

Raphaela Walger da
Fonseca
Fernando Oscar Ruttkay
Pereira
Anderson Claro

i

LUMINAÇÃO NATURAL: A
CONTRIBUIÇÃO DE SUAS
REFLEXÕES NO INTERIOR DO
AMBIENTE CONSTRUÍDO

198

pós-

RESUMO

O escopo do presente trabalho aborda a influência das reflexões internas na iluminação natural do ambiente construído. Discute-se como a geometria do espaço interno, as propriedades das superfícies e a área, a posição e a distribuição das aberturas influenciam nos valores e na distribuição atribuídos à iluminação refletida interna. O conhecimento dessas relações possibilita estabelecer o comportamento da luz refletida diante de modificação das mencionadas variáveis, de modo a preencher uma lacuna na bibliografia existente.

Os métodos simplificados, previstos e utilizados pelas legislações vigentes para avaliação do ambiente luminoso, não consideram as componentes básicas da luz que atingem o interior do mesmo. Fato que prejudica a previsão do comportamento da luz. A contribuição da iluminação natural em um ambiente depende diretamente da componente celeste, da luz refletida nas superfícies externas e nas superfícies internas, fazendo, do conhecimento dessas, imprescindível para um bom entendimento do ambiente luminoso. Propõe-se a implementação de um método gráfico e outro analítico, buscando delinear o comportamento da luz refletida no interior das edificações. Esses métodos permitem a verificação e a comparação entre geometrias e entre conceitos de iluminação natural propostos, ou para verificar a qualidade e eficiência do projeto de iluminação em relação ao aproveitamento das reflexões da luz.

Assim sendo, os métodos adotados se propõem a manipular os parâmetros dos elementos que influenciam a iluminação refletida, de modo a assegurar a qualidade do ambiente luminoso.

PALAVRAS-CHAVE

Iluminação natural, componente refletida interna, geometria.

ILUMINACIÓN NATURAL: LA
CONTRIBUCIÓN DE SUS REFLEXIONES
EN EL INTERIOR EL AMBIENTE
CONSTRUIDO

RESUMEN

El propósito de este trabajo es abordar la influencia de las reflexiones internas en la iluminación natural del ambiente construido. En esta investigación se discute como la geometría del espacio interno, las propiedades de las superficies y el área, la posición y la distribución de las aperturas, influyen en los valores y en la distribución de la iluminación reflejada en el interior del ambiente. El conocimiento de estas relaciones permite establecer el comportamiento de la luz reflejada según modificaciones de las variables mencionadas, de modo a llenar un vacío en la literatura existente.

Los métodos simplificados utilizados en las legislaciones actuales para la evaluación del ambiente lumínico no consideran los componentes básicos de la luz que llega hasta el interior, hecho que afecta la previsión del comportamiento de la luz. La contribución de la iluminación natural en un ambiente depende directamente del componente celeste, de la luz reflejada en superficies externas y de la luz reflejada en las superficies internas; el estudio de estos componentes es imprescindible a una buena comprensión del ambiente lumínico.

Se propone la aplicación de un método gráfico y otro analítico, con el fin de describir el comportamiento de la luz reflejada en el interior de las edificaciones. Estos métodos permiten la verificación y la comparación entre geometrías y entre conceptos de la iluminación natural propuestos, o para verificar la calidad y eficiencia del proyecto de iluminación en relación al aprovechamiento de las reflexiones de la luz.

Los métodos adoptados proponen la manipulación de los parámetros que influyen en la reflexión de la iluminación, de modo a garantizar la calidad del ambiente lumínico.

PALABRAS CLAVE

Iluminación natural, componente reflejado interior, geometría.

NATURAL LIGHT: HOW ITS
REFLECTIONS CONTRIBUTE TO
THE BUILT ENVIRONMENT

ABSTRACT

This article tackles the impact of internal reflections in day-lit built environments. This study shows how the inner space geometry, surface properties, openings percentage, position and distribution affect the values and distribution attributed to the internally reflected component. Such knowledge enables us to establish parameters and relations among the above variables so as to fill a gap in the existing biography.

