

CONTROLE SOLAR E ADMISSÃO DE LUZ NATURAL EM ABERTURAS COM PROTEÇÃO SOLAR

Amílcar José Bogo (1); Fernando O. R. Pereira (2); Anderson Claro (3)

(1) Dr. Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, arqbogo@furb.br
Laboratório de Conforto Ambiental – LACONFA/Grupo de Estudo e Pesquisa do Hábitat - GEPHabitat
Universidade Regional de Blumenau – FURB

Cx Postal 1507, Blumenau–SC, 89012-900, Tel.: (47) 3321 0273

(2) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo

(3) Dr., Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo
Laboratório de Conforto Ambiental – LabCON - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

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 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 através 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 satisfatório para os objetivos propostos, apresentando também vantagens em relação aos métodos experimentais de laboratório, como o menor tempo de análise, menor custo e facilidade de acesso à maioria dos pesquisadores.

Palavras-chave: controle solar, luz natural, simulação computacional.

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 the present study is to define a method for assessing the daylight behavior of fenestration with different types of solar control devices, obtaining 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 obtained results allow pointing the method as very reasonable for the proposed objectives, also presenting some advantages over laboratorial experimental methods, such as a shorter analysis time, reduced cost and accessible to most of the researchers.

Keywords: solar control, daylight, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

A luz natural transmitida através dos vidros varia segundo as 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

absortância são influenciadas pela direção de incidência sobre o material e para cada comprimento de onda de radiação.

Numa abertura simples, sem obstáculos ou elementos de controle solar - ECS, a estimativa da luz natural transmitida é de fácil previsão, dependendo principalmente da transmitância do vidro e do ângulo de incidência da luz.

A adição de obstáculos junto à abertura, como os ECS, modifica a trajetória da luz natural transmitida, assim como sua quantidade, afetando a iluminação natural no interior das edificações em termos quantitativos e sua distribuição espacial. Esta influência ocorre devido ao bloqueio/filtração parcial da luz natural incidente na abertura, e a variação da direção da luz para o ambiente interno devido aos múltiplos processos de reflexões entre os elementos de controle solar.

Segundo Papamichael, Klems, Selkowitz (1988) e International Energy Agency- 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.

Experimentalmente, nas Figuras 1 e 2 adiante, são apresentados o radiômetro escaneador direcional pelo uso da esfera integradora, e o radiômetro escaneador bidirecional, utilizados respectivamente para a avaliação das propriedades antes citadas: T_{dh} e T_{bh} .

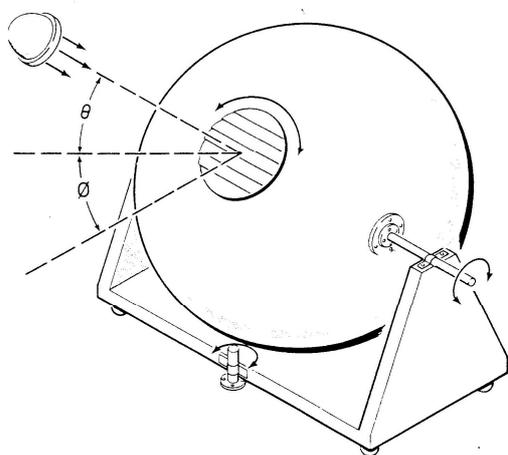


Figura 1: Radiômetro escaneador direcional pelo uso da esfera integradora
(Fonte: KESSEL e SELKOWITZ, 1984)

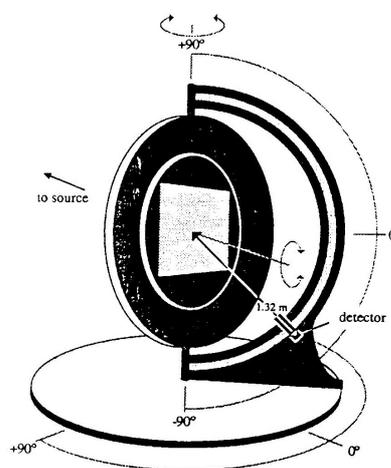


Figura 2 - Radiômetro escaneador bidirecional
(Fonte: PAPAMICHAEL, KLEMS e SELKOWITZ, 1988)

De acordo com LBNL (2004), o método do radiômetro escaneador bidirecional (*bidirecional radiometric scanner*) 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.

