

Janela de céu preferível: proposição de um parâmetro para controle da disponibilidade de luz natural no meio urbano

Preferential sky window: proposal of a new parameter to control urban daylight access

Solange Maria Leder
Fernando Oscar Ruttkay Pereira
Anderson Claro

Resumo

A iluminação natural em um ambiente interno é fortemente influenciada pelas condições de obstrução do entorno. Considerando essa premissa, a legislação urbana deve estabelecer limites de ocupação do solo e, conseqüentemente, de obstrução do céu, objetivando a garantia do direito à radiação solar e à luz natural. O presente trabalho visa ao desenvolvimento e proposição de um parâmetro de controle do direito à luz natural no meio urbano. A caracterização desse parâmetro compreende três aspectos principais: a) a contribuição de luz relativa de diferentes parcelas da abóbada celeste; b) o efeito redutor associado ao cosseno do ângulo de incidência; e c) o percentual de visibilidade da abóbada pelo ambiente interno. A consideração dessas três variáveis permitiu a caracterização do efetivo potencial de iluminação da abóbada celeste no ambiente interno e definiu o parâmetro de controle da luz natural no meio urbano, proposto neste trabalho e denominado de janela de céu preferível (JCP). A análise da luz natural em um ambiente interno e proveniente da JCP seguida pela comparação com a luz natural proveniente da área de céu remanescente confirmou a confiabilidade do referido parâmetro. O comportamento da iluminação natural foi simulado por método computacional. O parâmetro proposto apresenta grande possibilidade de utilização na legislação urbana, com o objetivo de garantir a disponibilidade de luz natural.

Palavras chave: Luz natural. Iluminação natural. Sustentabilidade urbana.

Abstract

Indoor daylighting is strongly influenced by sky obstruction by the urban environment. Considering this premise, urban legislation may set limits of land use to provide and to protect the right to daylight and solar access. This study proposes a daylight accessibility control parameter for the urban environment. The characterization of this parameter takes into account three aspects: i) relative lighting contribution of several sky vault patches, ii) light incidence angle cosine effect, and iii) the indoor sky vault visibility percentage. The integration of these aspects allowed the characterization of the effective lighting potential of the sky indoors, and the definition of a sky area, called Preferential Sky Window. Daylight performance of the Preferential Sky Window in an indoor environment was analyzed. Results showed strong correlation between the proposed parameter and indoor daylighting performance. Daylight performance was simulated by a computational method. The proposed could be extensively used in building regulations to safeguard daylight availability.

Keywords: Daylight. Daylighting. Sustainable urban environment.

Solange Maria Leder
Sociedade Educacional de Santa
Catarina
Instituto Superior de Tecnologia
Rua Albano Schmidt, 3333
Bairro Boa Vista
Joinville - SC - Brasil
CEP 89206-001
Tel.: (47) 3461-0245
E-mail:
solange.leder@sociesc.org.br

**Fernando Oscar Ruttkay
Pereira**
Departamento de Arquitetura
Universidade Federal de Santa
Catarina
Campus Trindade
Florianópolis -SC - Brasil
CEP 88040-900
Tel.: (48) 3331-7080
E-mail: feco@arq.ufsc.br

Anderson Claro
Departamento de Arquitetura
Universidade Federal de Santa
Catarina
Tel.: (48) 3316-9393
E-mail: ander@arq.ufsc.br

Recebido em 18/01/08
Aceito em 11/04/08

Introdução

A magnitude da luz natural em um ponto de um ambiente interno depende, em parte, do tamanho do trecho do céu que possa ser visto desse ponto. Para Ünver *et al.* (2003), a obstrução do céu se caracteriza como um dos fatores de maior influência na luz natural presente no ambiente interno. Indicadores de controle da obstrução do céu, como os propostos por Hopkinson, Petherbridge e Longmor (1975) e Littlefair (2001), tem como objetivo preservar o acesso à iluminação proveniente da abóbada celeste e consistem em ângulos sob os quais a visão do céu deve estar desobstruída, partindo de um ponto na fachada ou limite do terreno, garantindo à edificação condições mínimas de acesso à luz natural, assim como de insolação. Contudo, esses indicadores apontam limitações tais como a desconsideração dos vazios entre edificações, que podem aportar significativas quantidades de luz natural em um ponto.

No contexto atual destacam-se os estudos de NG (2005a, 2005b) para a cidade de Hong Kong. O autor considera os estudos de Hopkinson, Petherbridge e Longmor (1975), Littlefair (2001) e Tregenza (1993), e propõe o parâmetro denominado de Área de Visão Desobstruída (AVD), que consiste na determinação de um cone de visão do céu, delimitado por ângulos horizontais (azimutais) e verticais (altitude). Capeluto (2003) também propõe um parâmetro similar, denominado de Ângulo Sólido do Céu, que consiste na identificação do ângulo sólido referente à parte visível do céu para um ponto localizado no centro de uma abertura em análise.

O parâmetro proposto neste trabalho consiste na caracterização de uma zona angular no céu, Janela de Céu Preferível, limitada por ângulos de azimute e altitude, que apresenta maior potencial de iluminação da abóbada celeste, tendo como alvo o ambiente interno.

Metodologia

A metodologia utilizada no desenvolvimento do parâmetro janela de céu preferível compreendeu duas etapas: a) a delimitação da área de céu preferível; e b) a comprovação da hipótese. Ambas utilizam o programa Apolux (CLARO, 1998) como ferramenta de simulação computacional da iluminação natural.

A delimitação da área de céu preferível consistiu no estabelecimento de limites definidos por ângulos de azimute e altitude. Essa etapa se subdividiu em três aspectos: distribuição de

luminâncias na abóbada celeste, efeito redutor do cosseno sobre o ângulo de incidência e o percentual de visibilidade do céu em ambientes internos. A integração desses três aspectos permitiu a caracterização do efetivo potencial de iluminação da abóbada celeste no ambiente interno.

Distribuição de luminâncias na abóbada celeste

Por se constituir em uma fonte de luz superficial, a subdivisão da abóbada em zonas e a determinação das concentrações de fluxo emitidas por essas zonas (considerando dada direção) são uma forma de análise e acesso à iluminação produzida pela mesma. Com base nas propostas da ABNT (2005) e Tregenza (1993), essa etapa do trabalho consistiu na subdivisão da abóbada celeste em zonas e no cálculo da contribuição relativa de luz de cada zona.

A divisão da abóbada proposta por Tregenza consiste em 145 zonas (Figura 1), que apresentam ângulos sólidos em torno de 0,04 stereoradianos. Segundo o autor, essa divisão permite que cada zona seja tratada, com mínimos erros, como uma fonte pontual. Utilizando esse conceito e aproveitando a capacidade de discretização superficial do programa Apolux, a abóbada celeste foi dividida em 333 zonas, com ângulo sólido de aproximadamente 0,018 stereoradianos.

Na abóbada subdividida, a iluminação produzida em cada zona é definida pela sua direção e luminância e pelo ângulo sólido compreendido entre esta e o ponto iluminado (ABNT, 2005). A contribuição relativa de cada zona foi calculada utilizando-se o programa Apolux. A contribuição relativa da abóbada sobre um plano horizontal resulta da razão entre a iluminância em um ponto sobre um plano horizontal devida àquela parcela do céu e a iluminância total (produzida por toda a abóbada) sobre o mesmo ponto no plano horizontal, para condição de céu encoberto e completamente desobstruído. Por sua vez, a contribuição relativa sobre o plano vertical resulta da razão entre a iluminância em um ponto sobre um plano vertical devida àquela parcela do céu e a iluminância total (produzida por toda a abóbada) sobre um ponto em um plano horizontal para as mesmas condições de céu e de obstrução.