The simplified methods provided and used by existing legislation to assess the day-lit environment do not take into account light's basic components, which affect the internal spaces. Therefore, this fact has a negative influence on the prediction of light's behavior.

Daylighting contribution in an environment depends directly on the sky component, on the light reflected on external surfaces, and also on the light reflected on internal surfaces among other aspects; this knowledge is crucial for a good understanding of the day-lit environment. The findings of this study should enable the manipulation of variable values and parameters, which affect the reflected light in order to ensure both the quantity and mainly the quality of the day-lit environment.

KEY WORDS

Daylighting, internally reflected component, geometry.

INTRODUÇÃO

Em um projeto de iluminação natural, o projetista deve satisfazer as necessidades programáticas, prover o conforto do usuário, minimizar os gastos de energia do edifício, aperfeiçoar a imagem pública da arquitetura e minimizar o custo da construção (LAM, 1986).

Ao arquiteto, cabe, principalmente, intervir na iluminação natural indireta, uma vez que ele é quem define a forma, o tamanho e o acabamento das superfícies, variáveis essas que irão influenciar nesse fenômeno. A luz refletida no interior do ambiente proporciona importante contribuição na distribuição luminosa. De acordo com Lynes (1968), a luz refletida interna dependerá não somente dos fatores de reflexão das paredes, mas também da forma do ambiente.

Partindo dessas premissas, surge a necessidade de analisar o comportamento da luz natural refletida no interior das edificações, com o intuito de identificar as correlações com as características físicas dos ambientes.

A ILUMINAÇÃO NATURAL

A iluminação natural foi descrita por Robbins (1986) como arte e ciência. Enquanto arte, atrai ganhos estéticos e qualitativos à arquitetura. Enquanto ciência, mostra-se como um sistema ambiental no qual o desempenho de seus atributos, de suas características físicas e sua integração com os outros sistemas devem ser descritos quantitativamente.

Inúmeros benefícios da aplicação da luz natural podem ser enumerados; Boyce (2004) salienta o impacto psicológico e fisiológico que parece exercer sobre as pessoas.

Além disso, o uso da iluminação natural pode reduzir, significativamente, o consumo de energia em edificações (1994). Considerada um recurso renovável, a luz natural CISBE apresenta reduzido impacto ambiental e favorece a eficiência energética no ambiente construído. Possibilita a diminuição do consumo de energia elétrica, minimizando o uso de iluminação artificial, considerada uma parcela significativa do consumo verificado nos edifícios (ANDER, 2003; LAMBERTS et al, 2004).

Quando a iluminação natural é considerada nas fases iniciais de projeto, pode representar um sistema praticamente sem custos adicionais à edificação. A desconsideração do potencial da luz natural resulta, ainda, na dependência excessiva de sistemas artificiais de iluminação, inclusive no período diurno, elevando significativamente o desperdício de energia elétrica (SOUZA, 2001).

A luz natural pode ser proveniente de fontes diretas ou indiretas (MOORE, 1991). O sol e o céu (abóbada celeste) são as fontes diretas enquanto a luz oriunda de superfícies reflexivas e, translúcidas, as indiretas.

(1) Luminância é a medida física de uma fonte de luz ou de uma superfície iluminada, sendo através dela que os seres humanos enxergam. É definida como a intensidade luminosa por unidade de área aparente de uma superfície em dada direção, e sua unidade no SI é candela/m² (cd/m²), em que a intensidade luminosa é a luz se propagando em determinada direção dentro de um ângulo sólido unitário e a área aparente é a que a superfície parece ter do ponto de vista do observador. Simplificadamente, consiste na quantidade de luz refletida por um objeto ou superfície iluminados.

A luz solar direta é considerada demasiadamente intensa e caracteriza-se por gerar aquecimento passivo nas edificações, além de ofuscamento e excesso de contrastes. A luz proveniente do céu é a mais utilizada como padrão para estudos em projetos.

Conhecer o comportamento da fonte de luz é o primeiro passo para possibilitar a previsão do aproveitamento da iluminação natural em um projeto.

