da luz natural APOLUX 1.0. Esse programa, já validado por Pereira (2009), baseia-se no Modelo Vetorial Esférico, que consiste num globo geral de referência através do qual são definidas todas as relações de visibilidade do objeto de estudo.

O programa computacional de simulação da luz natural emprega o algoritmo da radiosidade (amplamente validado e reconhecido), para simulação das trocas de energia radiante entre superfícies (CLARO; PEREIRA; AGUIAR, 2003).

O APOLUX considera as superfícies como elementos opacos perfeitamente difusores (com propriedades de refletância variáveis) ou transmissores especulares (com propriedades de transmitância variáveis), o que possibilita a especificação de diversos materiais para análise de iluminação natural em ambientes internos e externos.

O APOLUX 1.0 trabalha com dois módulos distintos para realização das simulações de luz natural: o Fractal e o LuzSolar.

O módulo Fractal permite realizar um conjunto de operações de preparação para que um modelo de espaço tridimensional desenvolvido em CAD no formato *Data Exchange File* (DXF) possa ser processado pelo módulo principal do programa, o LuzSolar.

Ainda no módulo Fractal, é definido o espaço tridimensional, composto de superfícies planas que apresentem, além dos dados geométricos, propriedades físicas luminosas.

Definido o espaço geométrico (o modelo), executa-se o fracionamento. Este consiste na divisão de diferentes superfícies do modelo em parcelas de área, de forma a permitir a aplicação dos conceitos matemáticos utilizados no processamento do método da Radiosidade para a obtenção de uma solução de iluminação natural determinada.

A definição do projeto (a situação de análise) consiste em diversas ações – como corrigir orientação de superfícies, editar propriedades dos materiais, definir parâmetros de fracionamento, entre outros detalhes, visando finalizar o projeto, a ser analisado no módulo LuzSolar.

O módulo LuzSolar permite calcular, para determinado projeto de espaço, a iluminação proveniente da luz natural da abóbada celeste, devido tanto à incidência direta de luz solar

quanto à contribuição da radiação difusa do céu, segundo algoritmo baseado no “método da radiosidade”.

O procedimento geral de cálculo envolve um projeto, expresso na forma de dados cartesianos e parâmetros físicos, um globo de referência espacial astronômica e uma abóbada celeste calculada.

Neste módulo é realizado o cálculo dos fatores de forma entre as diferentes superfícies do projeto, correspondendo ao ângulo sólido espacial, que relaciona determinado ponto de uma superfície que recebe luz com determinada superfície em uma dada direção e posição do espaço, podendo ser entendido como a forma que um ponto receptor “vê” as diferentes superfícies emissoras de luz no hemisfério definido pelo plano no qual se encontra a superfície receptora que o contém.

Posteriormente, o módulo realiza o cálculo de sucessivas trocas de luz por radiosidade, determinando a iluminância inicial provida pela abóbada celeste e pelo Sol nos diferentes triângulos dos planos do projeto, calculando a energia radiante trocada entre essas superfícies por meio dos fatores de forma calculados e, por último, calculando para o número de pontos definidos da amostra a incidência de luz da abóbada celeste e do Sol e a contribuição das diferentes superfícies do projeto a cada ponto específico. A partir de cada solução, o programa pode interpolar os valores obtidos nos pontos da amostra para outros pontos das superfícies. Os resultados de iluminação natural no ambiente de estudo podem ser observados tanto em imagens tridimensionais quanto em gráficos analíticos tridimensionais, assim como em relatório numérico.

Com esse método desenvolvido, diferentes configurações de ECS foram estudadas, variando-se sua geometria (placas horizontais e verticais) e suas refletâncias (75%, 20%); cabendo salientar que as superfícies foram assumidas com comportamento perfeitamente difusor. Consideraram-se períodos diferenciados de incidência solar direta com alturas de 30 e 60 graus, azimutes de 0, 60, e -60 graus, a partir da direção normal do centro da abertura, possibilitando o estudo da admissão de luz natural em ângulos de baixa e média altura, na direção perpendicular e nas laterais. Com relação à fonte de luz, além da luz direta do Sol também foi considerada a luz difusa proveniente da abóbada celeste.

Modelo de simulação

A partir da construção de modelos em CAD no formato 3D Face, é possível simular com o programa APOLUX o comportamento luminoso de diferentes tipos de configuração geométrica de ECS, o que possibilita estudos diversos.

O modelo desenvolvido da hemisfera oca com base vertical e abertura como fonte de luz possibilita identificar a quantidade de luz admitida através da abertura em função da adoção de diferentes tipos de elementos de controle solar na janela, comparados a uma situação de referência (abertura livre). Para a identificação da distribuição espacial da luz admitida, foi realizada a detecção da iluminância existente em diversos pontos da superfície interna da hemisfera.

Essa hemisfera oca definida caracteriza-se como um goniofotômetro virtual, similar ao identificado na literatura.

