



Avaliação quantitativa e direcional da admissão de luz natural através de janelas com elementos de controle solar

Quantitative and directional evaluation of daylight admission of windows with solar control devices

AMILCAR JOSÉ BOGO (1)
FERNANDO O. R. PEREIRA (2)
ANDERSON CLARO (3)

(1) Arquiteto e Urbanista graduado pela UFSC, Mestre e Doutor em Engenharia Civil pela UFSC, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo

Universidade Regional de Blumenau – FURB

(2) Engenheiro Civil graduado pela UFRGS, Mestre em Engenharia Civil pela UFRGS, PhD pela University of Sheffield, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

(3) Arquiteto e Urbanista graduado pela USP, Mestre pela USP-SP e Doutor em Engenharia de Produção pela UFSC, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

arqbogo@furb.br (1)
feco@arq.ufsc.br (2)
ander@arq.ufsc.br (3)

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação quantitativa e direcional da luz natural admitida através de janelas com elementos de controle solar - ECS, produzindo informações sobre o fluxo luminoso resultante e sua distribuição espacial. O método baseia-se na definição de um modelo virtual análogo ao goniofotômetro, 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 janela 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 o menor tempo de análise, menor custo e facilidade de acesso à maioria dos pesquisadores.

Palavras-chave: iluminação natural; fluxo luminoso; janelas; elementos de controle solar

Abstract

The aim of the study is to presents the quantitative and directional evaluation of daylight admission of windows with solar control devices - SCD, 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: daylighting; luminous flux; windows; solar control devices

Avaliação quantitativa e direcional da admissão de luz natural através de janelas com elementos de controle solar

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

Numa janela 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.

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

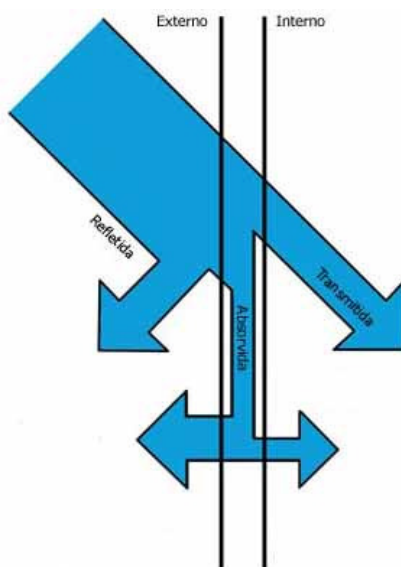


FIGURA 1 – Radiação solar incidente num vidro e as parcelas transmitida, refletida e absorvida

A adição de obstáculos junto à janela, como os ECS, conforme visto na Figura 2, 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 janela, e a variação da direção da luz para o ambiente interno devido aos múltiplos processos de reflexões entre os elementos de controle solar.

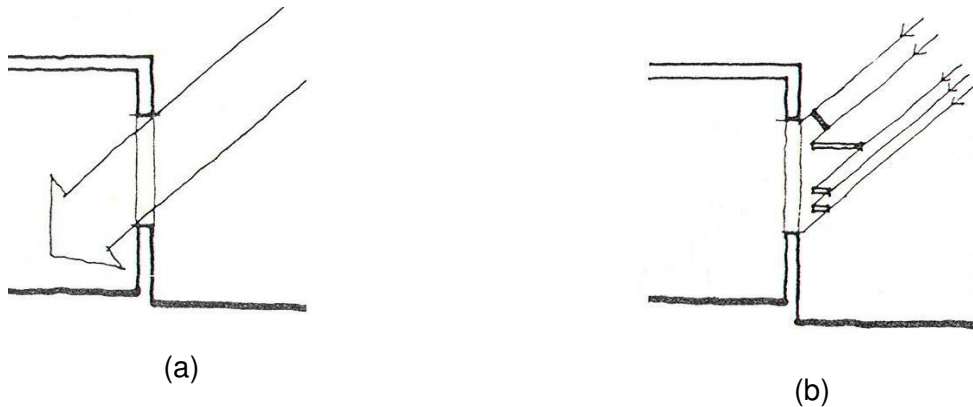


FIGURA 2 – Incidência de luz natural em dois tipos de janelas de uma edificação.

Segundo Papamichael, Klems, Selkowitz (1988) e International Energy Agency- IEA (1999), para a caracterização do comportamento radiante de janelas 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 janela e a segunda avalia a distribuição espacial dessa luz.

Nas Figuras 3 e 4 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} .

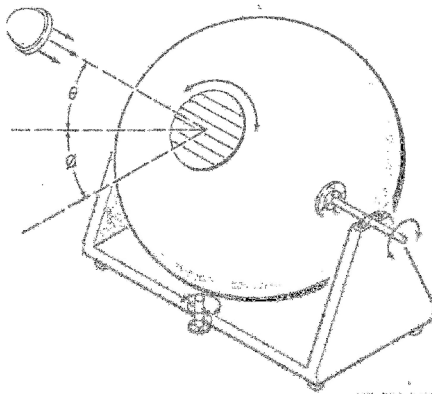


FIGURA 3: Radiômetro escaneador direcional pelo uso da esfera integradora (Fonte: KESSEL e SELKOWITZ, 1984)

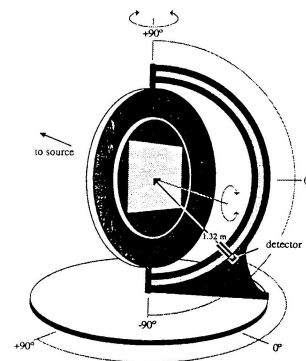


FIGURA 4 - Radiômetro escaneador bidirecional (Fonte: PAPANICHAEL, KLEMS e SELKOWITZ, 1988)

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 janelas 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 janelas, 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 re-direcionador, 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 janelas com ECS.