O fluxo luminoso que atinge uma superfície do ambiente interno pode alcançá-la por três caminhos, resultante de sua divisão em três componentes: a componente celeste (CC), a componente refletida externa (CRE) e a componente refletida interna (CRI). O somatório dessas três componentes resulta no total da iluminação que atinge determinado ponto (HOPKINSON et al., 1966). O cálculo de cada uma dessas componentes individualmente se justifica-se pelo fato de cada uma sofrer influência de fatores diferentes (SZOKOLAY, 1980).

O comportamento da luz no interior do edifício

Para explicar a relação de “causa e efeito” da luz nos ambientes, Moore (1991) desenvolveu um Modelo Conceitual de Referência. Esse modelo considera o comportamento da luz a partir da seqüência fonte primária-trajetória-alvo, e a trajetória pode ser direta ou refletida nas superfícies (fontes secundárias). Esse conceito é facilmente aplicado para fontes pontuais; entretanto, para fontes superficiais faz-se necessário considerar a iluminação como função de áreas de brilho que podem ser “vistas” pela fonte, superfícies emissoras de luz (abóbada celeste), as quais, por sua vez, podem ser “vistas” pelas superfícies refletoras de luz (superfícies internas), e, por fim, podem ser “vistas” pelo alvo. A iluminação produzida no alvo é o produto da luminância¹ da fonte superficial, pelo tamanho aparente desta visto pelo alvo. O tamanho aparente da fonte depende da distância, do tamanho nominal e inclinação da fonte em relação ao alvo. A posição da fonte superficial relativa à superfície alvo também influi na iluminação desta – quanto mais próxima da condição de paralelismo entre as duas superfícies, maior a contribuição.

De acordo com Szokolay (1980), em situações em que a visão da abóbada celeste (fonte primária) é muito reduzida ou inexistente sugere-se garantir a iluminação por meio das componentes refletidas externa e interna, componentes estas influenciadas diretamente pela configuração edilícia.

A interação com o ambiente luminoso

Quando se trata do estudo formal de ambientes luminosos, pode-se criar uma série de analogias sobre a relação entre a luz e esses ambientes. Uma analogia conceitual a facilitar a compreensão do fenômeno da luz no ambiente construído consiste na relação entre este e as luminárias. Esse conceito é especialmente útil para o estudo da iluminação refletida interna, pois compara as aberturas que admitem a luz externa com as lâmpadas, as superfícies do espaço ao refletor e a geometria à forma da luminária, permitindo uma análise das reflexões da luz. Partindo desse princípio, pode-se admitir que, assim como para a luminária, também para o espaço arquitetônico a questão formal e a escolha dos materiais podem maximizar a luz no ambiente.

Os projetos de edifício iluminado naturalmente são baseados nas relações entre o ambiente, o espaço a ser iluminado e o tamanho, forma e localização das

várias aberturas por onde a luz irá incidir. A clareza da relação proporcional entre o espaço e a abertura adequada permite, ao projetista, manipular a luz natural de maneira a mudar sua forma de incidência no ambiente, distribuição, quantidade e qualidade no espaço (RUCK, 2006).

Ferramentas de estimativa de iluminação natural interna

A fim de apoiar decisões de projeto, arquitetos e projetistas utilizam ferramentas que lhes possibilitam formar um diagnóstico do ambiente luminoso.

Segundo Baker et al (1993), esse tipo de avaliação pode ser realizado quantitativamente por três metodologias distintas: métodos gráficos simplificados, simulações com modelos em escala reduzida ou modelagem matemática com simulações computacionais.

Reinhart e Fitz (2006) descrevem a simulação de iluminação natural como um cálculo computacional que visa prever a quantidade de luz natural disponível em um edifício sob uma condição de céu selecionada. As referidas simulações calculam quantidades físicas como luminâncias ou iluminâncias² em determinada localização do ambiente. Os resultados dessas simulações podem ser apresentados tanto em forma de números individuais como em visualização de uma cena ou como mapas coloridos equalizados.