O método proposto nesse estudo emprega o modelo da hemisfera oca virtual e adota o conceito da luminância equivalente da janela (a janela definida como uma fonte superficial de luz) a partir da detecção da luz admitida (iluminância) em milhares de pontos do interior da hemisfera.

Foram realizadas diversas análises paramétricas com base em modelos virtuais de análise, numa situação demorada e de custo elevado de se realizar num equipamento mecânico (como os radiômetros ou goniofotômetros citados), ou de difícil “varredura” hemisférica no caso de um radiômetro escaneador digital analisador de modelos em escala reduzida.

O método aqui apresentado é uma contribuição para o estudo do comportamento luminoso de sistemas de aberturas, proporcionando a comparação de diferentes situações de janelas com elementos de controle solar quanto à admissão de luz natural e sua distribuição para o interior.

O método foi desenvolvido em ambiente virtual, com uso de simulação computacional por meio de um módulo especial do programa APOLUX, apresentando-se com uma alternativa a mais em relação a outros métodos/procedimentos apresentados na literatura, com a facilidade de variações paramétricas para análise nos modelos de simulação, devido a sua característica virtual.

Para análise do fluxo luminoso decorrente da admissão e posterior distribuição de luz natural através de aberturas com diferentes configurações de elementos de controle solar, estabeleceu-se um

modelo de simulação que consiste numa hemisfera oca (diâmetro de 20 m), com uma base vertical (com uma espessura de 0,15 m), onde se localiza uma abertura de 2 m x 2 m, representando a fonte de luz natural. O diâmetro de 20 m foi definido com base em recomendações fotométricas, que definem como necessária para estudos em iluminação uma dimensão 5 vezes a maior dimensão da fonte de luz, no caso a abertura com 2 m.

Por meio do programa computacional APOLUX 1.0, avaliou-se o fluxo luminoso (a partir dos valores de iluminância identificados num conjunto de 121 pontos do lado externo do vidro) que atravessa a abertura, primeiramente sem nenhum tipo de elemento de controle solar e, em seguida, com diferentes sistemas de controle solar adicionados à abertura, e vidro com transmitância à radiação solar de 85%, identificando então a variação existente na admissão do fluxo luminoso. Esse conjunto de pontos foi definido em função da especificação de uma divisão do plano externo do vidro por 10 (que resultam em 11 x 11 divisões do plano da abertura), possibilitando o fracionamento desse plano num número maior de partes. Essa divisão é necessária para identificar as variações de incidência de luz em diferentes partes do plano externo do vidro, quando da adoção de diferentes tipos de elementos de controle solar na janela, que bloqueiam mais ou menos a luz natural incidente.

Os 121 pontos definidos no plano externo do vidro representam a divisão desse plano com 4 m² em 121 parcelas, cada uma com área de 0,0330578 m². Calculou-se então o fluxo luminoso admitido através do vidro externo segundo cada uma dessas parcelas, multiplicada pela iluminância existente nos 121 pontos, totalizando o fluxo luminoso total admitido.

Posteriormente, em função dos diferentes valores de iluminância medidos internamente à hemisfera, segundo posição em função de direções a partir do centro da abertura, foi identificada a luminância equivalente da abertura como fonte de luz natural, com base na distância entre o ponto de medição de iluminância no interior da hemisfera (raio) até a abertura, assim como a área aparente de iluminação em função do ângulo sólido. Esse procedimento foi especialmente implementado no programa APOLUX visando à agilidade nesse processo, em função de um grande número de pontos de iluminância medidos no interior da hemisfera (~ 4.500 pontos). Com isso, obtém-se maior e mais precisa abrangência dos valores de iluminância na superfície interna da hemisfera, utilizados para o cálculo da luminância equivalente da abertura.

No modelo em CAD, junto à hemisfera com base vertical e abertura (janela), foram adicionados diferentes elementos de controle solar, de comprimento ou altura (dependendo do tipo – horizontal ou vertical), igual ao diâmetro da hemisfera oca (20 m), comparando as situações internas em termos de admissão de luz natural (fluxo luminoso total que atravessou a abertura) e distribuição interna (luminância equivalente da abertura).

Obtenção de resultados

No método desenvolvido, foram implementados os cálculos de avaliação da luz natural admitida a seguir.

Cálculo do Fluxo Luminoso: identificação quantitativa da luz natural que atravessa a abertura, a partir de um relatório numérico de iluminâncias no plano externo do vidro.

O fluxo luminoso incidente (Φ) é calculado em cada ponto de medição de iluminância, no centro de cada célula da malha (de acordo a área de contribuição de cada parcela), segundo a equação 1:

$$\Phi \equiv E \times A \quad (1)$$

O fluxo luminoso total admitido através da abertura é igual ao somatório dos fluxos luminosos identificados em cada parcela.