2. OBJETIVO

Analisar o efeito do controle solar e da admissão de luz natural em janelas com proteção solar, a partir de um método caracterizador do comportamento luminoso de janelas com ECS, implementado num modelo virtual 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 janelas com ECS, através da determinação dos seguintes parâmetros: fluxo luminoso admitido na janela (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 janela, caracterizando uma fonte de luz, conforme a Figura 5 (BOGO, 2007). Este ambiente virtual de simulação é identificado na literatura como o modelo de estudo ideal para caracterização luminosa de janelas quanto à luz admitida e sua distribuição espacial no interior, (ANDERSEN e DE BOER, 2006), conforme ilustrado na Figura 6.

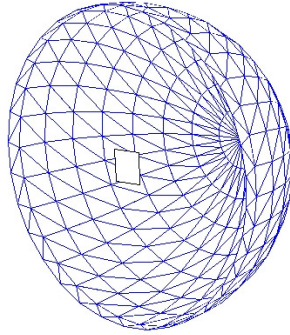


FIGURA 5 – Modelo hemisfera oca com janela para estudo da admissão quantitativa e direcional da luz natural

Fonte: Bogo (2007)

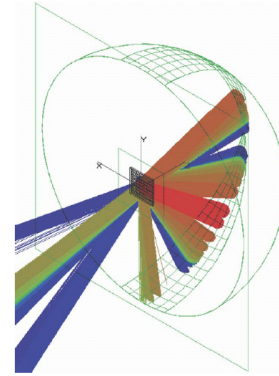


FIGURA 6 – Modelo de configuração ideal com Sol virtual e detector hemisférico da transmissão bidirecional da luz através de um sistema de janelas

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 janela (Δ Azi) de 0 e 60°, a partir da direção normal à janela 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 janela, 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 janela 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 ($Lequiv$), identificado no interior da hemisfera segundo direções a partir do centro da janela foi obtida conforme a Equação 02, de acordo com Papamichael, K., Klems, J., Selkowitz, S. (1988):

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

onde: E = iluminância na superfície interior da hemisfera;

A = área da janela;

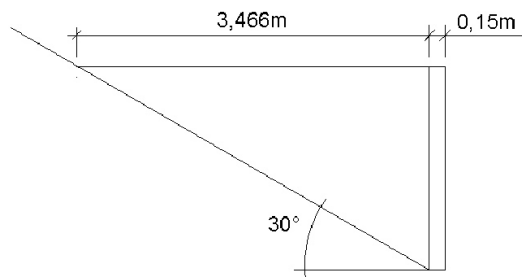
r = raio interno da hemisfera;

θ = ângulo formado entre a direção normal à janela e o raio de luz refletido internamente.

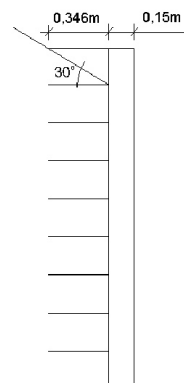
Cabe salientar, que embora seja utilizada a analogia com o goniofotômetro, a janela caracteriza-se como uma fonte superficial e, como tal, tem a sua fotometria caracterizada pela sua luminância e não pela intensidade luminosa como no caso de fontes pontuais.

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

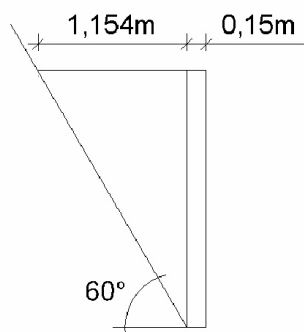
Na Figura 7 adiante são apresentadas as características geométricas dos ECS analisados.



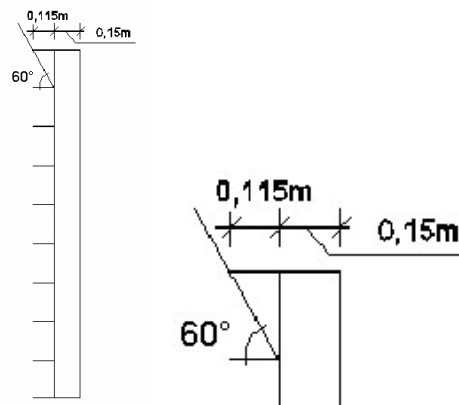
1 Placa Horizontal – 1 PH (em corte)



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 7 - Características geométricas dos ECS analisados



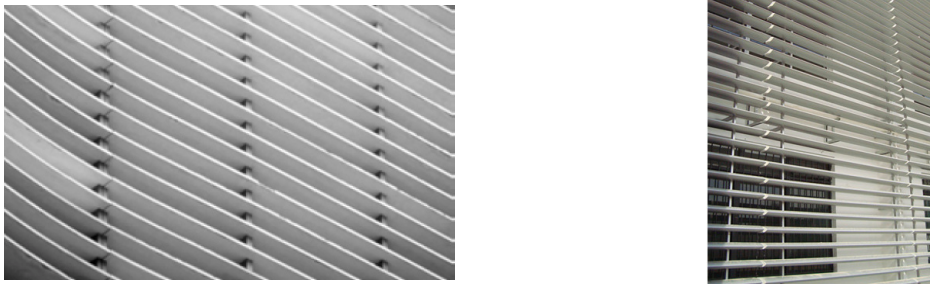


FIGURA 8 – Exemplos arquitetônicos (em detalhe) dos tipos de ECS analisados: laje em balanço e marquise; dois tipos de brises com placas horizontais.