Tratando da caracterização fotométrica de aberturas, International Energy Agency- IEA (1999) realizou medições de diversos materiais para iluminação natural realizadas com uso de goniofotômetro bidirecional, como medições direcionais e bidirecionais da transmitância da luz, como filme prismático, vidro direcionador-solar (*Lumitop*) e *plexiglas*.

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 vídeo-goniofotômetro bidirecional e o goniofotômetro numérico.

Estudos mais recentes sobre o tema, como os apresentados por 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, lâminas horizontais.

Este trabalho apresenta os 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) da luz natural admitida, com uso de um método alternativo para caracterização do comportamento luminoso de aberturas com ECS.

2. OBJETIVO

Analisar o efeito do controle solar e da admissão de luz natural em aberturas com proteção solar, a partir de um método caracterizador do comportamento luminoso de aberturas com ECS, a partir de um modelo virtual implementado com uso de simulação computacional, identificando o fluxo luminoso admitido e sua distribuição espacial.

3. MÉTODO

O método desenvolvido e adotado no presente trabalho visa caracterizar o comportamento luminoso de aberturas com ECS, através da determinação dos seguintes parâmetros: fluxo luminoso admitido na abertura (lm) e sua distribuição espacial (cd/m^2). Para tal, emprega simulação computacional do comportamento da luz natural com um modelo virtual análogo ao goniofotômetro, equipamento utilizado em estudos fotométricos laboratoriais.

Este modelo consiste numa hemisfera oca, para caracterizar o ambiente interno, com base vertical contendo uma abertura, caracterizando uma fonte de luz, conforme a Figura 3 (BOGO, 2007). Este ambiente virtual de simulação é identificado na literatura como o modelo de estudo ideal para caracterização luminosa de aberturas quanto à luz admitida e sua distribuição espacial no interior, (ANDERSEN e DE BOER, 2006), conforme ilustrado na Figura 4.

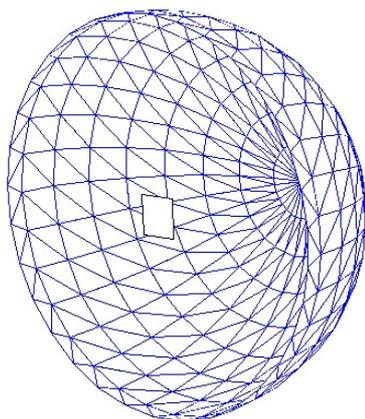


Figura 3 – Modelo hemisfera oca com abertura para estudo da admissão quantitativa e direcional da luz natural
Fonte: Bogo (2007)

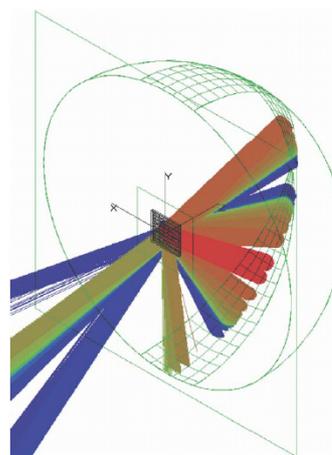


Figura 4 – Modelo de configuração ideal com Sol virtual e detector hemisférico da transmissão bidirecional da luz através de um sistema de aberturas
Fonte: Andersen e De Boer (2006)

3.1 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. Este 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.

Este 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 e AGUIAR, 2003). O Programa APOLUX considera as superfícies como elementos opacos perfeitamente difusores (com propriedades de refletância variáveis) ou transmissores especulares (com propriedades de transmitância variáveis), possibilitando a especificação de diversos materiais.

No método, a partir de definição 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, possibilitando estudos diversos.

Para atender aos objetivos propostos, foram avaliados diferentes ECS em relação à geometria (placas horizontais e verticais), em períodos diferenciados de incidência solar com alturas (Alt) de 30° e 60° e

diferença de azimutes entre Sol e abertura (ΔAzi) de 0 e 60°, a partir da direção normal à abertura desde seu centro.

3.2 Obtenção de Resultados

No método desenvolvido, foram implementados os seguintes cálculos de avaliação da luz natural admitida:

- 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, gerado no programa.