Cálculo da Luminância Equivalente da Janela: identificação da distribuição espacial da luz natural admitida, de acordo com o conceito da luminância equivalente da janela (Lequiv). Esta foi identificada no interior da hemisfera segundo direções a partir do centro da abertura, obtida conforme a equação 2 (PAPAMICHAEL; KLEMS; SELKOWITZ, 1988):

$$Lequiv \equiv \frac{E \times r^2}{A \times \cos \theta} \quad (2)$$

onde: A = área da abertura; r = raio interno da hemisfera; e θ = ângulo formado entre a direção normal à abertura e o raio de luz refletido internamente.

Cabe salientar que, embora seja utilizada a analogia com o goniofotômetro, a abertura caracteriza-se como uma fonte superficial e, como tal, tem sua fotometria caracterizada por sua luminância, e não pela intensidade luminosa, como no caso de fontes pontuais.

A partir desses dados numéricos de luminância gerada na janela (Lequiv assumida no ponto central da abertura), o programa APOLUX gera imagens do tipo *dx_f*, identificando a direção de diferentes vetores luz, a partir do centro da abertura para o interior da hemisfera, representativos da distribuição espacial da luz natural admitida.

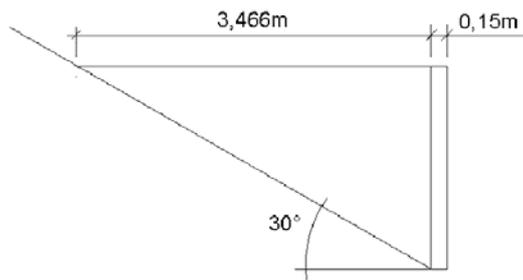
Na Figura 7 adiante são apresentadas as características geométricas dos ECS analisados.

Análise e discussão dos resultados

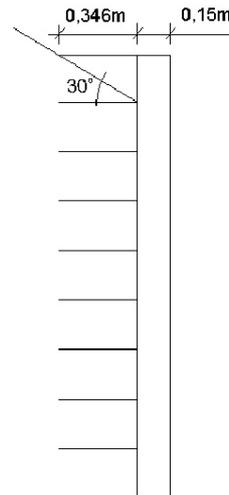
O processo de simulação gerou uma grande quantidade de dados e imagens, mas, sem dúvida, o aspecto mais importante foi a possibilidade de geração da representação da distribuição espacial do fluxo admitido num sistema de coordenadas polares.

Os resultados aqui apresentados e analisados permitem a comparação do comportamento de diferentes tipos de ECS em função dos ângulos de altura do Sol (ALT), da diferença de azimutes entre Sol e abertura (Δ AZI), representativos das distintas condições de incidência solar na abertura e das distintas refletâncias das superfícies dos ECS. Esse comportamento é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- (a) fluxo luminoso admitido: representativo da quantidade de luz que atravessou a janela após passar pelos elementos de controle solar; e
- (b) luminância equivalente da janela: representativo da distribuição espacial da luz natural admitida após passar pelo efeito dos elementos de controle solar.



1 Placa Horizontal – 1 PH (em corte)
Placa com 20 m de comprimento



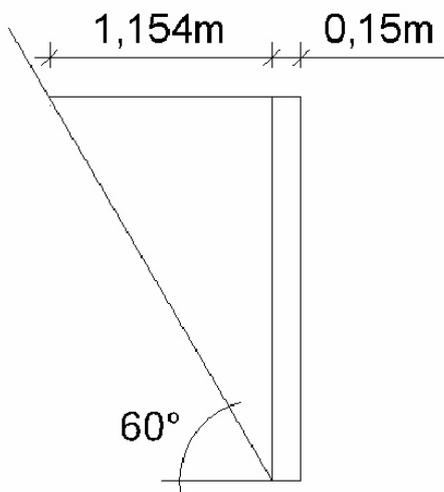
10 Placas Horizontais – 10 PH (em corte)
Placas com 20 m de comprimento



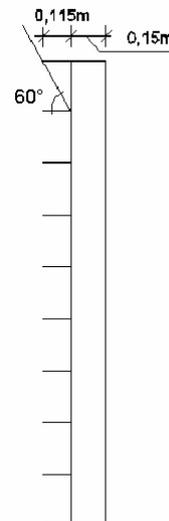
5 Placas Verticais – 5 PH (em planta-baixa)
Placas com 20 m de altura



10 Placas Verticais – 10 PH (em planta-baixa)
Placas com 20 m de altura



1 Placa Horizontal – 1 PH (em corte)
Placa com 20 m de comprimento



10 Placas Horizontais – 10 PH (em corte)
Placas com 20 m de comprimento

Figura 7 - Características geométricas dos ECS analisados

Fluxo de luz natural admitido

Os resultados do fluxo luminoso (lm) são apresentados nas Tabelas 1 e 2, para os diferentes tipos de ECS analisados quanto à influência de sua geometria e refletância.