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

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 janela, 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

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	5.637	1,7	35.145	10,7
		326.818				
ALT 30°	Δ AZI 60°	Φ Ext	4.222	3,7	15.375	13,7
		111.693				
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 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	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

Conforme observado na Tabela 2, para uma mesma situação de sombreamento da janela 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).

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, inicialmente para 2 tipos de ECS (1 PH e 10 PH), conforme as Figuras 9 a 12 adiante:

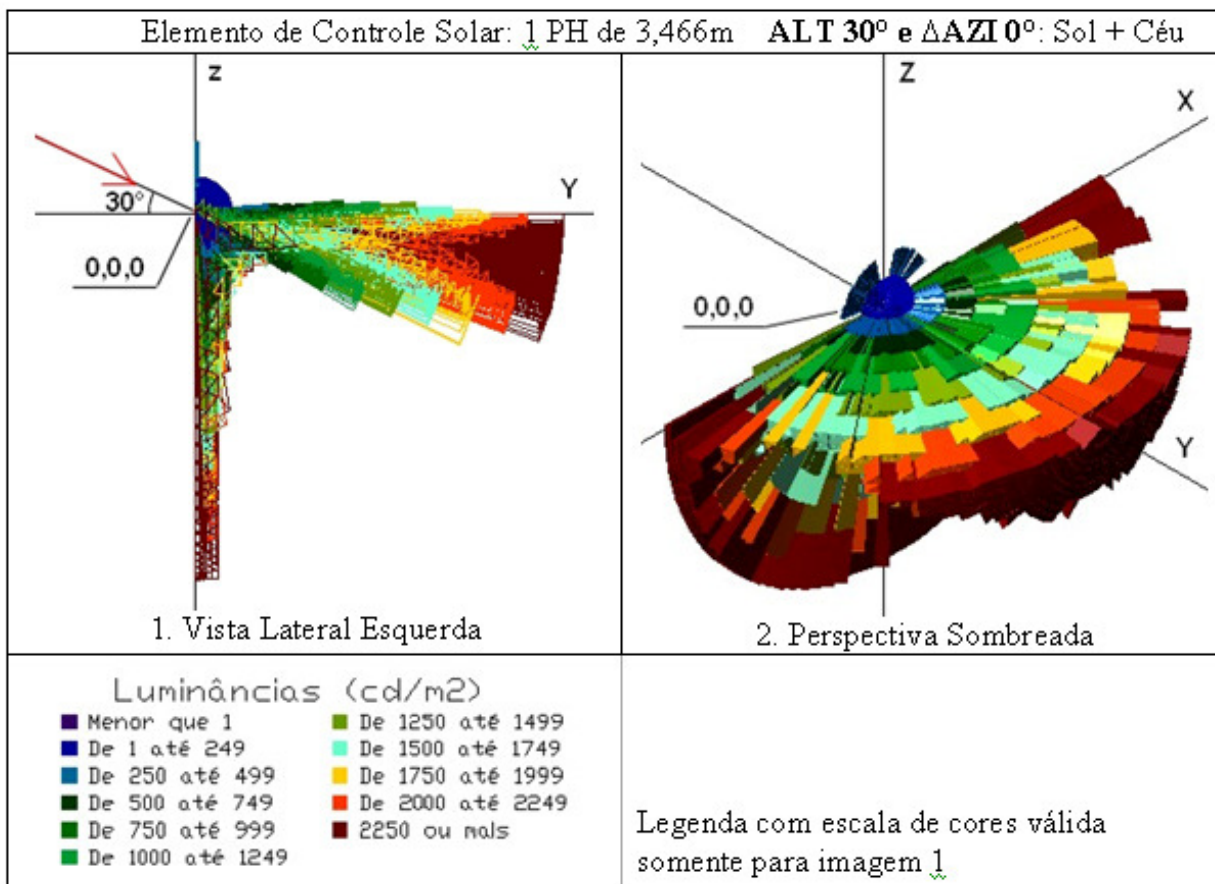


FIGURA 9 - Distribuição espacial da luz admitida segundo a luminância equivalente da janela, segundo gráfico de coordenadas polares, para situação de 1 PH (1 placa horizontal tipo marquise).

A existência de uma placa horizontal sobre a janela 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 circumsolar. 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).



ECS do tipo 1 PH de 3,466m

Espessura de parede e peitoril: 0,15m Refletância dos ECS: 75%

ALT 30° Δ AZI 0°: Sol + Céu

1 placa horizontal sobre a janela como uma marquise.