(2) Iluminância é a medida da quantidade de luz incidente em uma superfície por unidade de área. Sua unidade no sistema internacional é o lúmen/m² ou lux (lx). Pode-se admitir como a quantidade de luz, a qual, partindo de uma fonte luminosa, chega até um ponto.

Indicadores de níveis de iluminação natural

A indicação do desempenho de determinado ambiente e seu sistema de iluminação natural, em termos de iluminação absoluta, é dificultada pela variabilidade da luz proveniente do céu e do sol. O conceito de Fator de Luz Diurna (FLD) resolve a questão da dificuldade de cálculo da iluminação natural em interiores em unidades de iluminância, pois adota um conceito de iluminação relativa.

Entende-se como FLD a razão entre a iluminância em um ponto, em um plano interno e a iluminância em um plano horizontal externo, produzida pela abóbada celeste em condição encoberta e sem qualquer obstrução. A luz solar direta não é considerada nesse parâmetro (MOORE, 1991; LITTLEFAIR, 2002).

PROCEDIMENTO PARA A AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA ILUMINAÇÃO REFLETIDA NO INTERIOR DOS AMBIENTES

As discussões sobre o tema da iluminação refletida interna foram motivadas, neste estudo, pela busca por uma proporção ótima entre a área de abertura e a área de superfícies refletoras. Essa reflexão inicial gerou um estudo piloto que serviu como base para a definição de parâmetros a serem avaliados e o método a ser adotado. Definiu-se por objetivo central analisar o comportamento da luz refletida no interior das edificações, identificando sua correlação com as características físicas dos espaços internos. Para as análises foram definidos dois métodos: o método gráfico e o analítico. Alguns resultados obtidos com os modelos teóricos foram comparados a simulações realizadas com modelos físicos sob céu artificial de caixa de espelhos.

(3) FLDRm – Fator de Luz Diurna Refletida média.

(4) O céu encoberto caracteriza-se por não deixar que a luz direta do sol atinja a terra. A luminância celeste distribui-se de forma extremamente uniforme. A abóbada se apresenta com uma coloração cinza-claro e brilhante, com o zênite apresentando luminância três vezes maior do que na linha do horizonte.

A escolha do método de estimação de iluminação natural interna

Os métodos que utilizam programas computacionais mostraram-se mais indicados para este estudo, pois viabilizam medições em vários pontos simultaneamente, possibilitando a realização de complexos cálculos com agilidade, além de facilitar avaliações de diversos modelos com precisão de processamento. A adoção de um programa que utilize algoritmo consolidado oferece resultados confiáveis.

Atualmente existem vários programas eficientes de simulação de iluminação natural; entre eles o programa APOLUX, desenvolvido no Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (CLARO et al., 2004). Esse programa trabalha com formulação matemática teórica baseada no algoritmo da radiosidade.

A escolha do APOLUX diante dos demais programas deu-se pela vantagem de ser desenvolvido no mesmo laboratório onde esta pesquisa foi realizada. Contando com constante suporte técnico e possibilidade de adaptação do programa, direcionado para as necessidades do trabalho. Optou-se, para a leitura dos dados, a adoção do FLDr (Fator de Luz Diurna Refletida, referente à Componente Refletida Interna – CRI), conceito de iluminação relativa.

Estudo piloto

Para o estudo inicial adotou-se o Modelo (A), ver Tabela 1. A partir dele, foram desenvolvidos sete modelos, com aberturas em todas as fachadas e na cobertura. Os modelos apresentam aberturas de 02% da área da superfície de cada face, os outros seguem com aberturas de 05%, 10%, 30%, 50%, 70%, finalizando em 90%. Adicionalmente, foi avaliado um modelo com 40% de abertura, a fim de caracterizar, com maior precisão, o desenvolvimento dos valores do FLDRm³, uma vez que os maiores valores encontrados correspondiam aos modelos de 30% e 50% de abertura. A refletância média adotada foi de 50% para todas as superfícies.

Configuração das simulações

Optou-se por fixar uma única condição para o ambiente de exposição dos modelos com o intuito de explorar mais características arquitetônicas nos mesmos.