Como a iluminância (E) é igual ao fluxo luminoso (Φ) dividido pela área de incidência (A), com o mapeamento (malha) dos valores de iluminância no plano da janela, calcula-se o fluxo luminoso incidente (Φ) em cada ponto de medição de iluminância, no centro de cada célula da malha, de acordo com a Equação 01 adiante:

$$\Phi \equiv E \times A \quad [01]$$

Logo, em função da área de contribuição de cada célula da janela (área total da janela dividido pelo número de células, no caso igual a 121), identifica-se o fluxo luminoso de cada parcela. O fluxo luminoso total admitido através da abertura é igual ao somatório dos fluxos luminosos de 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 (L_{equiv}), identificado no interior da hemisfera segundo direções a partir do centro da abertura foi obtida conforme a Equação 02, de acordo com Papamichael, K., Klems, J., Selkowitz, S. (1988):

$$L_{\text{equiv}} \equiv \frac{E \times r^2}{A \times \cos \theta} \quad [02]$$

onde: E = iluminância na superfície interior da hemisfera;

A = área da abertura;

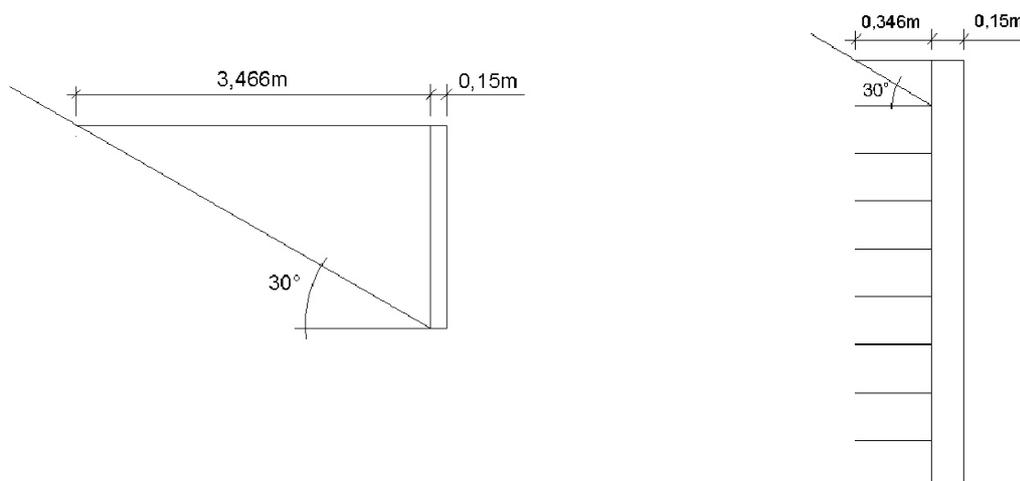
r = raio interno da hemisfera;

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 a sua fotometria caracterizada pela sua luminância e não pela intensidade luminosa como no caso de fontes pontuais.

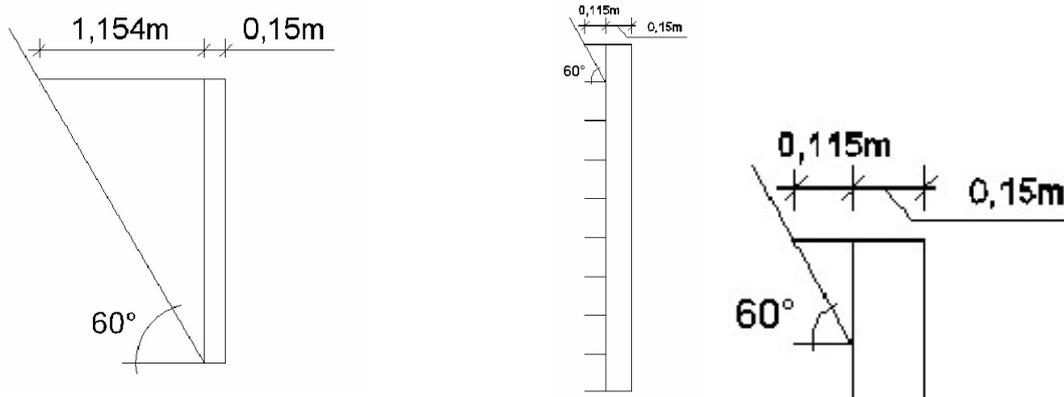
A partir desses dados numéricos de luminância gerada na janela (L_{equiv} assumida no ponto central da abertura), o Programa APOLUX gera imagens do tipo dxf , identificando a direção de diferentes vetores luz, a partir do centro da abertura para o interior da hemisfera, representativas da distribuição espacial da luz natural admitida.