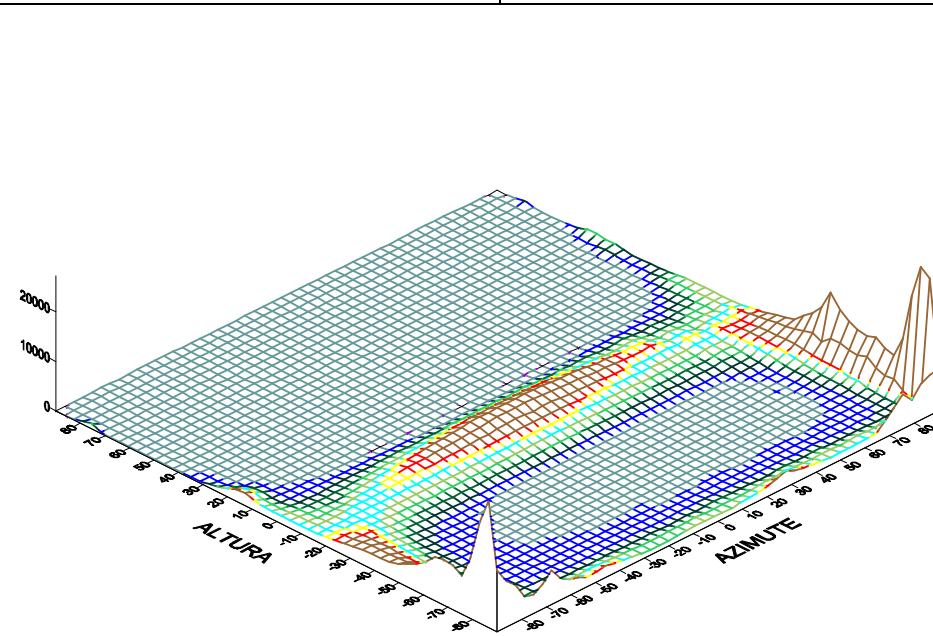
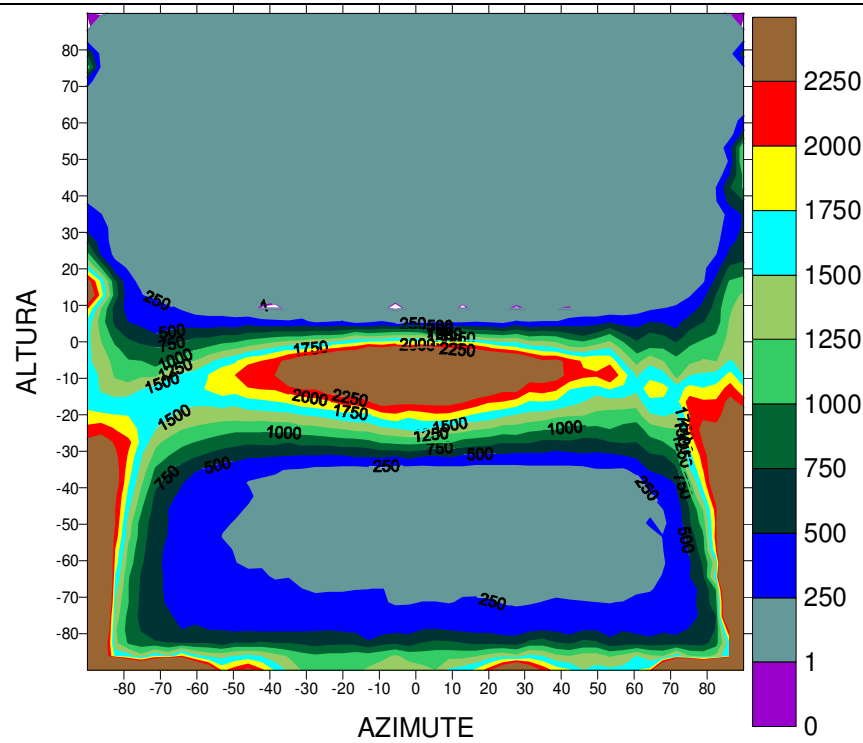
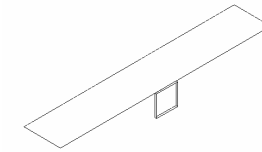
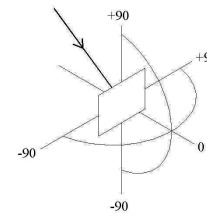


FIGURA 10 - Distribuição espacial da luz admitida em coordenadas X (azimute), Y (altura) e Z (luminância equivalente da janela) para situação de 1 PH.