A localização adotada foi a cidade de Florianópolis, geograficamente posicionada à latitude 27°30' Sul e longitude 48°00' Oeste. Quanto à definição da data escolhida para o experimento, optou-se pelo equinócio de 21 de março às 12 horas.

A orientação dos modelos não apresenta relevância diante da condição de Céu Encoberto Padrão CIE⁴ (CIE, 1996) utilizado na pesquisa devido à sua uniformidade direcional.

Assumiu-se, para os cálculos de iluminação, um plano de trabalho a 0,75 m do piso.

Modelos

A fim de investigar o comportamento da iluminação em função da forma do ambiente, foram desenvolvidos quatro modelos padrão, dos quais derivam todos os outros modelos do estudo. Esses dispõem de mesma área, variando o comprimento, a largura e o pé-direito.

Modelo		Área	Largura	Profundidade	Altura
	A	36 m ²	6 m	6 m	3 m
	B	36 m ²	4 m	9 m	3 m
	C	36 m ²	9 m	4 m	3 m
	D	36 m ²	6 m	6 m	3,75 m

Tabela 1 – Características dos modelos

O primeiro modelo padrão consistiu em uma base quadrangular com pé-direito de três metros. O segundo e o terceiro são paralelepípedos, um alongado no comprimento e o outro na largura, ambos mantendo o mesmo pé-direito. O quarto mantém a mesma base do primeiro; entretanto, tem seu pé-direito alongado em 25%, como mostra a Tabela 1. Por meio dessas geometrias procurou-se evidenciar as relações da iluminação refletida em quatro condições possíveis de ambiente: intermediários (A), profundos (B), largos (C) e altos (D).

Grupos de modelos

A definição dos modelos considerou a obtenção de uma avaliação comparativa da distribuição da luz para diferentes áreas de interesse, relacionadas com as características morfológicas que influenciam na variação da luz refletida interna.

Foram desenvolvidos cinco grupos, totalizando 96 modelos e um estudo piloto somando mais sete modelos. Realizado o estudo piloto, o primeiro grupo teve como foco a (I) influência da geometria do ambiente; o segundo, a (II) porcentagem de abertura; o terceiro, a (III) posição das aberturas; o quarto, a (IV) distribuição destas; e o quinto, a (V) refletividade das superfícies. O estudo dessas variáveis, isoladamente, possibilitou a descrição de recomendações de projeto abordando o comportamento das reflexões internas da luz.

a) Geometria do ambiente interno

A influência da geometria na iluminação refletida foi avaliada por quatro formas de modelos padrão, cada um com três tamanhos de aberturas centralizadas. A abertura inicial foi estabelecida em 16% da área do piso para os quatro modelos, por corresponder a 1/6 da área daquele, dimensão mínima exigida pela legislação de Florianópolis (CÓDIGO DE OBRAS E EDIFICAÇÕES DE FLORIANÓPOLIS, 2000). Adicionalmente, foi verificado o comportamento da CRI

(5) A iluminação zenital é realizada por meio de domo ou clarabóia, cuja luz vem de cima (do zênite).

quando a fonte de luz, no caso a abertura, foi ampliada em 50% e em 100%. Essa verificação foi realizada para avaliar o desempenho de cada geometria quanto às reflexões da luz perante o mesmo aumento na quantidade de luz direta. Adotou-se, para este estudo, uma refletância média de 50%, aplicada a todas as superfícies internas.

b) Porcentagem de abertura em relação à área da fachada

Nesse grupo, observou-se a influência da dimensão da “abertura” nos níveis da CRI, considerando os quatro modelos padrão. Foram selecionadas quatro aberturas que estabelecem uma relação porcentual com a superfície total da face na qual se encontra inserida. O estudo analisou 16 modelos com aberturas correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100% da superfície total na qual elas estão inseridas. Nesse caso, as aberturas são horizontais. A refletância média adotada foi de 50%, aplicada a todas as superfícies internas do ambiente.