Efeito redutor do cosseno do ângulo de incidência

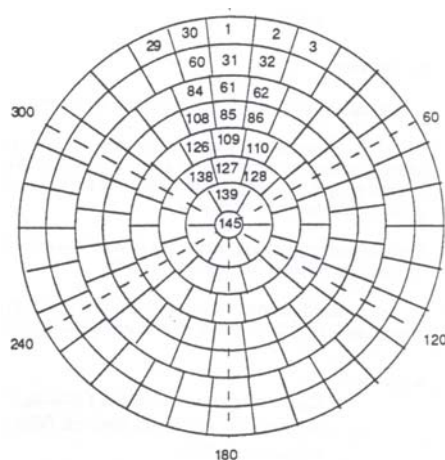
É amplamente conhecido o efeito de redução da iluminância numa superfície produzido pelo aumento do ângulo de incidência da luz que atinge a mesma. Quanto maior o ângulo, maior a redução da iluminância resultante, sendo esta redução representada pelo cosseno deste ângulo. A análise sobre o efeito cosseno objetiva identificar a partir de qual ângulo a influência é mais significativa, assim como, associar o mesmo às distintas zonas da abóbada celeste.

Percentual de visibilidade do céu pelo ambiente interno

A idéia de analisar o percentual de visibilidade do céu em ambientes internos surgiu a partir do conceito definido por Lynes (1968) e Littlefair (1991) denominado de linha de não-visão do céu. A proposta consiste em determinar as áreas do ambiente interno, sobre um plano horizontal na altura de um posto de trabalho, com visão do céu.

Segundo os autores, a área do ambiente, sobre o referido plano, fora da linha de visão do céu apresenta menor possibilidade de aproveitamento da luz natural.

Partindo da proposta de Lynes (1968) e de Littlefair (1991), propõe-se neste trabalho a caracterização do percentual com que determinadas parcelas do céu são vistas no ambiente interno (Figura 2), evoluindo da análise bidimensional proposta pelos referidos autores (corte e planta baixa) para uma análise tridimensional, possível de ser implementada com o auxílio do programa Apolux. O conceito consiste em identificar quais parcelas da abóbada são visualizadas o maior número de vezes no ambiente interno, partindo do pressuposto de que essas parcelas da abóbada são mais representativas na iluminação do ambiente interno. Tomando como exemplo a Figura 2, as parcelas mais próximas do zênite apresentam uma área de alcance, sobre o plano, muito reduzida, enquanto parcelas mais próximas do horizonte apresentam alcance maior, portanto vistas um maior número de vezes.



Fonte: Tregenza (1993)

Figura 1 - Proposta de divisão da abóbada em 145 zonas

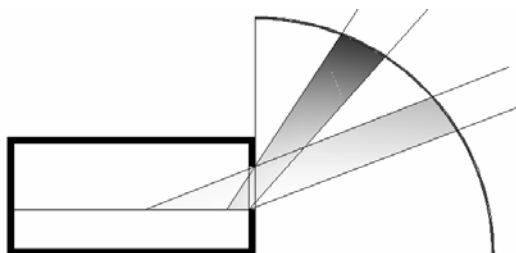


Figura 2 - Parcelas do céu com maior visão sobre um plano horizontal no ambiente interno

Para esta abordagem adotou-se uma divisão da abóbada em 745 zonas, com ângulos sólidos de dimensão aproximada (0,008 stereradianos). O aumento do número de divisões possibilita maior definição e precisão das zonas de maior influência. O programa Apolux foi a ferramenta computacional utilizada. Assim como a abóbada, o plano de análise encontra-se dividido em parcelas, representadas por seus vértices. O percentual de visibilidade das zonas da abóbada (PVcéu) no ambiente interno é a razão entre o número de vértices sobre o plano de trabalho visualizados por determinada zona da abóbada celeste e o número total de vértices no plano de análise (Equação 01). A altura do plano de análise é a mesma do peitoril da abertura, 1 metro.

$$PV_{céu} = \frac{V_{vistos}}{V_{total}} \times 100$$

(1)

sendo:

V_{vistos} = número de vértices vistos de determinada zona da abóbada celeste; e

V_{total} = número total de vértices situados no plano de análise.

A configuração do ambiente, assim como da abertura, influencia no desempenho da iluminação natural. Considerando essa premissa, adotaram-se diferentes configurações de ambiente interno (largura e profundidade) e dimensões de aberturas, apresentados no Quadro 1. A área da abertura é de 1/6 e 1/8 da área do ambiente; a área do ambiente é de 30,00 m². As aberturas foram posicionadas no centro da parede ou na lateral direita.

O diagrama resultante consiste na projeção da abóbada subdividida em parcelas ou zonas. Cada parcela apresenta um valor que corresponde ao percentual de vértices do ambiente que visualizam aquela parcela. As parcelas que apresentam valor zero não são visualizadas pelo plano horizontal localizado no ambiente interno, enquanto parcelas com valor igual a 100 seriam vistas em toda a superfície do plano no ambiente interno.

Potencial de iluminação do céu sobre um plano no ambiente interno

Por fim, o potencial de iluminação do céu sobre um plano no ambiente interno representa o percentual de visibilidade do céu sobre um plano do ambiente interno pela contribuição relativa das parcelas do céu visualizadas por esse plano. Determinadas áreas do céu apresentam maior luminância, podendo apresentar maior contribuição na iluminação do ambiente interno, entretanto a contribuição efetiva delas vai depender da área do ambiente interno que as visualiza. Observando-se novamente a Figura 2, a parcela mais próxima do zênite apresenta uma luminância maior, porém é vista por pequena parcela do plano de análise, ao contrário da parcela da abóbada próxima da linha do horizonte, que possui luminância menor, porém é vista por grande parte do plano de análise, resultando em maior potencial de iluminação no ambiente interno.

Para a determinação do potencial de iluminação do céu (PIcéu) sobre um plano no ambiente interno, calcula-se o fluxo luminoso relativo a cada zona do céu e incidente sobre cada parcela do plano, e divide-se pelo fluxo luminoso total que chega nesse mesmo plano (Equação 02).

$$PI_{céu} = \frac{Fluxo_{zona}}{Fluxo_{total}} \times 100 \quad (2)$$

sendo:

$Fluxo_{zona}$ = fluxo luminoso fornecido pela zona da abóbada sobre o plano de análise; e

$Fluxo_{total}$ = fluxo luminoso total que chega ao plano de análise

O diagrama resultante consiste na projeção da abóbada subdividida em zonas. Cada zona apresenta um percentual que corresponde à contribuição relativa da parcela do céu sobre a iluminação total no ambiente interno. As parcelas com valores iguais a zero representam áreas não visualizadas pelo ambiente interno e, portanto, não contribuem diretamente na iluminação dele, enquanto as parcelas com valores elevados representam parcelas do céu de maior potencial de iluminação.

Descrição	Planta	Largura	Profundidade	Área	Abertura 1 Área = 5,00 m ²	Abertura 2 Área = 3,75 m ²
Modelo 4x7,5		4 metros	7,5 m	30 m ²	largura = 4,00 m altura = 1,25 m	largura = 3,40 m altura = 1,10 m
Modelo 5x6		5 metros	6 m	30 m ²	largura = 4,54 m altura = 1,10 m	largura = 3,40 m altura = 1,10 m
Modelo 7,5x4		7,5 metros	4 m	30 m ²	largura = 4,54 m altura = 1,10 m	largura = 3,40 m altura = 1,10 m

Quadro 1 – Relação das variáveis adotadas no ambiente interno

Análise dos resultados

A análise dos resultados compreende os aspectos apresentados na metodologia: distribuição de luminâncias na abóbada, efeito de redução do cosseno sobre o ângulo de incidência, percentual de visibilidade e potencial de iluminação da abóbada no ambiente interno, finalizando com a análise do desempenho da iluminação natural no ambiente interno, com a qual se pretende comprovar que a janela de céu preferível apresenta maior potencial de iluminação no ambiente interno.

Análise sobre a distribuição de luminâncias na abóbada

O gráfico da Figura 3 apresenta a contribuição relativa sobre o plano vertical. Por tratar-se de um plano vertical, somente metade da abóbada é visualizada. Pode-se observar que as porções da abóbada de maior contribuição sobre o plano vertical estão localizadas mais próximo da linha do horizonte. A parte mais próxima do zênite apresenta baixa contribuição, chegando a zero na última faixa.