Elemento de Controle Solar (ECS): 10 PH de 0,346m ALT 30° e Δ AZI 0°: Sol + Céu

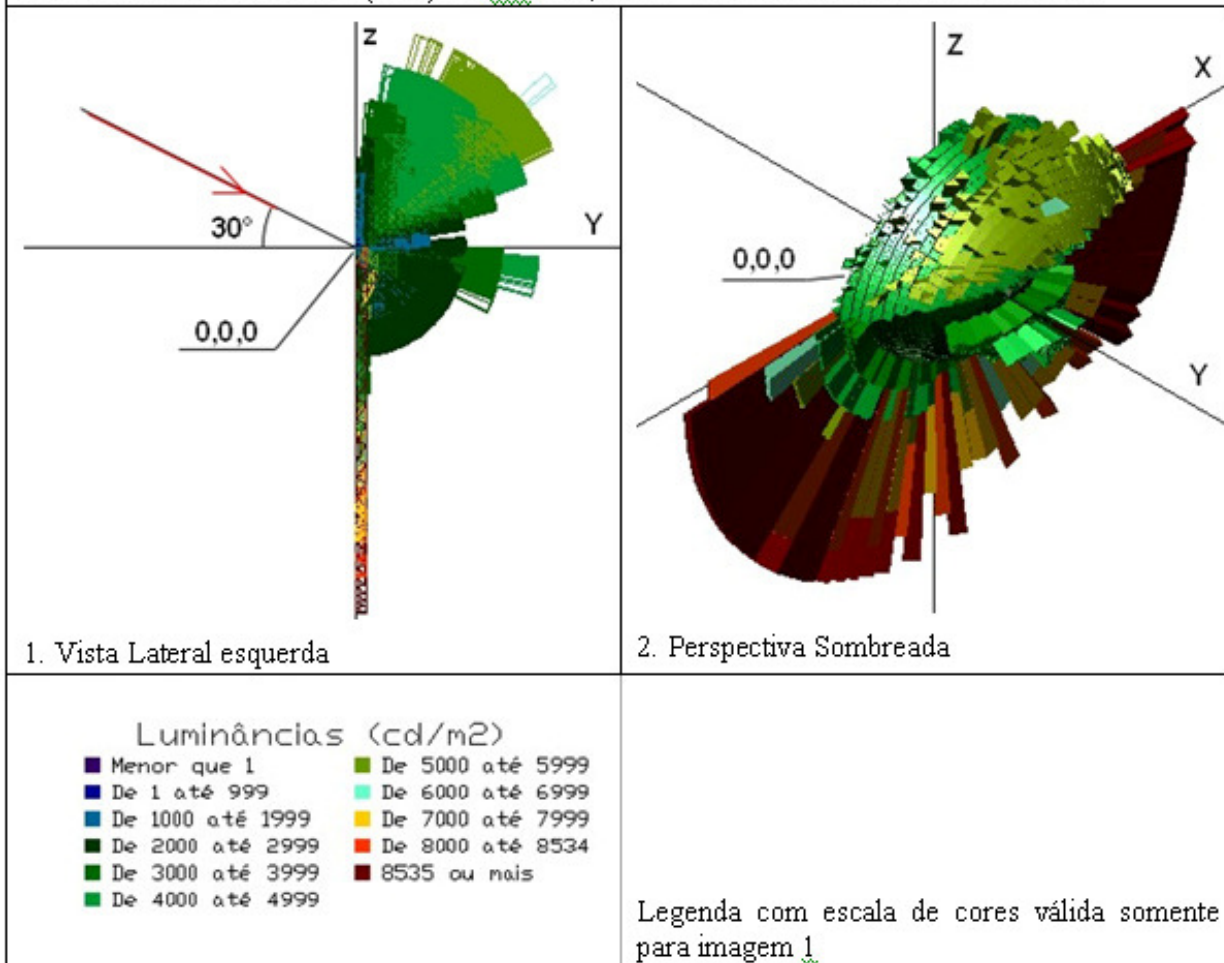


FIGURA 11 - Distribuição espacial da luz admitida segundo a luminância equivalente da janela, através de coordenadas polares, para situação de 10 PH (10 placas horizontais tipo brise)

A existência de 10 placas horizontais sobre a janela também bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol perpendiculares à janela, 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 na sua maioria 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 do CAD, a distribuição espacial da luz devido a luminância equivalente da janela pode ser igualmente melhor observada, desde o centro da janela (ponto 0,0,0), para os dois lados e na direção do hemisfério inferior.