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



1 Placa Horizontal – 1 PH (em corte)

10 Placas Horizontais – 10 PH (em corte)



1 Placa Horizontal – 1 PH (em corte)

10 Placas Horizontais – 10 PH (em corte) e em detalhe

Figura 5 - Características geométricas dos ECS analisados

4. 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 (ΔAZI), representativos das distintas condições de incidência solar na abertura e das distintas refletâncias das superfícies dos ECS. Este comportamento é caracterizado pelos parâmetros fluxo luminoso admitido e luminância equivalente da abertura.

Cabe aqui salientar que o plano envidraçado foi considerado para efeito de determinação do fluxo incidente, mas para efeito de cálculo da energia radiante transmitida o envidraçado foi desconsiderado. Este procedimento foi necessário pois o Programa APOLUX somente simula superfícies opacas difusoras ou transmissoras especulares; assim, pra determinação do fluxo luminoso incidente no plano da janela, a mesma foi considerada neste momento como uma superfície opaca, possibilitando identificação de valores de iluminância neste plano.

4.1 Fluxo de luz natural admitido

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

Os valores de fluxo luminoso calculados foram identificados como segue:

Φ Ext (Sol+céu): fluxo luminoso no plano vertical exterior da abertura, situação sem ECS devido as fontes de luz natural Sol e céu;

Φ Adm: fluxo luminoso admitido internamente após atravessar o vidro, devido as fontes de luz natural Sol e céu;

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 das Tabelas 1 e 2 adiante, nas diferentes condições de exposição à fonte de luz natural considerada.

TABELA 1 – Valores da admissão de luz natural (fluxo luminoso) para 2 tipos de ECS de placas horizontais – 1 PH e 10 PH

Luz Natural: Sol + Céu			1 PH		10 PH	
			Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)	Φ Adm (lm)	T_{dh} (%)
Posição do Sol						
ALT 30°	ΔAZI 0°	Φ Ext 326.818	5.637	1,7	35.145	10,7
	ΔAZI 60°	Φ Ext 111.693				
			4.222	3,7	15.375	13,7

ALT 60°	Δ AZI 0°	Φ Ext	7.631	5,9	45.971	35,9
		127.805				
ALT 60°	Δ AZI 60°	Φ Ext	6.519	17,5	22.654	60,8
		37.251				

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 (1PH e 10 PH), apresentaram variações significativas quanto à admissão de luz natural.

Na situação de altura 30° e 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 em termos de impedir a admissão da radiação solar direta, apresentam um comportamento bastante diferente quanto à admissão de luz natural.

Na situação de altura 30° e 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 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 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.

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

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
ALT 60°	Δ AZI 60°	Φ Ext	Refletância 75%		Refletância 20%	
				37.251	22.654	60,8

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 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 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.

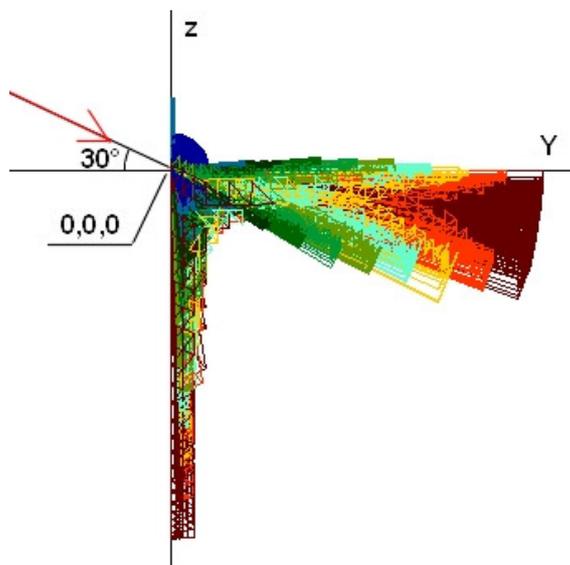
4.2 Luminância equivalente da janela

Os resultados de luminância equivalente da janela (representativos da distribuição espacial da luz admitida) são apresentados segundo gráficos XYZ e gráficos de coordenadas polares, para os tipos ECS de placas horizontais (1 PH e 10 PH), conforme as Figuras 6 até 8.