Os valores de fluxo luminoso calculados foram identificados como se segue:

- (a) Φ Ext (Sol+céu): fluxo luminoso no plano vertical exterior da abertura, situação sem ECS devido às fontes de luz natural Sol e céu;
- (b) Φ ECS: fluxo luminoso no vidro externo com somente efeito dos ECS, devido às fontes de luz natural Sol e céu;
- (c) Φ Adm: fluxo luminoso admitido internamente após atravessar o vidro, devido às fontes de luz natural (Sol e céu); e
- (d) T_{dh} : transmitância direcional hemisférica da luz de acordo com a incidência de luz (altura e azimute): quociente entre o fluxo luminoso admitido e o fluxo incidente.

Os resultados de fluxo luminoso de alguns tipos de ECS são apresentados na forma de tabelas (Tabelas 1 e 2), nas diferentes condições de exposição à fonte de luz natural considerada.

Conforme observado na Tabela 1, para uma mesma situação de insolação (altura 30° e 60° e azimute 0° e 60°), os diferentes tipos de ECS (1

PH e 10 PH) apresentaram variações significativas quanto à admissão de luz natural.

Na situação de altura 30° e Δ azimute 0° , para 10 PH comparado com 1 PH, houve um aumento de aproximadamente 623% do fluxo luminoso admitido, devido ao incremento da luz natural admitida por reflexão nas 10 placas horizontais, o que não acontece no caso de 1 PH. Assim sendo, embora os dois tipos de ECS tenham um comportamento semelhante quanto à proteção da radiação solar direta, apresentam um comportamento diferente quanto à admissão total de luz natural.

Na situação de altura 30° e Δ azimute 60° , para 10 PH comparado com 1 PH, houve um aumento de 364,25% do fluxo luminoso admitido, devido ao incremento da luz natural admitida por reflexão nas 10 placas horizontais.

Na situação de altura 60° e Δ azimute 0° , para 10 PH comparado com 1 PH, houve um aumento de 602,42% do fluxo luminoso admitido, devido ao incremento da luz natural admitida por reflexão nas 10 placas horizontais.

Na situação de altura 60° e Δ azimute 60° , para 10 PH comparado com 1 PH, houve um aumento de 347,50% do fluxo luminoso admitido, devido ao incremento da luz natural admitida por reflexão nas 10 placas horizontais.

Luz Natural: Sol + Céu			1 PH		10 PH	
			Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)	Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)
Posição do Sol						
ALT 30°	Δ AZI 0°	Φ Ext 326.818	5.637	1,7	35.145	10,7
		Φ Ext 111.693				
ALT 60°	Δ AZI 0°	Φ Ext 127.805	7.631	5,9	45.971	35,9
		Φ Ext 37.251				
ALT 60°	Δ AZI 60°	Φ Ext 37.251	6.519	17,5	22.654	60,8
		Φ Ext 37.251				

Tabela 1 - Valores da admissão de luz natural (fluxo luminoso) para dois tipos de ECS de placas horizontais - PH (com uma e com 10 placas), refletância de 75%

Luz Natural: Sol + Céu			10 PH		10 PH	
			Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)	Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)
Posição do Sol						
ALT 60°	Δ AZI 0°	Φ Ext	Refletância 75%		Refletância 20%	
		127.805	45.971	35,9	14.910	11,6
ALT 60°	Δ AZI 60°	Φ Ext	Refletância 75%		Refletância 20%	
		37.251	22.654	60,8	9.269	24,8
Luz Natural: Sol + Céu			5 PV		10 PV	
			Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)	Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)
Posição do Sol						
ALT 60°	Δ AZI 60°	Φ Ext 37.251	Refletância 75%		Refletância 75%	
			14.656	39,3	14.259	38,2
			Refletância 20%		Refletância 20%	
			5.663	15,20	5.532	14,8

Tabela 2 - Valores da admissão de luz natural (fluxo luminoso) para ECS dos tipos 10 PH, 5 PV e 10 PV, com variação da refletância de 75% e 20%

Conforme observado na Tabela 2, para uma mesma situação de sombreamento da abertura devido ao tipo de ECS (10 PH) e diferentes percentuais de refletância (75% e 20%), existem variações quanto à admissão de luz natural.

Na situação de altura 60° e Δ azimute 0°, para 10 PH com 20% de refletância comparado com 10 PH com 75% de refletância, houve um aumento de 308,32% do fluxo luminoso admitido.

Na situação de altura 60° e Δ azimute 60°, para 10 PH com 20% de refletância comparado com 10 PH com 75% de refletância, houve um aumento de 244,40% do fluxo luminoso admitido (de 9.269 lm para 22.654 lm), situação esta menor do que a de azimute 0 grau (com altura 60 graus), antes apresentada.

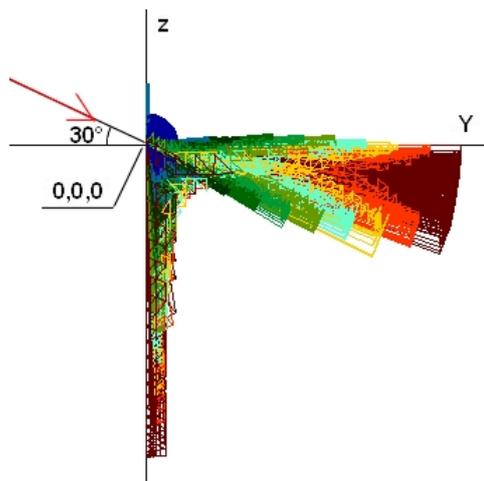
Para uma mesma situação de sombreamento da abertura devido ao tipo de ECS (5 PV, 10 PV) e diferentes percentuais de refletância (75% e 20%), existem variações quanto à admissão de luz natural.