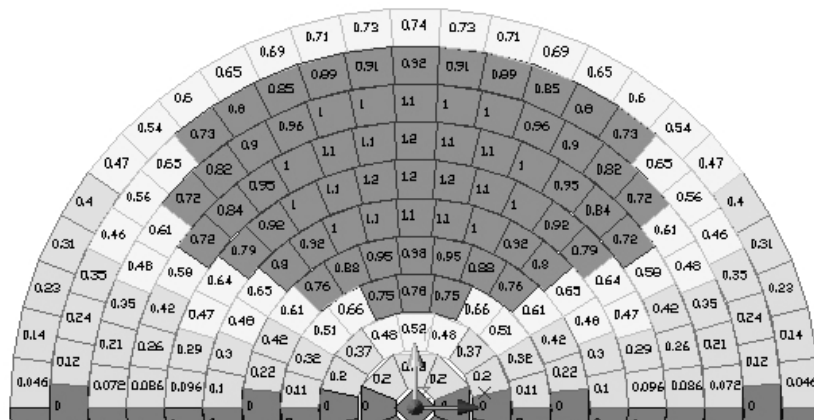
Ainda sobre o gráfico da Figura 3, observa-se que no eixo horizontal as parcelas de maior contribuição localizam-se aproximadamente sob um ângulo de 45°, à esquerda e à direita, a partir do eixo normal ao plano vertical. Destaca-se, sobretudo, que, embora a região do zênite seja a porção da maior luminância, quando a mesma

ilumina um plano vertical sua influência é reduzida.

O gráfico na Figura 4 representa a contribuição relativa de cada parcela sobre um plano horizontal. A área de maior contribuição é justamente aquela próxima ao zênite, devido à elevada luminância dessa região associada ao mínimo efeito de redução do cosseno do ângulo de incidência. As áreas próximas ao zênite também apresentam menor subdivisão, ou menor número de parcelas. Considerando-se a iluminação de um plano horizontal localizado em um ambiente interno, as áreas do céu próximas ao zênite frequentemente não são visualizadas no ambiente interno, embora essas sejam as zonas de maior contribuição para o plano horizontal.

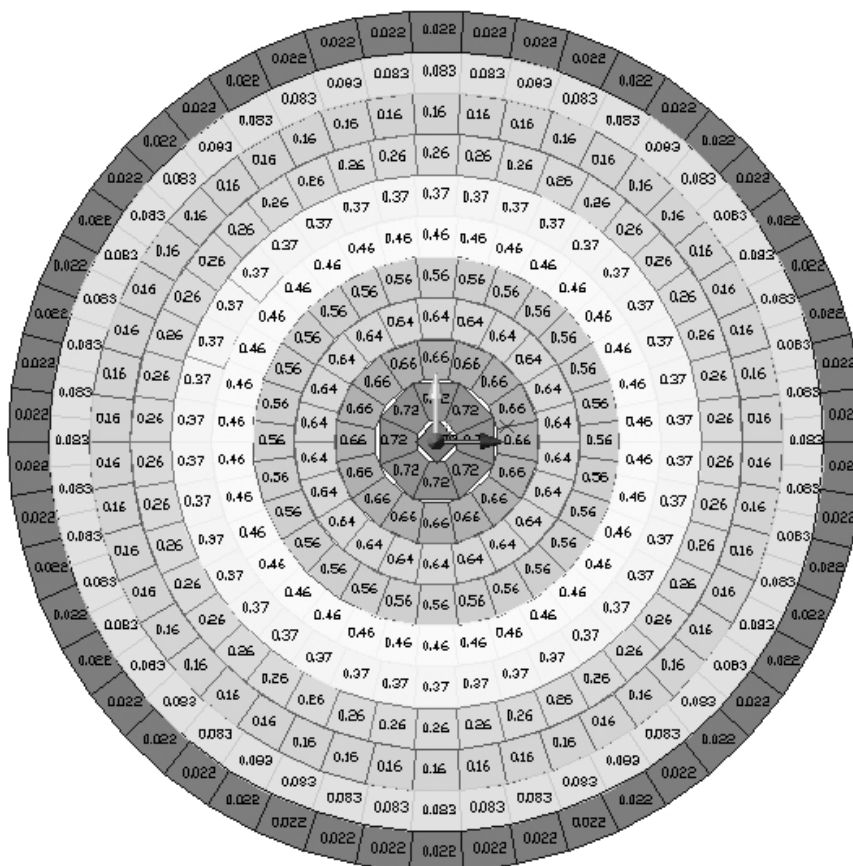
Análise do efeito cosseno sobre o ângulo de incidência

A Figura 5 representa a curva do efeito cosseno sobre o ângulo de inclinação da radiação incidente. Com o raio normal ao plano (0°), há total aproveitamento da radiação incidente. Com a inserção da inclinação, o valor inicial, correspondente a 1 no gráfico, começa a se reduzir. Destaca-se que, com 45°, metade do intervalo, ocorre uma redução de 30%. A partir desse ângulo a redução é maior, o que se pode observar pelos intervalos maiores, assinalados com pontos sobre a curva. O intervalo restante, de 45° a 90°, apresenta redução de 70%.



Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 3 - **Contribuição relativa sobre plano vertical - abóbada dividida em 333 zonas - céu encoberto**



Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 4 - **Contribuição relativa sobre plano horizontal - abóbada dividida em 333 zonas - céu encoberto**

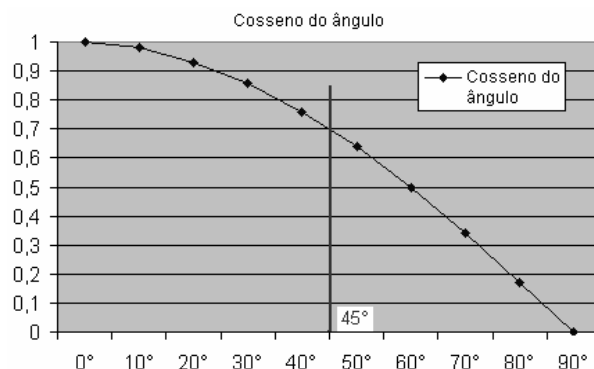


Figura 5 – Curva resultante do traçado do cosseno dos ângulos de 0° a 90°

Aplicando o efeito cosseno sobre o ângulo de incidência à abóbada celeste, pode-se concluir que as zonas posicionadas com inclinação inferior a 45° em relação ao plano iluminado são aquelas que apresentam maior potencial de iluminação.

Análise sobre o percentual de visibilidade do céu no ambiente interno

Os gráficos mostrados nas Figuras 6 e 7 representam o percentual com que determinadas zonas da abóbada celeste são visualizadas pelo ambiente interno. A abóbada foi dividida em 745 zonas, e somente meio hemisfério é visualizado.

Na Figura 6, pode-se observar que as zonas da abóbada com maior percentual de visibilidade pelo ambiente interno são aquelas próximas do horizonte (eixo vertical) e próximas à normal da abertura (eixo horizontal). No ambiente 4x7,5, que apresenta a maior profundidade dos ambientes analisados, as áreas de maior percentual estão concentradas em torno de ângulos azimutais de 25° a 30° (eixo horizontal).