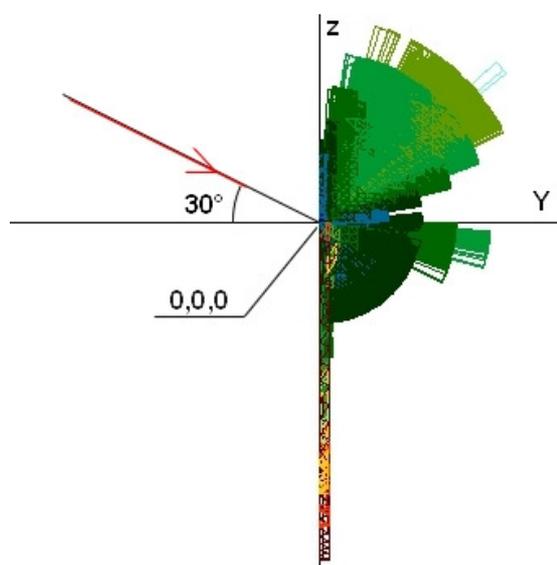
Na figura 6, a existência de uma placa horizontal sobre a abertura bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol na posição ALT 30° e Δ AZI 0°, sendo a luz admitida proveniente somente do céu, este com maior luminância junto à posição circunsolar. Na vista lateral esquerda, identifica-se o efeito 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 na sua maioria até 249 cd/m² (na cor azul-escuro). Foram identificados ainda os maiores valores de L equiv junto ao hemisfério inferior, representativo do efeito cosseno, com valores de 4.000 a 20.000 cd/m².

Na mesma condição de proteção solar, na situação de 1 PH, a recepção da luz difusa é dominante e se direciona mais para a parte inferior da abertura, uma vez que existe pouca luz refletida (apenas no peitoril

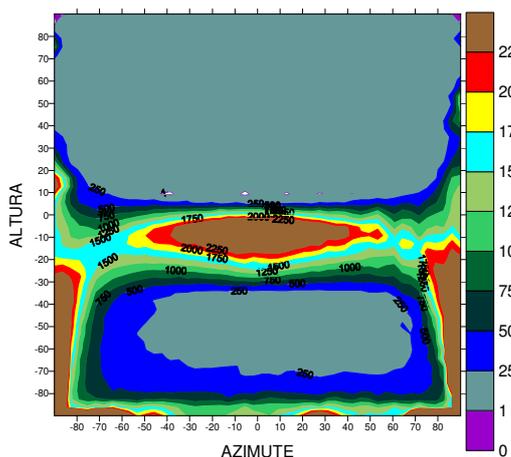
e espessura de parede). Já na situação de 10 PH, a reflexão da luz nas placas horizontais direciona parte da luz na direção superior da abertura.



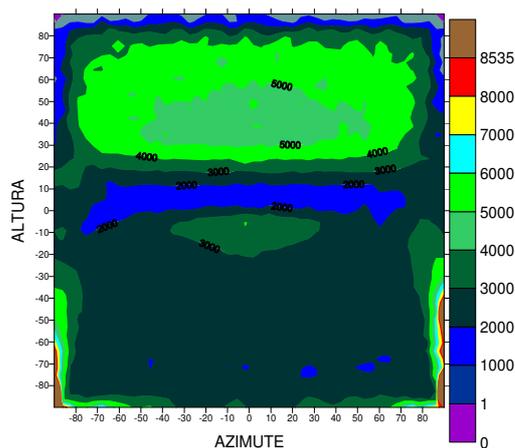
1 PH: Vista Lateral Esquerda



10 PH: Vista Lateral Esquerda



1 PH: Vista do Plano da Abertura



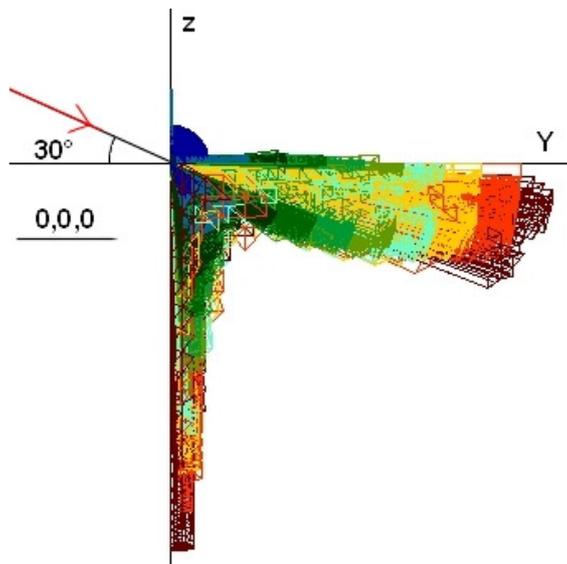
10 PH: Vista do Plano da Abertura

Figura 6 – Distribuição espacial e identificação quantitativa da luz natural admitida para 1 PH e 10 PH: ALT 30° e Δ AZI 0°