Na situação de altura 60° e Δ azimute 60°, para 5 PV com 20% de refletância comparado com 10 PV com 75% de refletância, houve um aumento de 258,80% do fluxo luminoso admitido. Na mesma situação de altura e azimute, para 10 PV com 20% de refletância comparado com 10 PV com 75% de refletância, houve um aumento de 257,75% do fluxo luminoso admitido.

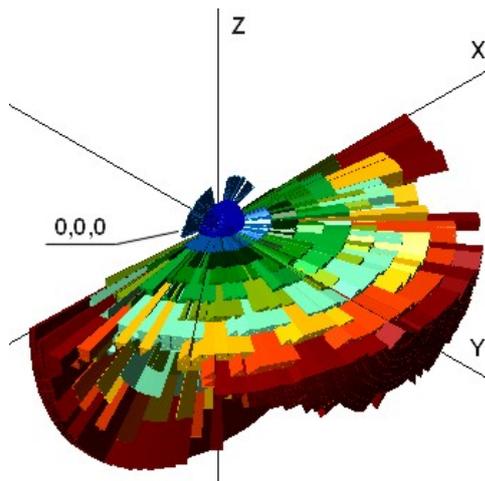
Luminância equivalente da janela

Os resultados de luminância equivalente da janela (representativos da distribuição espacial da luz admitida) são apresentados em dois formatos distintos de representação: gráficos de coordenadas polares (Figuras 8 e 10) e gráficos XYZ (Figuras 9 e 11), para os tipos de ECS de placas horizontais (1 PH e 10 PH).

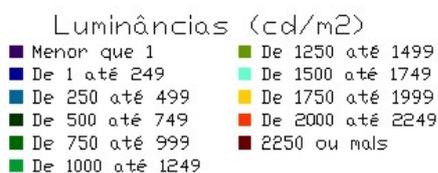
Na Figura 8, a existência de 1 placa horizontal sobre a abertura bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol na posição ALT 30° e Δ AZI 0°, sendo a luz admitida proveniente somente do céu, este com maior luminância junto à posição circunsolar. Na vista lateral esquerda, identifica-se o efeito da luz natural difusa admitida na incidência de altura 30° até 0°. O efeito da reflexão da luz na espessura do peitoril com refletância de 75% está representado junto ao hemisfério superior, com valores em sua maioria de até 249 cd/m² (na cor azul-escuro). Foram identificados ainda os maiores valores de Lequiv junto ao hemisfério inferior, representativo do efeito cosseno, com valores de 4.000 a 20.000 cd/m². Na perspectiva no modo sombreado (*realistic*) do CAD, a distribuição espacial da luz provocada pela luminância equivalente da janela pode ser mais bem observada desde o centro da janela (ponto 0,0,0), tanto para os dois lados como na direção do hemisfério inferior.



1. Vista Lateral Esquerda



2. Perspectiva Sombreada

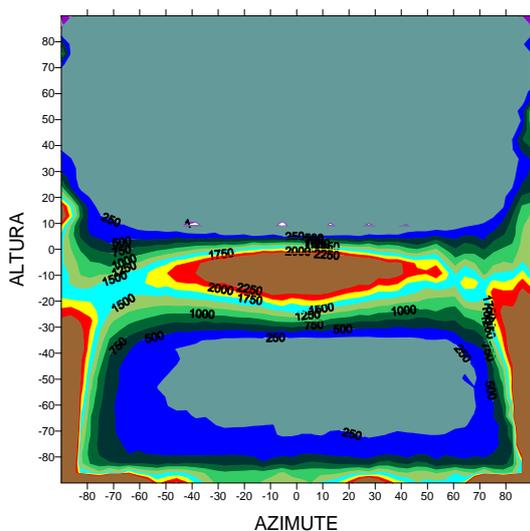
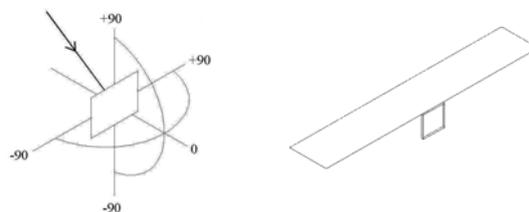


Altura 30° e ΔAzimute 0°

Legenda com escala de cores válida somente para a imagem 1

Figura 8 - Distribuição espacial da luz admitida segundo a luminância equivalente da janela, através de coordenadas polares, para situação de 1 PH (1 placa horizontal do tipo marquise)