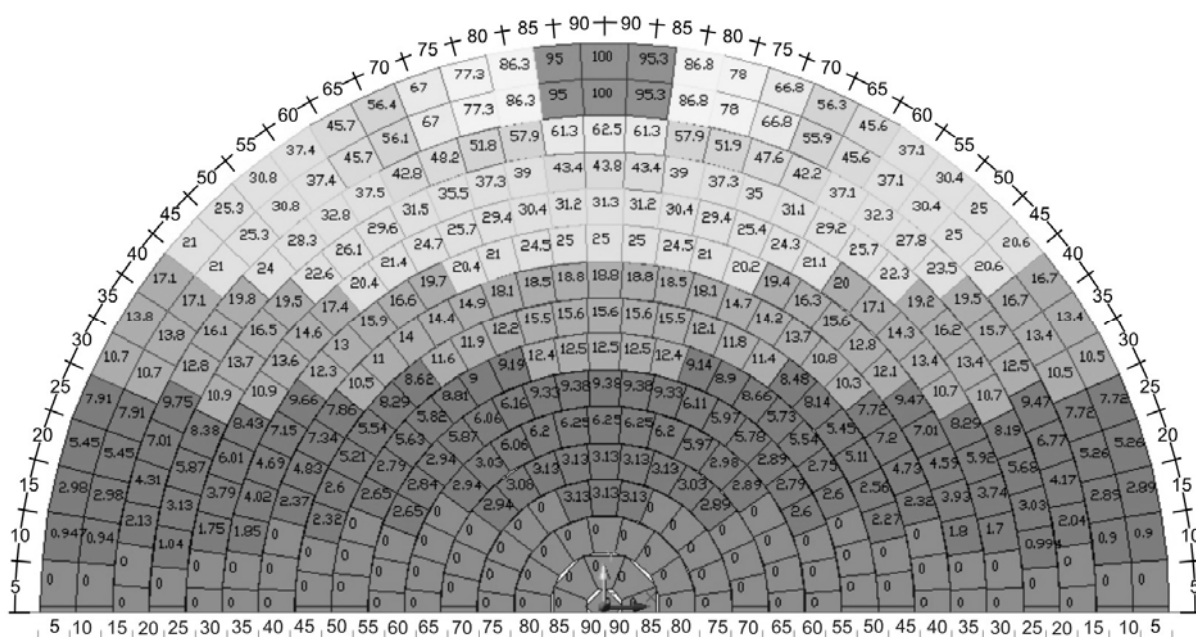
No ambiente de menor profundidade, 7,5x4, apresentado na Figura 7, as áreas de maior percentual estão concentradas próximas à normal em relação à abertura, com ângulos horizontais em torno de 40° e 50°.

As áreas de maior percentual estão localizadas próximo do eixo normal à abertura e simetricamente para a abertura centralizada (eixo horizontal). Para as aberturas dispostas na extremidade, ocorre uma assimetria, com uma inclinação, do conjunto de valores mais elevados, para a lateral em que se encontra a abertura, ou seja, aberturas localizadas à direita da sala visualizam mais as parcelas da abóbada localizadas nesse quadrante.

Sobre os ambientes analisados, observa-se que as áreas de maior percentual de visibilidade localizam-se entre os ângulos de altitude (eixo vertical) de 0° até 25° e entre ângulos azimutais (eixo horizontal) de +/- 50°. Também se observa que a partir do ângulo de altitude de 70° o percentual é zero, ou seja, a abóbada a partir desse ângulo de altitude não é visualizada para os ambientes em análise neste trabalho.

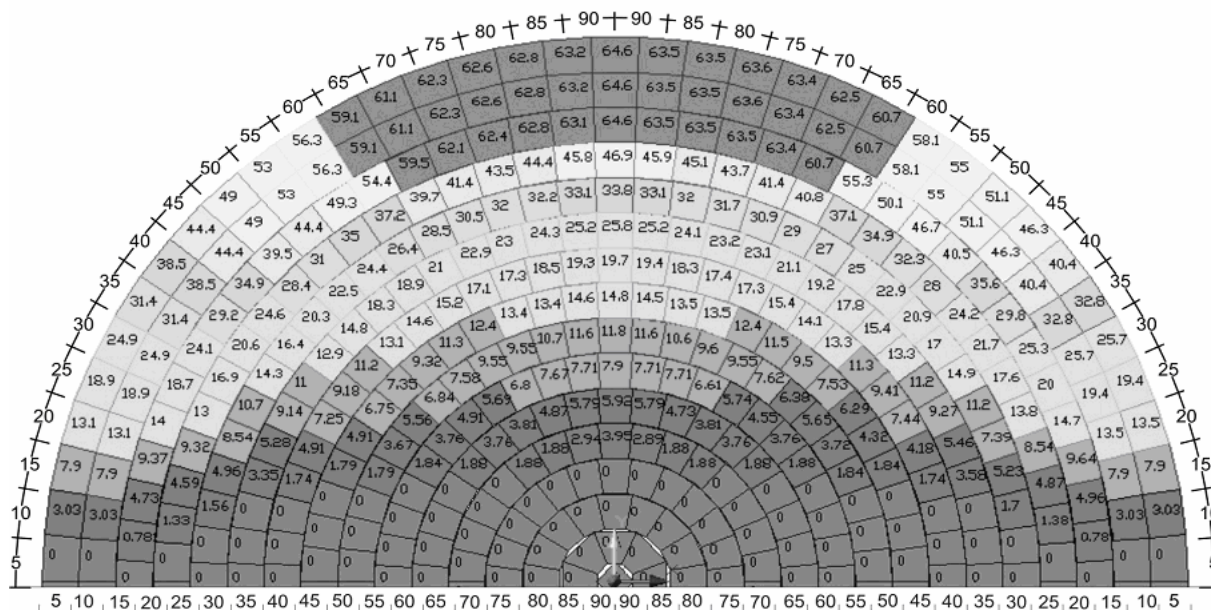
Quanto menor a profundidade do ambiente, maior o número de parcelas que são vistas. Em contrapartida, quanto maior a profundidade do ambiente, menor o número de parcelas e maior a concentração de zonas do céu que são vistas.

Sobre a variável largura do ambiente *versus* largura da abertura, observa-se que, quando a abertura corresponde à largura do ambiente, os percentuais apresentam valores altos, chegando a 100%; ao reduzir a largura da abertura, ocorre redução na frequência, com valores de até 50%.



Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 6 - **Percentual de visibilidade da abóbada no ambiente interno 4x7,5 - abertura 1**



Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

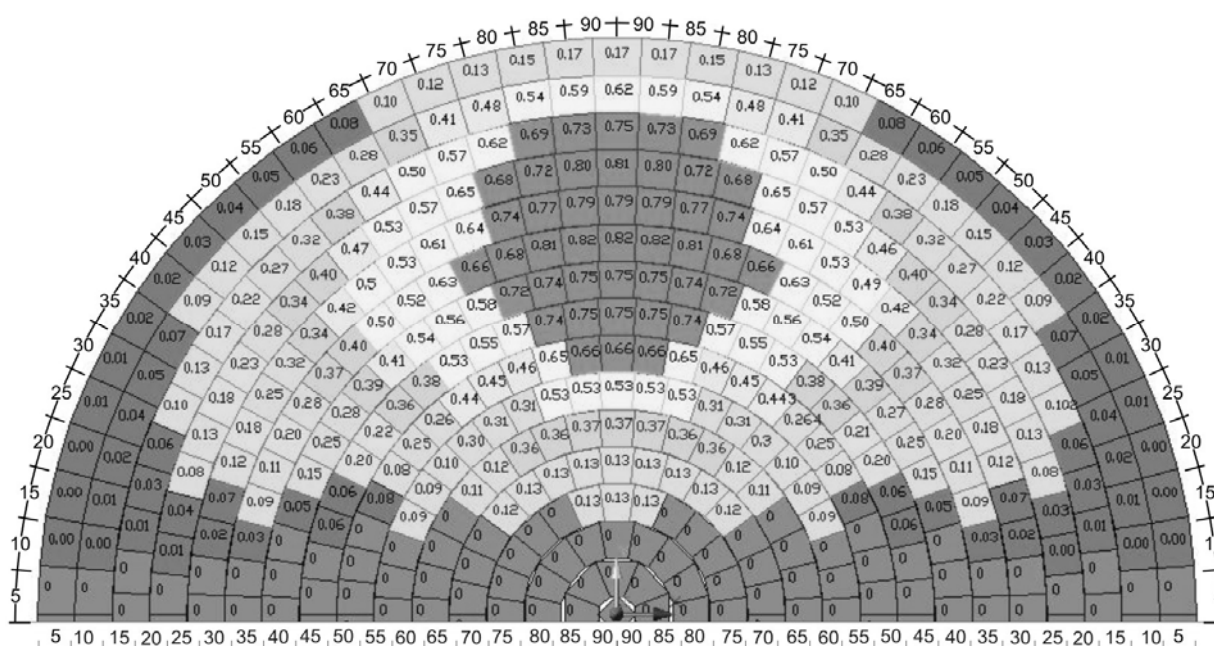
Figura 7 - **Percentual de visibilidade da abóbada no ambiente interno 7,5x4 - abertura 1**