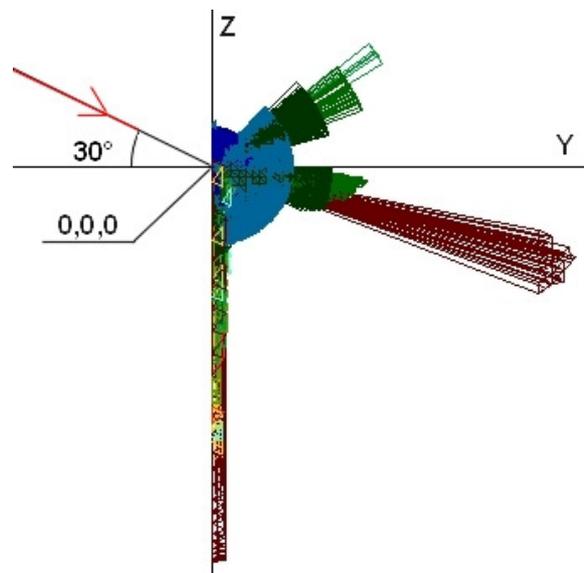
Na Figura 7 adiante, a existência de uma placa horizontal sobre a abertura bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol oblíquos à abertura (vindos do lado direito), sendo a luz admitida proveniente somente do céu, este com maior luminância junto à posição circunsolar, ou seja, de acordo com a altura e azimute de estudo.

A direcionalidade identificada da luz junto ao azimute 60° e na direção do hemisfério inferior, deve-se a fonte de luz difusa existente, com maior luminância do céu nesta direção de azimute e com a altura 30°, atingindo valores acima de 2.500 cd/m².

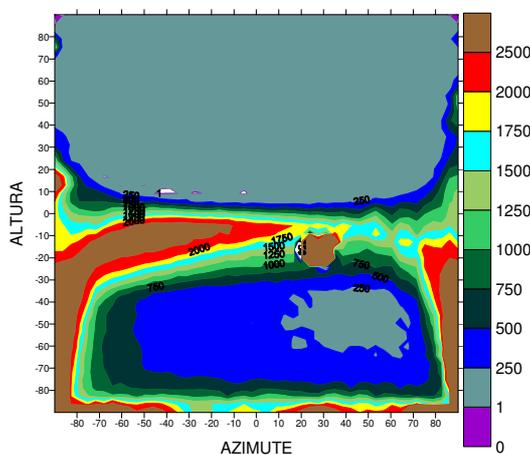
Na vista lateral esquerda identifica-se o efeito da luz natural difusa admitida na incidência de altura 30 graus. O efeito da reflexão da luz na espessura do peitoril com refletância de 75% está representado junto ao hemisfério superior, com valores na sua maioria até 249 cd/m². Foram identificados ainda os maiores valores de L equiv próximo a parte inferior da abertura, representativo do efeito cosseno, com valores de 12.000 a 28.000 cd/m²; no entanto, a magnitude destes valores fisicamente não está bem representada, sendo uma limitação do conceito da luminância equivalente da janela e sua aplicação pelo Programa APOLUX.