ECS do tipo 1 PH de 3,466 m
 Espessura de parede e peitoril: 0,15 m Refletância dos ECS: 75%
 ALT 30° ΔAZI 0°: Sol + Céu
 1 placa horizontal sobre a janela como uma marquise



Altura 30° e ΔAzimute 0°

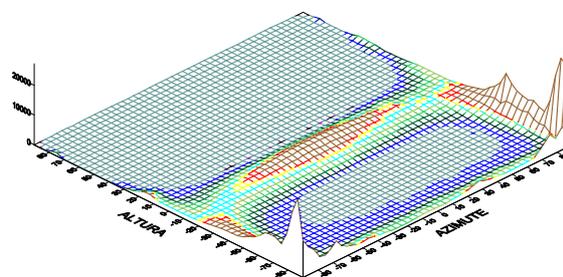


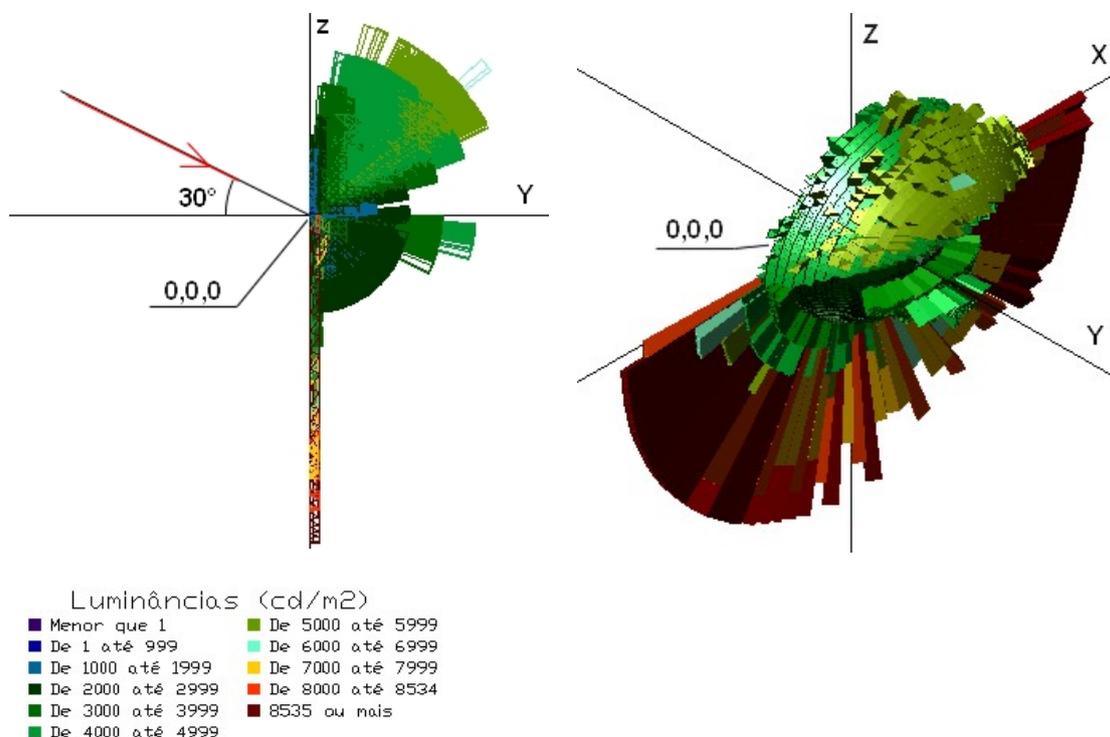
Figura 9 - Distribuição espacial da luz admitida em coordenadas X (azimute), Y (altura) e Z (luminância equivalente da janela) para situação de 1 PH

Conforme observado acima, a luz admitida é predominantemente difusa (conforme identificado na parte superior da figura), com valores em sua maioria de até 249 cd/m² (na cor azul-escuro), vinda na direção central da abertura devido ao ΔAzimute 0°. Outra parcela de luz admitida é devida à luz refletida na espessura da parede (0,15 m) ao longo de todo o perímetro da abertura.

Conforme ilustrado na Figura 10, a existência de 10 placas horizontais sobre a abertura também bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol perpendiculares à abertura, sendo a luz admitida proveniente da luz refletida nas placas horizontais com refletância de 75% e da luz difusa do céu, este com maior luminância junto à posição circumsolar. Na vista lateral esquerda identifica-se o efeito da luz natural admitida por reflexão nas 10 placas horizontais, com valores em sua maioria de até 6.000 cd/m² (na cor verde-claro). Foram identificados valores de luminância majoritariamente entre 2.000 cd/m² (na cor verde-forte) e 5.000 cd/m² (na cor verde-escuro) na direção do hemisfério inferior, representativos dos processos de inter-reflexões entre as placas horizontais. Na perspectiva no modo sombreado (*realistic*) do CAD, a distribuição espacial da luz devida à luminância equivalente da janela pode ser igualmente mais bem observada desde o centro da janela (ponto 0,0,0), para os dois lados e na direção do hemisfério inferior.

devida à luminância equivalente da janela pode ser igualmente mais bem observada desde o centro da janela (ponto 0,0,0), para os dois lados e na direção do hemisfério inferior.