Análise do potencial de iluminação do céu sobre um plano no ambiente interno

Os gráficos mostrados nas Figuras 8, 9 e 10 representam o potencial de iluminação que a abóbada celeste apresenta em um plano horizontal localizado no ambiente interno. Assim como no diagrama dos percentuais de visibilidade do céu, as parcelas com valores iguais a zero representam áreas de não-visualização no ambiente interno, portanto de não-contribuição direta na iluminação do ambiente interno, enquanto as parcelas com valores elevados representam parcelas do céu de maior contribuição luminosa. A Figura 8 expõe o potencial de iluminação para o ambiente 4x7,5 metros, abertura 1 centralizada. A área da abóbada de maior contribuição (potencial de 0,4% a 0,8%) localiza-se nas faixas de 5° a 60° de altitude e

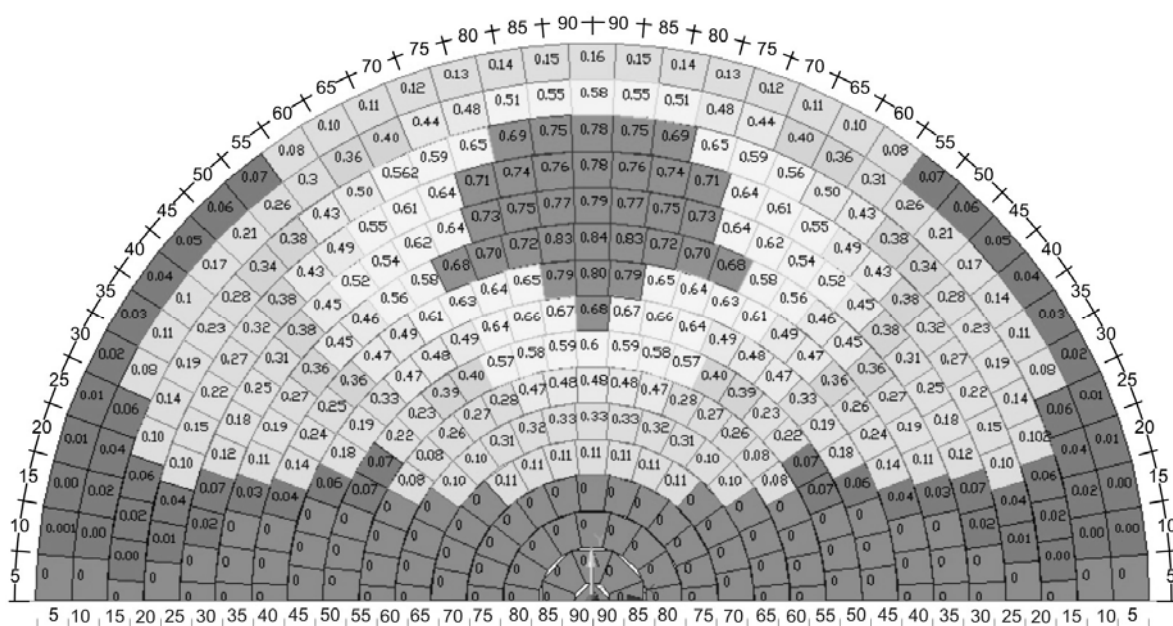
dentro de intervalo de aproximadamente 35° (ângulo horizontal). A área de maior contribuição corresponde a aproximadamente 60% do somatório total (igual a 100). Para o gráfico da Figura 9, ambiente 5x6 com abertura 1, a partir do ângulo de altitude 75°, a abóbada não apresenta contribuição direta na iluminação sobre o plano de análise. A área da abóbada de maior contribuição (potencial de 0,4% a 0,8%) localiza-se nas faixas de 5° a 60° de altitude e dentro de intervalo de aproximadamente 40° (ângulo horizontal) à esquerda e à direita.

A Figura 10 exibe o potencial de iluminação no ambiente 7,5x4 metros, abertura 1. A área da abóbada de maior contribuição (potencial de 0,4% a 0,8%) localiza-se nas faixas de 10° a 60° de altitude e dentro de intervalo de aproximadamente 45° (ângulo horizontal) à esquerda e à direita. A abóbada não é vista a partir do ângulo de 75°.



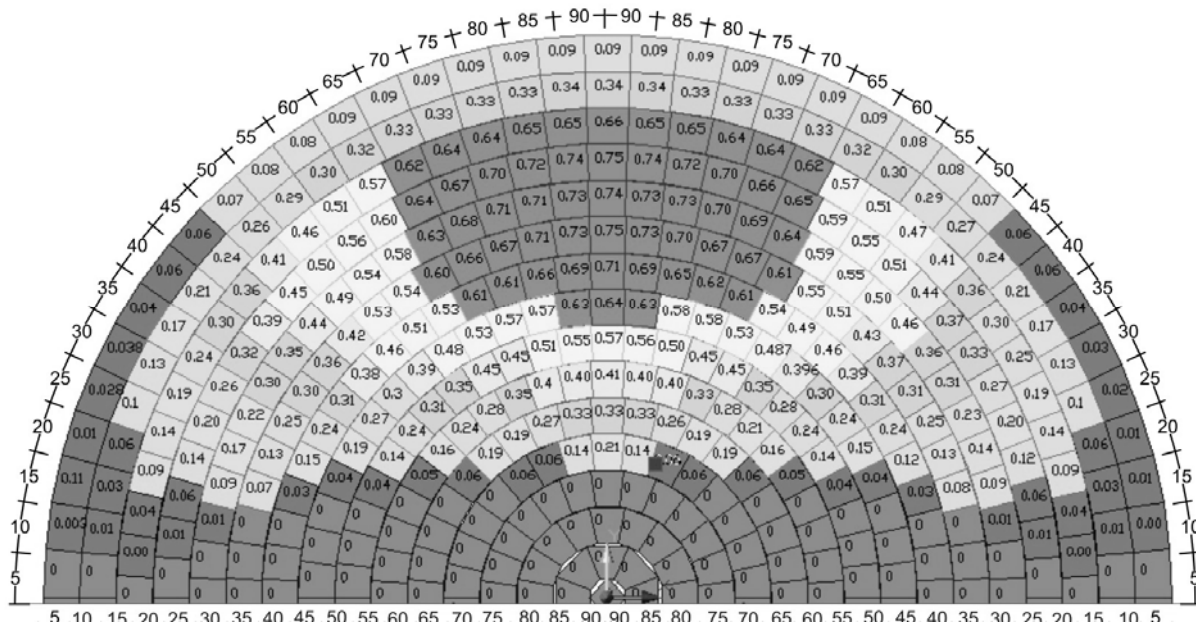
Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 8 - **Potencial de iluminação do céu no ambiente interno 4x7,5 - abertura 1 - céu encoberto**



Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 9 - **Potencial de iluminação do céu no ambiente interno 5x6 - abertura 1 - céu encoberto**



Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 10 - **Potencial de iluminação do céu no ambiente interno 7,5x4 - abertura 1 - céu encoberto**

Definição da janela de céu preferível

A definição da janela de céu preferível resulta de um processo que se inicia com as análises sobre a contribuição relativa da abóbada sobre os planos vertical e horizontal, seguindo com as análises sobre o percentual de visão do céu e finalizando com as análises do potencial de iluminação do céu. No gráfico da contribuição relativa da abóbada sobre um plano horizontal (Figura 3), as áreas de maior valor encontram-se próximas ao zênite, enquanto nos gráficos do percentual de visão céu no ambiente interno (Figuras 6 e 7) as áreas de maior valor estão próximas à linha do horizonte. O gráfico do potencial de iluminação resulta do cruzamento dessas duas variáveis, conseqüentemente as zonas de maior potencial de iluminação situam-se justamente em posição intermediária, com uma tendência para a linha do horizonte, onde se observa que a variável de maior influência é o percentual de visão do céu.