c) Posição da abertura

Considerando os mesmos modelos padrão, foram selecionadas sete posições de aberturas. Estas foram elencadas a partir de estudos realizados por Baker et al (1993), nos quais são definidas algumas das aberturas mais utilizadas na arquitetura, em edifícios que priorizam a luz natural como fonte de iluminação. Foram analisadas aberturas na (1) posição zenital⁵ (2), posição vertical (3), posição entre planos (4), posição horizontal baixa (5), posição horizontal média e (6), posição horizontal alta. Foram também observados, na análise desse grupo, os modelos do grupo I que apresentavam a mesma área de abertura para uma avaliação na posição lateral. A área das aberturas foi a mesma para todos os modelos, 16% da área do piso. A refletância média adotada foi de 50%, aplicada a todas as superfícies internas do ambiente.

d) Distribuição das aberturas

Para a avaliação da distribuição das aberturas, foram selecionados três tipos de distribuição: a distribuição paralela, a adjacente e a perpendicular. Os três tipos de distribuição de aberturas foram aplicados aos quatro modelos padrão.

A geometria das aberturas é a mesma para todos os modelos e apresentam sempre a mesma dimensão, 16% da área do piso. Essa área é distribuída em duas aberturas localizadas em superfícies distintas. Foi fixada uma refletância média de 50%, aplicada a todas as superfícies internas do ambiente para as 12 combinações.

e) Variação do índice de reflexão interna das superfícies

A fim de investigar a influência das refletâncias das superfícies foram selecionados três índices de reflexão: baixo (20%), médio (40%) e alto (80%), aplicados às superfícies internas dos ambientes. A refletância do piso é constante para todos os modelos, 20%. Parede e teto alternam refletância alta, média, baixa e nula. Essas combinações permitiram uma leitura da influência dessas superfícies como difusoras da luz nos modelos. Estes apresentam como fonte de luz uma abertura lateral centralizada. A geometria e a dimensão das aberturas foram mantidas as mesmas para todos os modelos, sendo a dimensão correspondente a 16% da área do piso.

Processamento e análise dos dados

A análise dos dados foi feita por dois métodos: um método gráfico e um analítico. O primeiro teve como objetivo demonstrar a distribuição da parcela de luz refletida nos ambientes, de maneira familiar aos arquitetos, possibilitando análises pela observação das regiões nas quais a CRI apresenta maior contribuição para a iluminação total do interior dos modelos. O segundo método focou uma abordagem quantitativa utilizando ferramentas estatísticas, com o intuito de avaliar, numericamente, a contribuição da CRI para a uniformidade luminosa dos ambientes, considerando a dispersão de valores e possibilitando sua correlação entre modelos variados.

a) Método gráfico

É crescente a utilização de métodos gráficos para a avaliação do desempenho de soluções arquitetônicas quanto à luz natural. Encontram-se, na literatura, autores como Lam (1986), Robbins (1986), Moore (1991), Baker et al. (1993), Baker e Steemers (2002) que propuseram o uso de imagens para salientar o desempenho da luz natural referente às formas arquitetônicas. Seus estudos descreveram o uso de conjuntos de conceitos, englobando os vários tipos de espaços iluminados naturalmente como uma ferramenta de anteprojeto.

Entende-se que, conforme a geometria do espaço, as características das aberturas e das superfícies, a luz refletida pode ser direcionada para determinada área do ambiente. Quando se trabalha com a iluminação natural, as aberturas são consideradas as principais fontes de luz. Utilizaram-se, então, as aberturas como elemento referencial para a classificação do direcionamento da luz refletida interna. Com o intuito de viabilizar a leitura do direcionamento da luz nos 96 modelos, desenvolveu-se a classificação indicada na Figura 1 apresentando, de