ECS do tipo 10 PH de 0,346m

Espessura de parede e peitoril: 0,15m Refletância dos ECS: 75%

ALT 30° e Δ AZI 0°: Sol + Céu

10 placas horizontais sobre a janela como brises horizontais

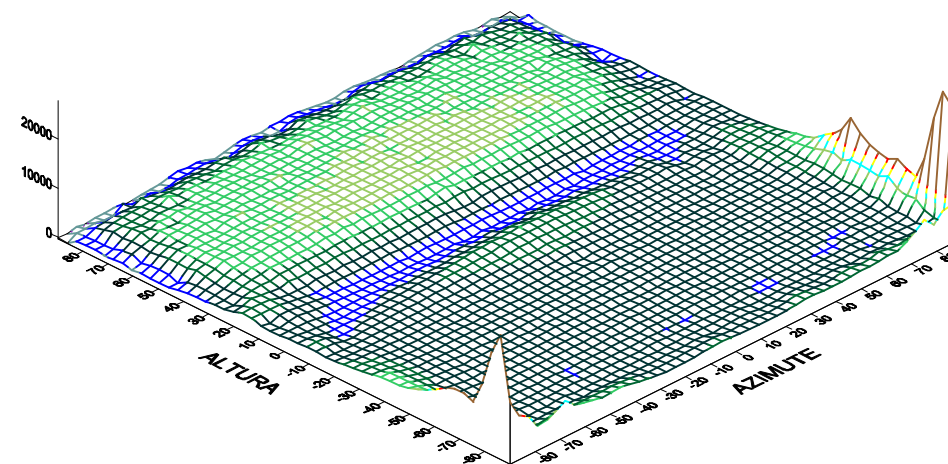
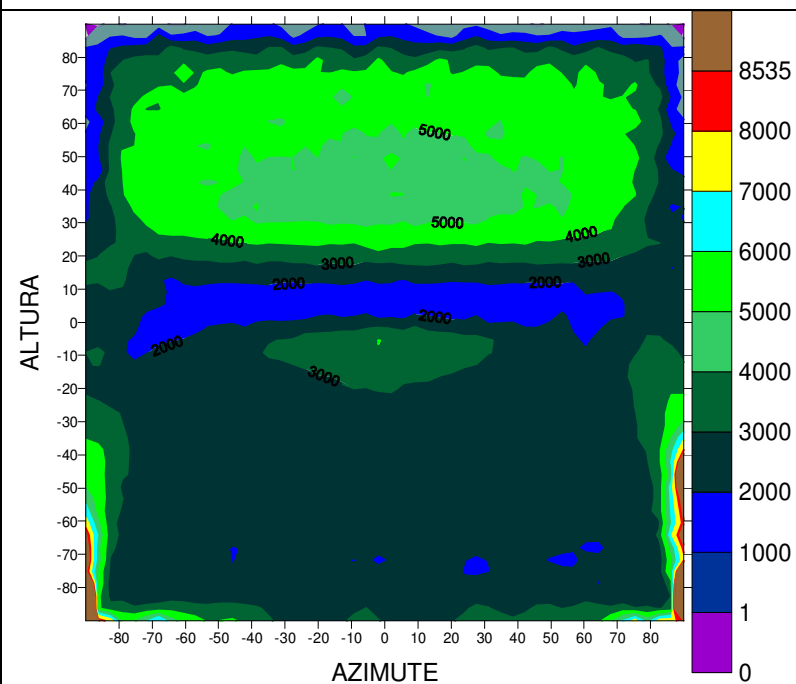
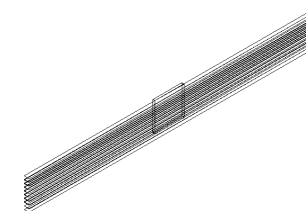
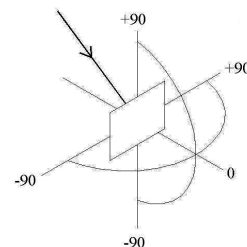
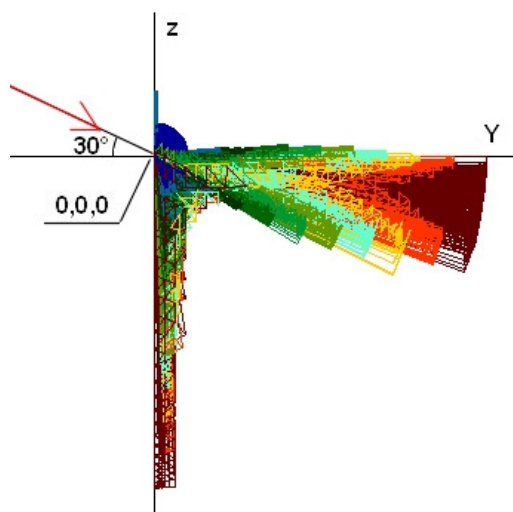


FIGURA 12 - Distribuição espacial da luz admitida em coordenadas X (azimute), Y (altura) e Z (luminância equivalente da janela) para situação de 10 PH

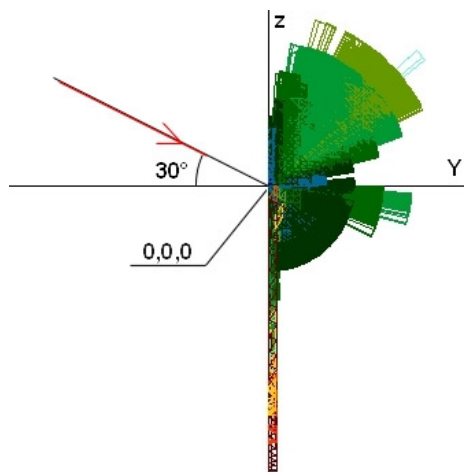
A seguir, nas Figuras 13, 14 e 15 são apresentados os gráficos de luminância equivalente da janela, comparando 1 PH com 10 PH, com fonte de luz (Sol + céu) nas seguintes situações: ALT 30° e Δ AZI 0°; ALT 30° e Δ AZI 60°

Na figura 13, a existência de uma placa horizontal sobre a janela bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol na posição ALT 30° e ΔAZI 0°, sendo a luz admitida proveniente somente do céu, este com maior luminância junto à posição circumsolar. 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.

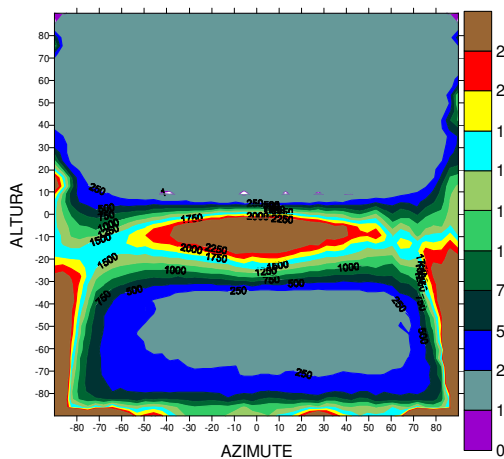
Na mesma condição de proteção solar, na situação de 1 PH, a recepção da luz difusa é dominante e se direciona mais para a parte inferior da janela, uma vez que existe pouca luz refletida (apenas no peitoril e espessura de parede). Já na situação de 10 PH, a reflexão da luz nas placas horizontais direciona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