Na definição da região da janela de céu preferível, o critério determinante foi, além das considerações sobre a contribuição relativa da abóbada e do percentual de visão do céu, a análise realizada sobre os gráficos do potencial de iluminação. A conclusão final é a de que o gráfico do potencial de iluminação representa os fenômenos observados com os outros aspectos em análise. Além disso, a superposição dos gráficos obtidos com os ambientes em análise apontou uma área de maior ocorrência, que está representada na Figura 11. Sobre o mesmo, ressalta-se que as zonas da abóbada de maior contribuição na iluminação de um ambiente interno situam-se entre os ângulos de altitude de 5° a 58° e entre os ângulos horizontais de no máximo 50°, à esquerda ou à direita. Essa contribuição é de aproximadamente 60% do fluxo luminoso incidente sobre o plano de análise no ambiente interno. Não obstante, dois outros critérios foram considerados:

- (a) para os ângulos horizontais (ou azimutais), foi adotado o limite de $\pm 45^\circ$, considerando a influência do efeito cosseno (ver demarcação na Figura 11);
- (b) para os ângulos verticais (altitude), o ângulo inferior de 15° foi adotado como limite, ao considerar-se que usualmente essa altura

apresenta-se obstruída devido ao entorno natural ou construído (Figura 11).

Como resultado, a região da abóbada celeste definida para a janela de céu preferível apresenta limites horizontais de 45° à esquerda e de 45° à direita, e limites verticais de 15° inferior e de 60° superior, como se pode observar na Figura 11, abaixo.

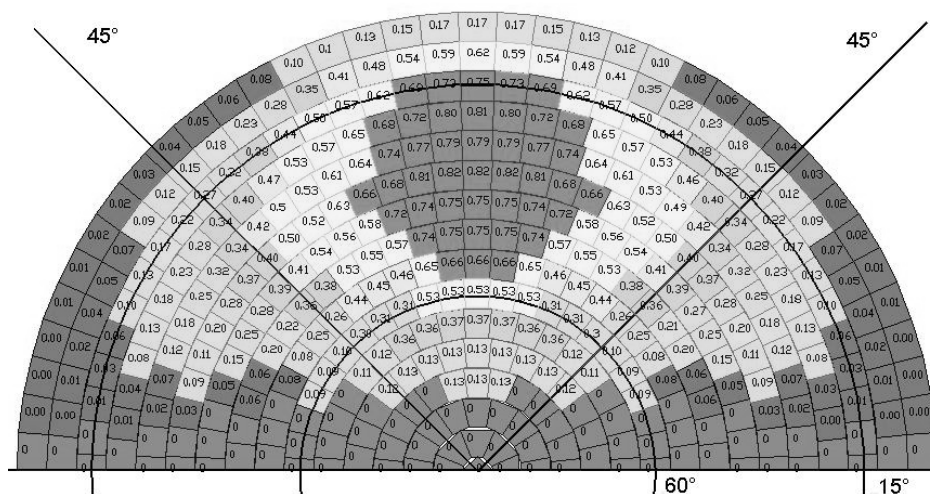
A área proposta para o céu preferível apresenta um fator de céu visível (percentual da abóbada celeste que, a partir de determinado ponto, se encontra totalmente desobstruída) de aproximadamente 32%, enquanto a área remanescente apresenta um fator céu visível de aproximadamente 68%. Com a definição da região da Janela de Céu Preferível, a etapa subsequente consiste na verificação da hipótese de que ela efetivamente tem maior potencial de iluminação no ambiente interno, utilizando-se modelos de obstrução do céu.

Comprovação da hipótese do parâmetro janela de céu preferível

Com a caracterização da área de céu denominada de janela de céu preferível, a etapa seguinte consiste na confirmação da hipótese de que essa porção do céu apresenta maior contribuição na iluminação natural no ambiente interno. Essa etapa também é realizada através de simulação computacional, utilizando modelos de ambiente interno e de obstrução do céu. Os modelos de ambiente interno permanecem aqueles já apresentados no Quadro 1. Os modelos de obstrução de céu consistem em:

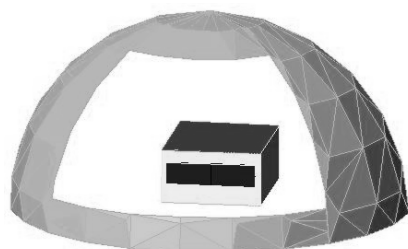
- (a) céu totalmente desobstruído;
- (b) região da janela de céu preferível desobstruída, apresentada na Figura 12 (a e b); e
- (c) região da janela de céu preferível obstruída, apresentada na Figura 13 (a e b).

O objetivo pretendido com os modelos de obstrução do céu é isolar a iluminação proveniente de determinadas parcelas da abóbada celeste e analisar a iluminação natural resultante nos ambientes internos. Sendo assim, há três condições de obstrução do céu: céu totalmente desobstruído, janela de céu preferível desobstruída e janela de céu preferível obstruída.

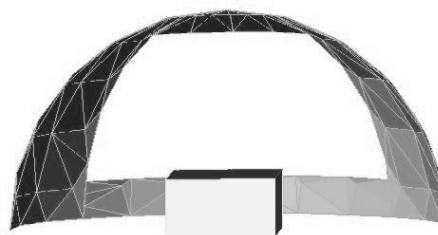


Observação: gráfico gerado com o programa Apolux

Figura 11 - Gráfico do potencial de iluminação do céu sobre o plano no ambiente interno com a definição da área de céu preferível sobre o mesmo - céu encoberto

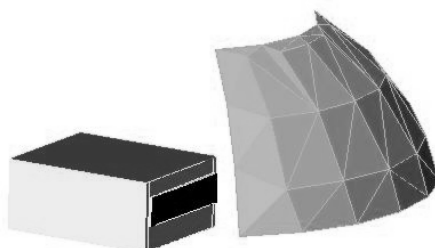


(a) vista frontal do ambiente interno e obstrução do céu

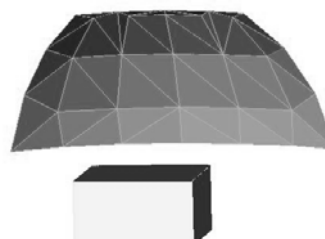


(b) vista dos fundos do ambiente interno e obstrução do céu

Figura 12 - Janela de céu preferível desobstruída (a) e (b)



(a) vista frontal do ambiente interno e obstrução do céu



(b) vista dos fundos do ambiente interno e obstrução do céu

Figura 13 - Janela de céu preferível obstruída (a) e (b)

O desempenho da iluminação natural, resultante das três condições de obstrução do céu no ambiente interno, é analisado mediante as variáveis iluminância e fator da luz do dia, sobre um plano horizontal interno a 1 metro de altura. A condição de céu é encoberto, e os horários simulados foram 8, 10 e 12 horas no dia 22 de junho. As iluminâncias encontradas no ambiente

externo foram, respectivamente, 2.115, 11.257 e 16.942 lux. Para a análise das iluminâncias no ambiente interno, foi adotado o seguinte sistema de classificação: 0 a 100 lux, considerado insuficiente para iluminação do ambiente; 100 a 300 lux, denominado de inferior e considerado útil como fonte complementar; 300 a 800 lux, considerado suficiente; 800 a 2.000, denominado

de superior e passível de provocar ofuscamento; acima de 2.000 lux, considerado excessiva. Para a análise do fator da luz do dia também foi utilizado um sistema de classificação: 0% a 2%, insuficiente; 2% a 5%, suficiente; e maior que 5%, excessivo.

Os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 14, 15 e 16 permitem a comparação entre o desempenho da iluminação no ambiente interno obtida com o céu totalmente desobstruído, céu com apenas a janela de céu preferível desobstruída e céu com somente a janela do céu preferível obstruída. Sobre o desempenho da iluminação no ambiente interno, analisado através da classificação da iluminação em classes de iluminâncias, ressalta-se que os valores encontrados nas classes “inferior”, “suficiente”, “superior” e mesmo “excessivo” apresentam potencial de aproveitamento da iluminação natural, enquanto maior valor na classe “insuficiente” representa reduzido potencial de aproveitamento da iluminação natural. Os gráficos apresentam os resultados obtidos com os diferentes horários

analisados: 8 horas (8h), 10 horas (10h) e 12 horas (12h), e os resultados obtidos com os três ambientes em análise: 4x7,5 metros (4_), 5x6 metros (5_) e 7,5x4 metros (7_).