Conforme ilustrado na Figura 10, a existência de 10 placas horizontais sobre a abertura também bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol perpendiculares à abertura, sendo a luz admitida proveniente da luz refletida nas placas horizontais com refletância de 75% e da luz difusa do céu, este com maior luminância junto à posição circumsolar. Na vista lateral esquerda identifica-se o efeito da luz natural admitida por reflexão nas 10 placas horizontais, com valores em sua maioria de até 6.000 cd/m² (na cor verde-claro). Foram identificados valores de luminância majoritariamente entre 2.000 cd/m² (na cor verde-forte) e 5.000 cd/m² (na cor verde-escuro) na direção do hemisfério inferior, representativos dos processos de inter-reflexões entre as placas horizontais. Na perspectiva no modo sombreado (*realistic*) do CAD, a distribuição espacial da luz devida à luminância equivalente da janela pode ser igualmente mais bem observada desde o centro da janela (ponto 0,0,0), para os dois lados e na direção do hemisfério inferior.



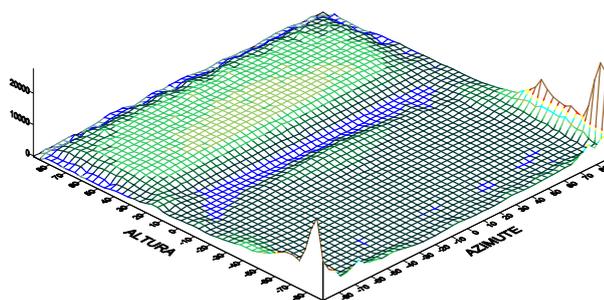
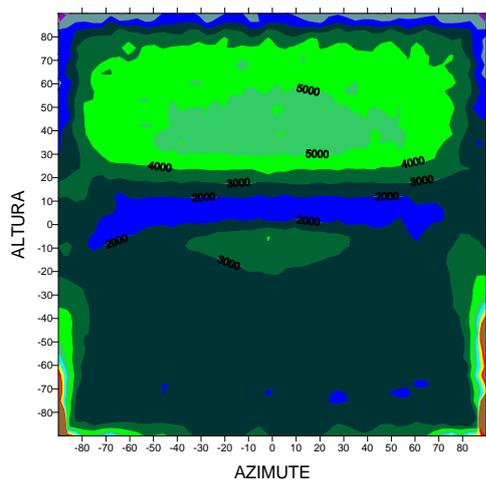
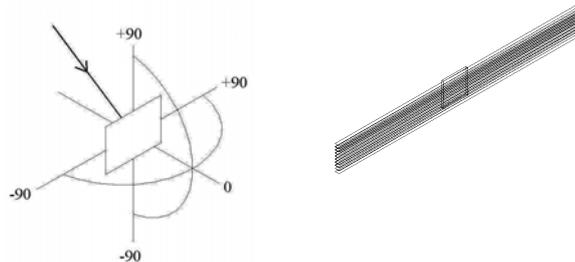
Legenda com escala de cores válida somente para a imagem 1
 Elemento de Controle Solar (ECS): 10 PH de 0,346 m
 ALT 30° e AZI 0°: Sol + Céu

Figura 10 - Distribuição espacial da luz admitida segundo a luminância equivalente da janela, através de coordenadas polares, para situação de 10 PH (10 placas horizontais do tipo brise)

ECS do tipo 10 PH de 0,346m
Espessura de parede e peitoril: 0,15m
Refletância dos ECS: 75%

ALT 30° e ΔAZI 0°: Sol + Céu

**10 placas horizontais sobre a janela como
brises horizontais**



Altura 30° e ΔAzimute 0°

Figura 11 - Distribuição espacial da luz admitida em coordenadas X (azimute), Y (altura) e Z (luminância equivalente da janela) para situação de 10 PH

Conforme observado acima, a luz admitida é predominantemente refletida nas placas horizontais (conforme identificado na parte superior da figura), com valores em sua maioria entre 4.000 e 6.000 cd/m^2 (em tons de verde-claro), vinda na direção central da abertura, devido ao $\Delta\text{Azimute } 0^\circ$.

Conclusões

Neste trabalho é apresentado um método para a caracterização do comportamento luminoso de aberturas com elementos de controle solar (ECS). O método desenvolvido com a definição de uma hemisfera oca com base vertical e abertura como fonte de luz natural caracteriza-se como um goniofotômetro virtual, similar aos identificados na revisão de literatura. A análise foi implementada através do programa de simulação computacional do comportamento da luz natural APOLUX 1.0, já validado, que possibilitou a determinação do fluxo luminoso e da distribuição espacial da luz admitida (luminância equivalente da janela) em aberturas sob o efeito da geometria dos ECS, da refletância dos ECS e das espessuras de peitoril e parede.