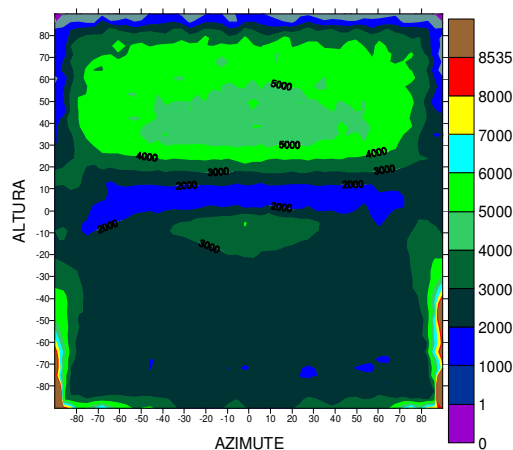
1 PH: Vista Lateral Esquerda



10 PH: Vista Lateral Esquerda



1 PH: Vista do Plano da Janela



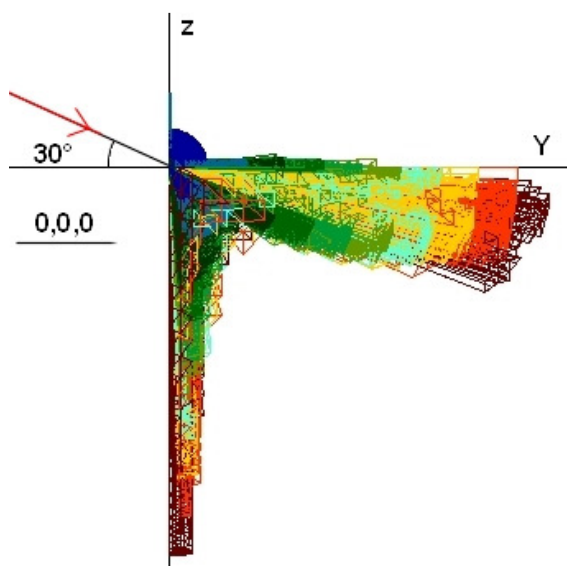
10 PH: Vista do Plano da Janela

FIGURA 13 – Distribuição espacial da luz natural admitida para 1 PH e 10 PH: ALT 30° e Δ AZI 0°

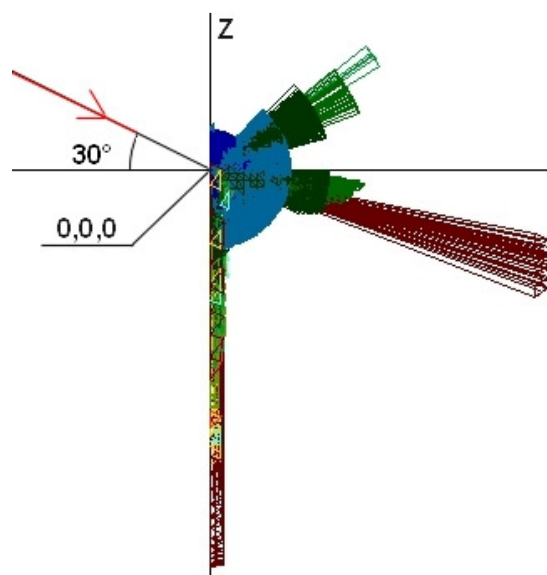
Na Figura 14 adiante, a existência de uma placa horizontal sobre a janela bloqueia totalmente a entrada dos raios diretos do Sol oblíquos à janela (vindos do lado direito), sendo a luz admitida proveniente somente do céu, este com maior luminância junto à posição circunsolar, ou seja, de acordo com a 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/m^2 .

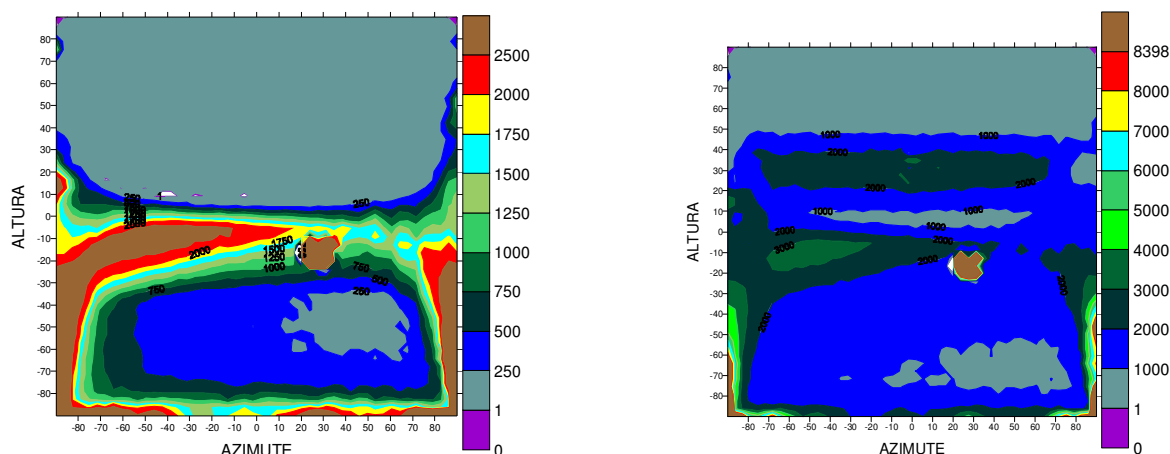
Na vista lateral esquerda identifica-se o efeito da luz natural difusa admitida na incidência de altura 30 graus. O efeito da reflexão da luz na espessura do peitoril com refletância de 75% está representado junto ao hemisfério superior, com valores na sua maioria até 249 cd/m^2 . Foram identificados ainda os maiores valores de L equiv próximo a parte inferior da janela, representativo do efeito cosseno, com valores de 12.000 a 28.000 cd/m^2 ; 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