Com os gráficos das Figuras 14, 15 e 16, pode-se perceber que a iluminação natural no ambiente interno proveniente da condição de obstrução do céu com a janela de céu preferível desobstruída é muito similar àquela obtida com a condição de céu totalmente desobstruído, enquanto com a condição de obstrução do céu com a janela de céu preferível obstruída o comportamento da iluminação natural apresenta um desempenho nitidamente inferior.

No gráfico da Figura 17 as classes de iluminâncias no intervalo entre 100 e 2.000 lux foram somadas e apresentadas segundo o ambiente, horário e condição de obstrução do céu. Pode-se perceber que a condição de obstrução com o céu totalmente desobstruído apresenta comportamento próximo da condição de obstrução com apenas a janela de céu preferível desobstruída.

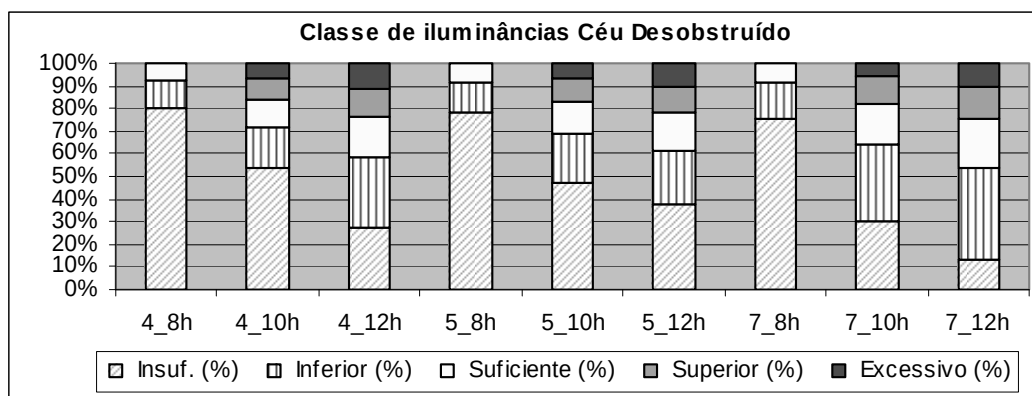


Figura 14 - Iluminâncias no ambiente interno com o céu desobstruído

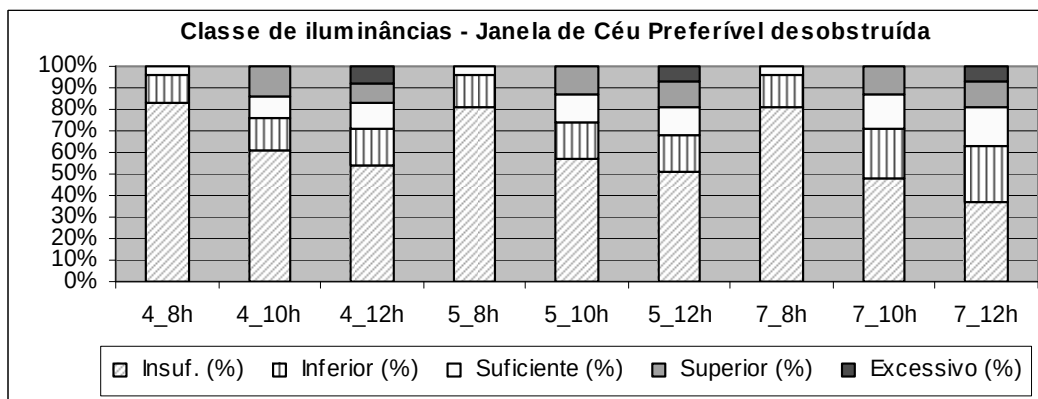


Figura 15 - Iluminâncias no ambiente interno com a janela de céu preferível desobstruída

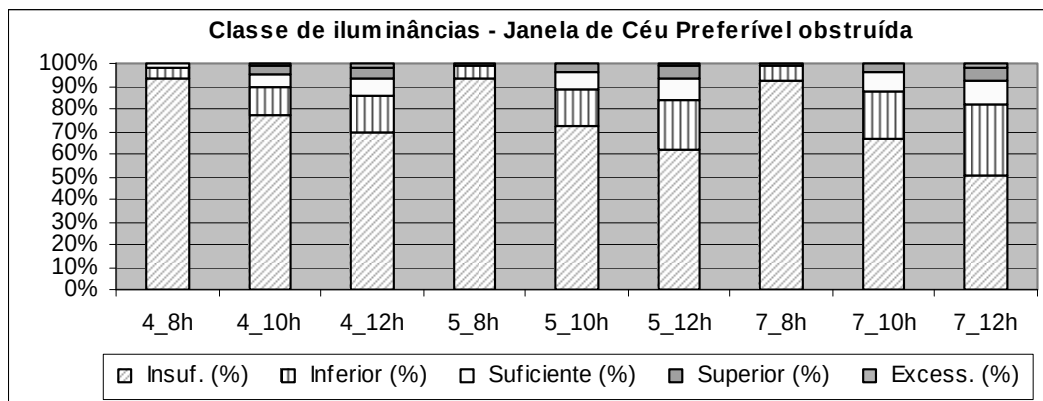


Figura 16 - Iluminâncias no ambiente interno com a janela de céu preferível obstruída

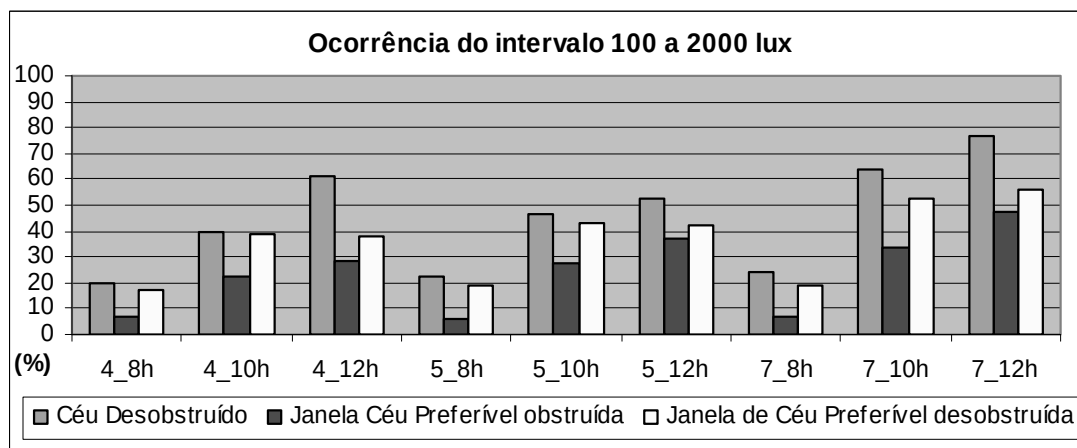


Figura 17 - Iluminâncias agrupadas no intervalo de 100 a 2.000 lux

No gráfico da Figura 18 obteve-se a diferença percentual entre as iluminâncias, agrupadas no intervalo de 100 a 2.000 lux, para a condição de céu totalmente desobstruído pela condição de janela de céu preferível desobstruída e pela condição da janela de céu obstruída. Pode-se perceber que, principalmente no horário das 8 e das 10 horas, os valores obtidos com a janela de céu preferível desobstruída estão muito próximos de 100%, o que significa muito próximo da iluminância com o céu desobstruído, enquanto na condição de céu com a janela de céu preferível obstruída os valores são em torno de 50% menores que aqueles na condição de céu totalmente desobstruído. Somente no horário das 12 horas a iluminância obtida com a janela de céu preferível desobstruída e obstruída se aproximam, entretanto, ao observar o gráfico das Figuras 14 e 15, pode-se perceber que esse fato deve-se à ocorrência de iluminância acima de 2.000 lux, tanto na condição de céu desobstruído quanto para a janela de céu preferível desobstruída.

Os gráficos a seguir representam os valores obtidos para o fator da luz do dia nos ambientes internos em análise. Na classe de intervalo denominada de insuficiente, que corresponde a valores inferiores a 2%, valores altos significam maior ocorrência nessa faixa e uma condição mais desfavorável de iluminação natural no ambiente.