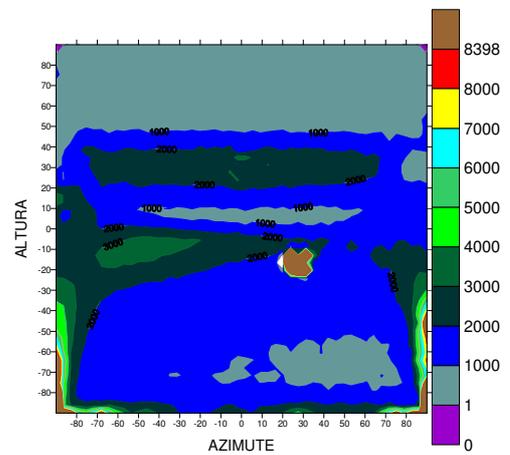
1 PH: Vista Lateral Esquerda



10 PH: Vista Lateral Esquerda



1 PH: Vista do Plano da Abertura

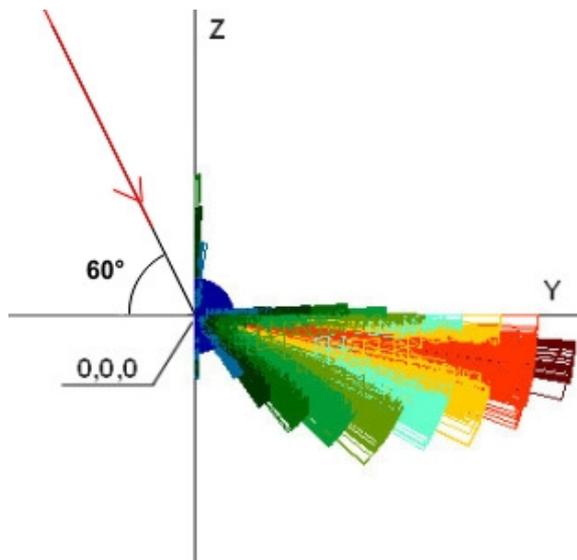


10 PH: Vista do Plano da Abertura

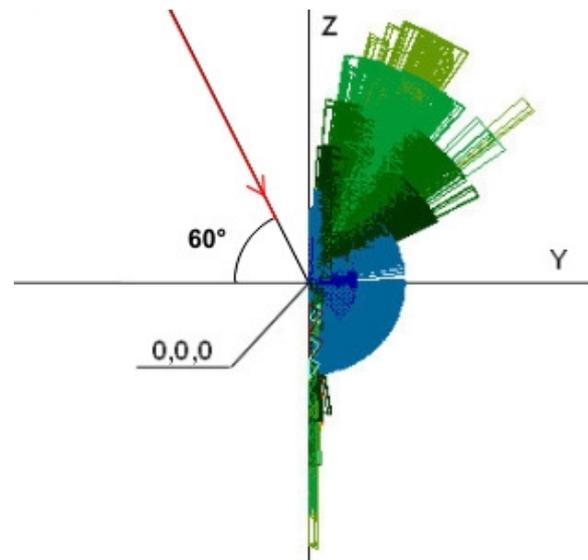
Figura 7 – Distribuição espacial e identificação quantitativa da luz natural admitida para 1 PH e 10 PH: ALT 30° e Δ AZI 60°

Na Figura 8 adiante, na mesma condição de proteção solar, devido o efeito da reflexão da luz nas placas horizontais, na situação de 1 PH a recepção da luz difusa é dominante e se direciona mais para a parte inferior da abertura, uma vez que existe pouca luz refletida (apenas no peitoril e espessura de parede). Já na situação de 10 PH, a reflexão da luz nas placas horizontais direciona uma maior parte da luz na direção superior da abertura.

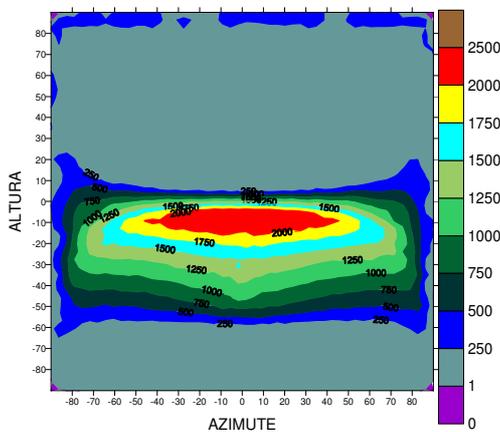
Conforme observado na Figura, devido ao azimute zero existe uma distribuição simétrica dos valores de luminância equivalente da janela (L_{equiv}) a partir do centro da janela (ponto 0,0,0) para os lados direito e esquerdo, com valores na sua maioria até 2.499 cd/m^2 (na cor vermelha), e máximos acima de 2.500 cd/m^2 (na cor marrom). A direcionalidade identificada da luz junto ao azimute 0° e na direção do hemisfério inferior, deve-se à fonte de luz difusa existente, com maior luminância do céu nesta direção de azimute e com a altura 60° , atingindo valores acima de 2.500 cd/m^2 . Na vista lateral esquerda identifica-se o efeito da luz natural difusa admitida com valores na sua maioria até 2.499 cd/m^2 (na cor vermelha) e máximos acima de 2.500 cd/m^2 (na cor marrom). O efeito da reflexão da luz na espessura do peitoril com refletância de 75% está representado junto ao hemisfério superior, com valores na sua maioria de 1 a 249 cd/m^2 (na cor azul-escuro). Foram identificados ainda valores de L_{equiv} na direção da parte inferior da abertura, representativo do efeito cosseno; estes valores na sua maioria estão entre 250 e 1.000 cd/m^2 para o hemisfério superior e entre 250 e 750 cd/m^2 para o hemisfério inferior.