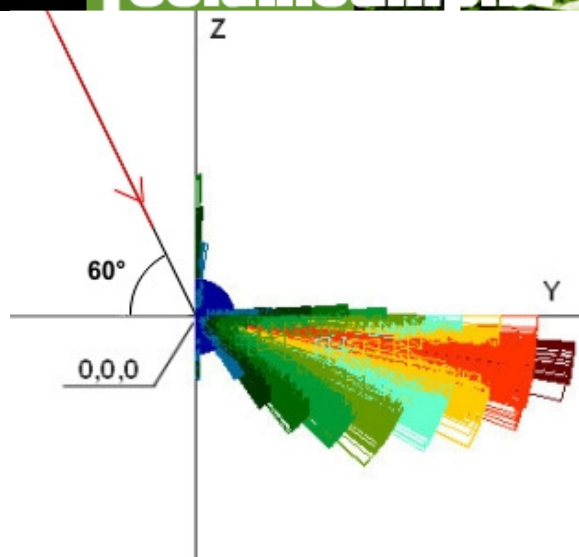
1 PH: Vista do Plano da Janela

10 PH: Vista do Plano da Janela

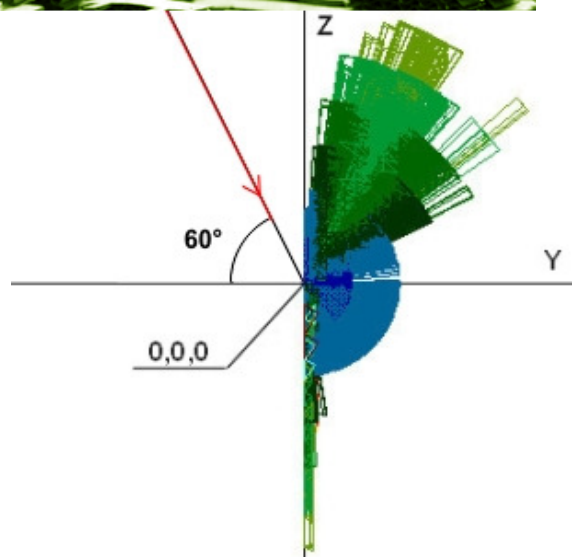
FIGURA 14 – Distribuição espacial da luz natural admitida para 1 PH e 10 PH: ALT 30° e Δ AZI 0°

Na Figura 15 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 janela, 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 janela.

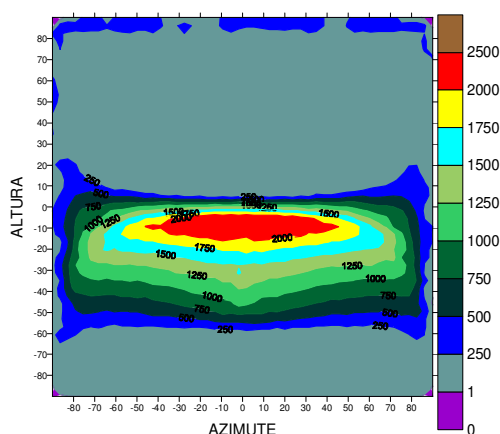
Conforme observado na figura, devido ao azimute zero existe uma distribuição simétrica dos valores de luminância equivalente da janela (L_{equiv}) a partir do centro da janela (ponto 0,0,0) para os lados direito e esquerdo, com valores na sua maioria até 2.499 cd/m^2 (na cor vermelha), e máximos acima 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 janela, 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.



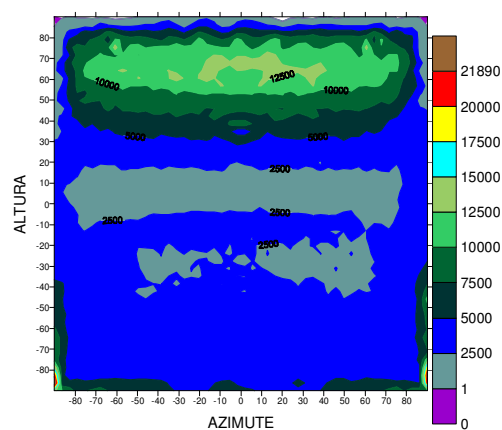
1 PH: Vista Lateral Esquerda



10 PH: Vista Lateral Esquerda



1 PH: Vista do Plano da Janela



10 PH: Vista do Plano da Janela

FIGURA 15 – Distribuição espacial 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 janelas com elementos de controle solar, a partir do desenvolvimento de um método em ambiente virtual, representativo de uma hemisfera oca com base vertical e janela como fonte de luz natural, caracterizado como um goniofotômetro 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 janelas 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 janelas 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 janela 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 Janelas 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 Bidirectional Radiometric Scanner.** Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California. Disponível em <http://windows.lbl.gov/facilities/radiometer/radiometer.html>, 2004.

MAAMARI, Fawaz, ANDERSEN, Marilynne, 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.