A condição de menor fator da luz do dia é com a janela de céu preferível obstruída (Figura 19), enquanto o fator da luz do dia na condição de céu totalmente desobstruído e janela de céu preferível desobstruída são próximos. Em média, o fator da luz do dia na classe insuficiente (inferior a 2%) é de aproximadamente 65% para céu desobstruído e de 70% para a janela de céu preferível desobstruída, enquanto na condição com a janela de céu preferível obstruída o fator da luz do dia inferior a 2% é de 85%. Conseqüentemente, o percentual de fator da luz do dia superior a 2% é de aproximadamente 35% para o céu desobstruído,

de 30% para a janela de céu preferível e de aproximadamente 15% para o céu não preferível.

Sobre as análises do desempenho da iluminação natural no ambiente interno decorrente da condição de obstrução do céu, é importante destacar que o percentual de céu visível na condição de obstrução com a janela de céu

preferível obstruída é o dobro do percentual de céu visível na condição de obstrução do céu onde a janela de céu preferível está desobstruída. Com isso se pode concluir que o desempenho obtido com a janela de céu preferível é significativamente superior àquele obtido com o céu não preferível.

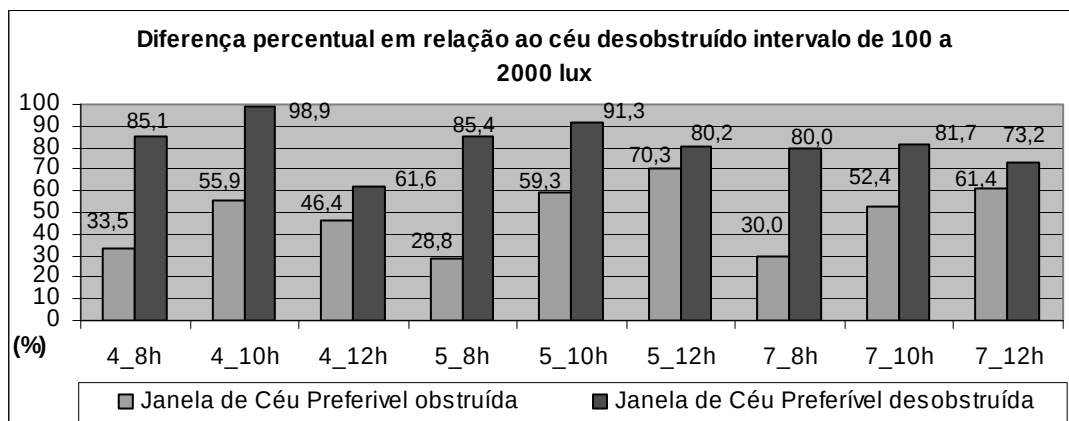


Figura 18 – Diferença percentual entre as iluminâncias na classe de 100 a 2.000 lux entre o céu totalmente desobstruído e a janela de céu preferível obstruída e desobstruída

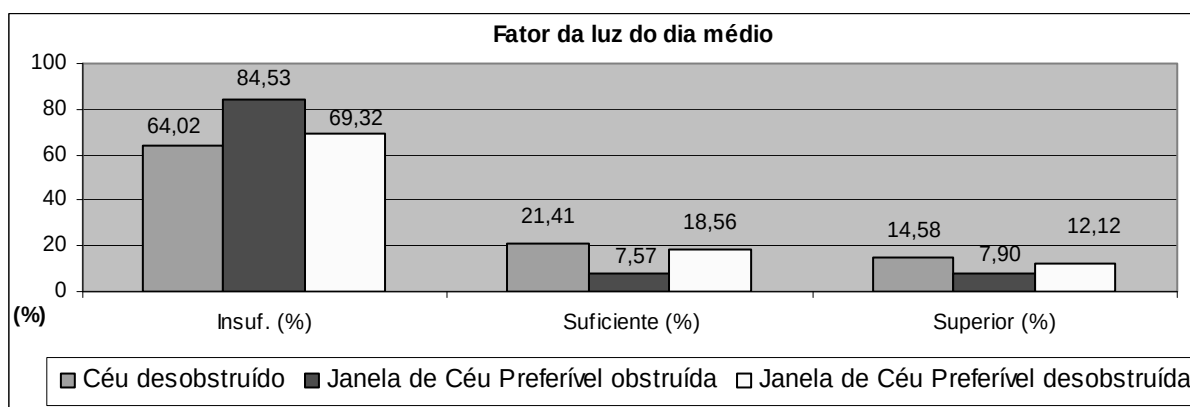


Figura 19 – Fator da luz do dia médio para as condições de céu

Conclusão

Este trabalho trata da proposição de um parâmetro de controle do acesso à luz natural no meio urbano que possa garantir ao ambiente interno um razoável aproveitamento da luz natural como fonte de iluminação. A caracterização desse parâmetro compreende três principais aspectos: a) a contribuição relativa de luz das diferentes parcelas da abóbada celeste; b) o efeito redutor do cosseno do ângulo de incidência; e c) a frequência de visibilidade. A integração desses aspectos caracteriza o potencial de iluminação da abóbada celeste no ambiente interno. A análise sobre os aspectos relatados possibilitou a definição de uma região do céu, denominada de Janela de Céu Preferível. Posteriormente, foi feita a comprovação da hipótese de que essa região é efetivamente responsável por grande parte da iluminação natural no ambiente interno.

A análise sobre a luz natural proveniente da condição de céu com a janela de céu preferível desobstruída, sobre um plano horizontal em alguns modelos de ambiente interno, e a comparação com a luz natural proveniente da área de céu remanescente, ou condição com a janela de céu preferível obstruída, confirmaram a confiabilidade do mesmo. A Janela de Céu Preferível, que corresponde a uma área de 32% da abóbada celeste visível para o plano vertical, apresentou um fator da luz do dia superior a 2% em 30,7% da área do plano de análise horizontal nos ambientes internos analisados, valor muito similar àquele encontrado com o céu desobstruído, que foi de 36%. Paralelamente, a área de céu remanescente, condição de céu com a janela de céu preferível obstruída, que representa 68% da abóbada visível para o plano vertical, apresentou em média um fator da luz do dia superior a 2% em apenas 15,5% da área do plano de análise horizontal nos ambientes internos analisados.

Acredita-se que, num contexto de crescente adensamento e verticalização dos centros urbanos, um parâmetro como a janela de céu preferível apresente um grande potencial de uso em mecanismos de garantia de disponibilidade de luz natural aos edifícios, pressuposto imprescindível para que o arquiteto possa efetivamente definir estratégias de projeto arquitetônico que aproveitem esse recurso natural.

Referências

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-2**. Iluminação natural: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro, 2005.
- CAPELUTO, G. I. The influence of the urban environment on the availability of the daylighting in office buildings in Israel. **Buildings and Environment**, London, v. 38, p. 745-752, 2003.
- CLARO, A. **Modelo vetorial esférico para radiosidade aplicado à iluminação natural**. 1998. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975. 776 p.
- LITTLEFAIR, Paul J. Site layout planning for daylight and sunlight: a guide to good practice. **Building Research Establishment Report**, Garston, p. 82, 1991.
- LYNES, J. A. **Principles of natural lighting**. London: Elsevier, 1968. 207 p.
- NG, E. A study of the relationship between daylight performance and height difference of buildings in high density cities using computational simulation. In: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION CONFERENCE, 9., 2005, Montreal, Canadá. **Proceedings...** Montreal: IBPSA - International Building Performance Simulation Association, 2005a. p. 847-852.
- NG, E. Towards better building and urban design in Hong Kong. In: INTERNATIONAL CONFERENCE PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, 2005, Santorini, Greece. **Proceedings...** Santorini: M. Santamouris, 2005b. p. 923-928.
- TREGENZA, P. **Daylighting algorithms**. School of Architecture Studies University of Sheffield, 1993. 104 p.
- ÜNVER, R.; ÖZTÜRK, L.; ADIGÜZEL, S.; ÇELİK, Ö. Effect of the facade alternatives on the daylight illuminance in offices. **Energy and Building**, London, v. 35, p. 737-746, 2003.