Com base nos métodos e procedimentos identificados na revisão de literatura, assim como pelo trabalho de simulação realizado, concluiu-se que um dos caminhos possíveis para a adequada caracterização do comportamento luminoso das aberturas com obstruções como os elementos de controle solar é o de aprimoramento dos programas de simulação da luz natural, com uso de algoritmos que possam melhor representar a situação física real, como, por exemplo, representação da refletância mista da luz (difusa + especular) em superfícies opacas.

Foram analisados diferentes sistemas de aberturas, inicialmente sem nenhum elemento de controle solar e posteriormente adicionando diversos tipos de ECS, sendo identificados a quantidade de luz natural admitida e sua distribuição espacial interior.

Os resultados analisados identificaram a variação esperada (redução e/ou aumento) da admissão quantitativa de luz quando da adição de diferentes tipos de ECS (1 PH; 10 PH; 5 PV; 10 PV) na janela e com a mudança de refletância deles (75% e 20%). Quanto a sua distribuição espacial para o hemisfério interior, quando da adição de diferentes tipos de ECS na janela desimpedida e com a mudança de refletância dos ECS (75% e

20%), parte dos resultados apresentou algumas situações excepcionais, como no caso da concentração de luz em certas direções, identificados pelo pico de valores de luminância equivalente. No entanto, mesmo nessas situações, o comportamento geral da distribuição espacial da luz apresentou resultados coerentes, com tendências de direcionalidade da luz esperadas segundo cada posição da fonte de luz (Sol + céu).

Como limitação, observou-se que, em virtude do conceito adotado de luminância equivalente da janela e sua aplicação pelo programa de simulação, o efeito cosseno do ângulo formado entre a direção normal à abertura e o raio de luz emergente devido à admissão de luz nos ângulos próximos de 90° foi marginalmente superestimado, numa distorção dos valores que pode identificar alguma limitação na aplicação do conceito adotado para o modelo hemisfera oca. Esse efeito cosseno superestimado pode ser mais bem observado nas Figuras 8 e 10 (vista lateral esquerda), junto ao eixo z, assim como nas Figuras 9 e 11, junto às laterais das imagens apresentadas, conforme já explicado.

Esse método, desenvolvido a partir de um ambiente virtual de estudo, apresenta vantagens em relação aos métodos experimentais de laboratório, tais como menor tempo de análise, menor custo e facilidade de acesso aos demais pesquisadores interessados.

Assim, o método desenvolvido apresentou-se viável aos objetivos propostos de avaliar a admissão da luz natural (magnitude e distribuição espacial) em aberturas com adição de elementos de controle solar.

Referências

- ANDERSEN, M.; DE BOER, J. Goniophotometry and Assessment of Bidirecional photometric Properties of Complex Fenestration Systems. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 836-848, 2006.
- BITTENCOURT, L. **Uso das Cartas Solares: diretrizes para arquitetos**. Maceió: Edufal, 1988. 92 p.
- BOGO, A. J. **Método para Avaliação da Luz Natural Através de Aberturas com Elementos de Controle Solar**. 2007. 308 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- CLARO, A.; PEREIRA, F. O. R.; AGUIAR, G. P. Desenvolvimento do Protótipo do Software Luz Solar para Análise e Projeto de Iluminação Natural em Arquitetura e Urbanismo. In: FÓRUM DE PESQUISA & DESENVOLVIMENTO DA CELESC, 1., Florianópolis, SC, 2003. **Anais...** Florianópolis: CELESC, 2003.
- DE BOER, J. Modelling Indoor Illumination by Complex Fenestration Systems Based on Bidirecional Photometric Data. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 849-868, 2006.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Measurement of Luminous Characteristics of Daylighting Materials: a report of IEA SHCP Task 21/ECBCS, Annex29, 1999**. 60 p.
- KESSEL, J.; SELKOWITZ, S. Integrating Shere Measurements of Directional-Hemispherical Transmittance of Window Systems. **Journal of IES**, St. Louis, v. 14, n. 1, out. 1984.
- LBNL. **The Bidirectional Radiometric Scanner**. In: FACILITIES. Lawrence Berkeley National Laboratory, Universidade da California. Disponível em: <<http://windows.lbl.gov/facilities/radiometer/radiometer.html>>. Acesso em: 23 dez. 2004.
- MAAMARI, F. *et al.* Experimental Validation of Simulation. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 878-889, 2006.
- MCCLUNEY, R. Determining Solar Radiant Heat Gain of Fenestration Systems. **Passive Solar Journal**, v. 4, n. 4, p. 439-487, 1987.
- PAPAMICHAEL, K.; KLEMS, J.; SELKOWITZ, S. Determination and Application of Bidirecional Solar-optical Properties of Fenestration Systems. In: NATIONAL PASSIVE SOLAR CONFERENCE, 13., Cambridge. **Proceedings...** Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- PEREIRA, R. C. **Metodologia para Avaliação de Ferramentas de Simulação de Iluminação Natural através de Mapeamento Digital de Luminâncias**. 2009. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.