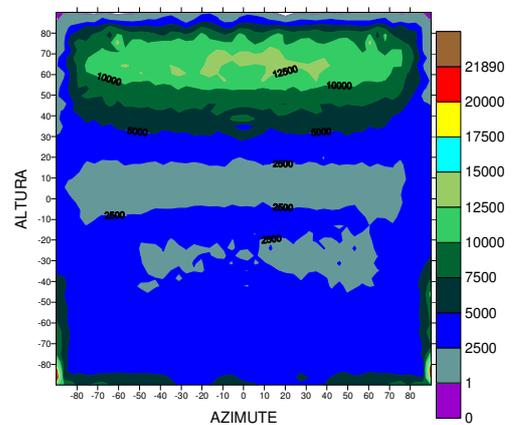
1 PH: Vista Lateral Esquerda



10 PH: Vista Lateral Esquerda



1 PH: Vista do Plano da Abertura



10 PH: Vista do Plano da Abertura

Figura 8 – Distribuição espacial e identificação quantitativa da luz natural admitida para 1 PH e 10 PH: ALT 60° e Δ AZI 0°

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise da admissão e da distribuição espacial interna da luz natural em aberturas com elementos de controle solar, a partir do desenvolvimento de um método em ambiente virtual, representativo de uma hemisfera oca com base vertical e abertura como fonte de luz natural, caracterizado como um goniôfotômetro virtual similar aos utilizados em estudos fotométricos laboratoriais. A análise foi implementada com uso do programa de simulação computacional do comportamento da luz natural APOLUX 1.0 em aberturas sob o efeito da variação da geometria dos ECS.

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.

Os resultados analisados identificaram a variação esperada (redução e/ou aumento) da admissão quantitativa de luz quando da comparação de diferentes tipos de ECS (1 PH e 10 PH) na janela. Quanto à sua distribuição espacial para o hemisfério interior, quando da adição de placas nos diferentes tipos de ECS na janela desimpedida, 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 nestas 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).

Devido ao 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 a 90 graus foi marginalmente superestimado, numa distorção dos valores que indica alguma limitação na aplicação do conceito adotado para o modelo hemisfera oca. Esta distorção necessita ser melhor investigada em futuros estudos, visando maior precisão.

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

6. REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, Marilyne, DE BOER, Jan (2006) "**Goniophotometry and assessment of bidirecional photometric properties of complex fenestration systems**". Energy and Buildings, Vol. 38, pp.836-848.
- BOGO, Amilcar José (2007). **Método para Avaliação da luz Natural através de Aberturas com Elementos de Controle Solar**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.
- CLARO, A., PEREIRA, F. O. R., AGUIAR, G. P. (2003) "**Desenvolvimento do Protótipo do Software LuzSolar para Análise e Projeto de Iluminação Natural em Arquitetura e Urbanismo**". 1º Fórum de Pesquisa & Desenvolvimento da CELESC, Florianópolis/SC.
- DE BOER, Jan (2006). "**Modelling indoor illumination by complex fenestration systems based on bidirecional photometric data**". Energy and Buildings, Vol. 38, pp.849-868.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. (1999) "**Measurement of luminous characteristics of daylighting materials**". A Report of IEA SHCP Task 21/ECBCS Annex29.
- KESSEL, Jeffrey, SELKOWITZ, Steve (1984) "**Integrating sphere measurements of directional-hemispherical transmittance of window systems**". Journal of IES, October.
- LBL. Facilities. **The Bidirecional Radiometric Scanner**. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. Disponível em <http://windows.lbl.gov/facilities/radiometer/radiometer.html>, 2004.
- MAAMARI, Fawaz, ANDERSEN, Marilyne, BOER, Jan de, CARROLL, William, DUMORTIER, Dominique, GREENUP, Phillip. **Experimental validation of simulation**. Energy and Buildings, Vol. 38, pp.878-889, 2006.
- MCCLUNEY, R. (1987) "**Determining solar radiant heat gain of fenestration systems**". Passive Solar Journal, Vol. 4, no. 4, pp 439-487.
- PAPAMICHAEL, K., KLEMS, J., SELKOWITZ, S. (1988) "**Determination and application of bidirecional solar-optical properties of fenestration systems**". 13th National Passive Solar Conference. Massachusetts Institute of Technology. LBL-25124, March.
- PEREIRA, ROBERTO CARLOS. **Metodologia Para Avaliação de Ferramentas de Simulação de Iluminação Natural Através de Mapeamento Digital de Luminâncias**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2009.