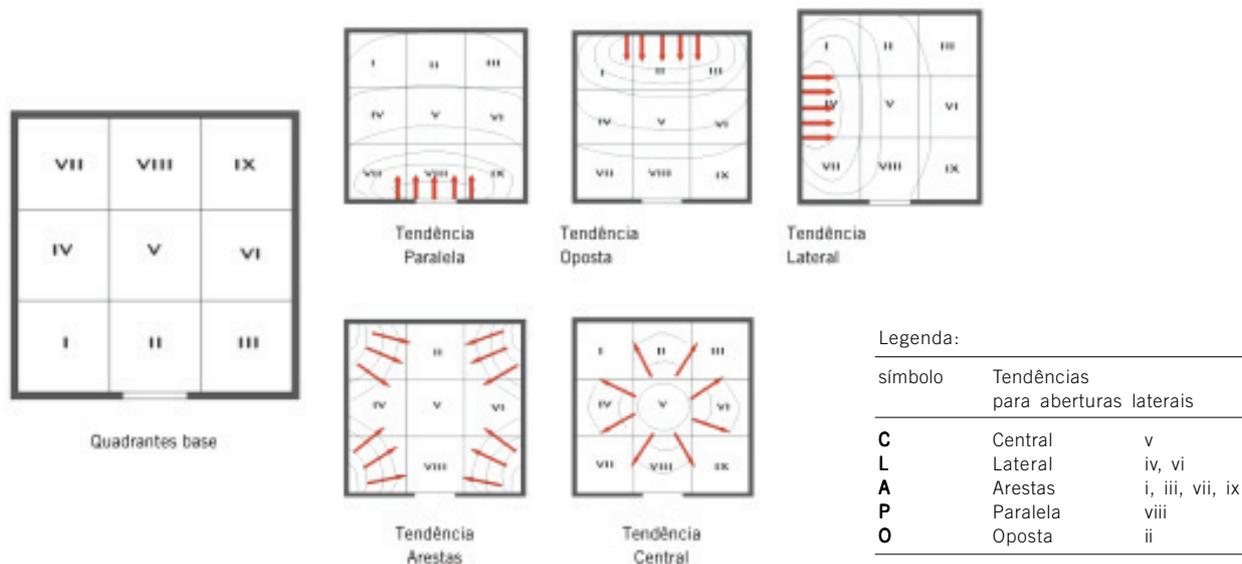


Figura 1: Classificação de tendências de distribuição de luz para aberturas laterais
 Fonte: FONSECA, 2007

forma esquemática, a tendência de direcionalidade da iluminação para aberturas laterais como: tendência central, tendência arestas, tendência oposta, tendência lateral e tendência paralela às aberturas, e para as aberturas zenitais denominadas apenas como: tendência central, tendência arestas e tendência lateral. Em determinadas situações pode-se encontrar mais de uma alternativa como solução. Essa classificação ocorreu em função de cada abertura.

Para essa classificação dividiu-se o ambiente em nove quadrantes de mesma área. A direcionalidade da luz foi classificada conforme os quadrantes que apresentaram os maiores percentuais de fator de luz diurna refletida.

O mapeamento da iluminação refletida nos modelos foi realizado por dois gráficos, ambos gerados no WinSurf v.5; um, em 2D, referente à escala geral do estudo, e outro em 3D apresentando escala individual. O programa APOLUX oferece a possibilidade de definição de cinco zonas de iluminação. Trabalhou-se com intervalos situados entre o valor máximo e mínimo de FLD_r encontrados entre os modelos, possibilitando comparações entre todo o conjunto do estudo. Essas zonas correspondem à magnitude de contribuição da iluminação refletida interna aos ambientes.

(6) Esse coeficiente é expresso em porcentagem e é entendido como a relação entre o desvio padrão e a média aritmética.

(7) FLD_m – Fator de Luz Diurna médio.

b) Método Analítico

O desempenho dos ambientes foi analisado conforme a uniformidade na distribuição de luz no mesmo. A luz refletida proporciona um incremento para essa uniformidade. A avaliação da contribuição da luz refletida interna nos modelos foi realizada por meio da relação entre o coeficiente de variação⁶ (c.v.) da parcela de luz total (FLD_m⁷ – iluminação total) e da parcela de luz direta (FLD_m – iluminação direta).

$$cv = \frac{\sigma}{FLD_m} \cdot 100 \quad (\text{eq.1})$$

onde:

ó = desvio padrão

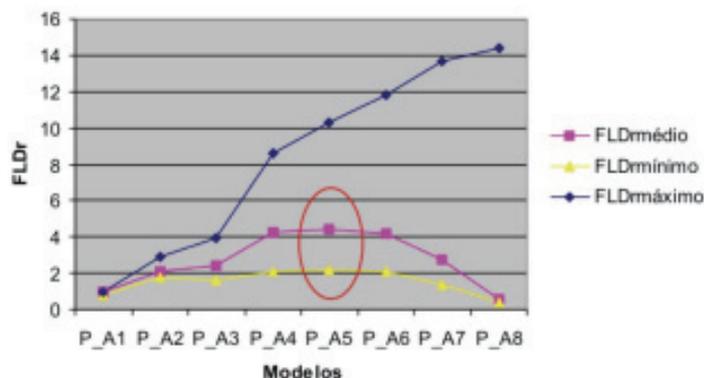
FLD_m = Fator de Luz Diurna médio

O resultado dessa relação corresponde à contribuição da parcela refletida da luz e foi denominado percentual de redução (reduz a heterogeneidade do ambiente, tornando a iluminação mais homogênea). Os sistemas que permitirem um percentual de redução mais elevado, conseqüentemente, apontam para uma solução na qual a CRI apresenta maior representatividade na uniformidade luminosa do ambiente. O percentual de redução foi calculado por meio da equação 2:

$$\text{Porcentual de redução} = [1 - (\text{c.v. total} / \text{c.v. direta})] \cdot 100 \quad (\text{eq. 2})$$

Vale salientar que quanto mais homogêneo for o ambiente, menor será o coeficiente de variação. Entretanto, para este estudo, a questão abordada foi a contribuição da CRI; logo, modelos que apresentem uma iluminação homogênea não são, necessariamente, os que apresentam maior contribuição da CRI.

Gráfico 1: Gráfico FLDr máximo, médio e mínimo
Fonte: FONSECA, 2007



A ILUMINAÇÃO REFLETIDA INTERNA E O AMBIENTE CONSTRUÍDO

Muitos aspectos interessantes quanto à iluminação natural refletida no ambiente edilício puderam ser observados nesta discussão. Quanto ao questionamento que motivou esta pesquisa, a área das superfícies refletoras mostrou-se mais representativa que a porcentagem de abertura, como ilustra o Gráfico 1. O FLD_m (Fator de Luz Diurna refletida média) aumentou conforme as aberturas foram ampliadas até o modelo P_A5, correspondente a 40% de abertura, atingindo o valor de 4.4%. A partir desse ponto os valores começaram a decair, pois nesses modelos a maior parte da luz atingiu diretamente o plano de trabalho, sem sofrer reflexões nas paredes, teto ou piso.

Dando seqüência às questões levantadas quanto ao comportamento da luz refletida interna, conforme geometria do ambiente, características das aberturas e refletância das superfícies, alguns aspectos principais foram pontuados. Esses aspectos foram relacionados com obras arquitetônicas; entretanto, devido a limitações editoriais, apenas os resultados considerados mais expressivos foram representados por figuras.

Iluminação refletida interna x geometria do espaço

No que concerne à geometria, pode-se inferir que a planta é fator determinante do direcionamento da luz, pois modificações no comprimento e largura podem influenciar na configuração do ambiente luminoso, enquanto variações de altura alteram apenas a intensidade da luz refletida. Os ambientes classificados intermediários e os de pé-direito alto, com abertura centralizada, refletem a luz a partir das arestas da envolvente e da superfície oposta à janela. Enquanto, nos ambientes profundos, a luz é refletida com mais freqüência a partir das arestas e nos ambientes largos na superfície oposta.

Exemplo arquitetônico relacionado a um modelo teórico – *Slice house*

A relação da forma do ambiente com a abertura é determinante no comportamento da luz refletida. Observou-se que, para um melhor rendimento dessas reflexões em ambientes profundos e largos, o arquiteto deve focar-se nas superfícies próximas às arestas adjacentes à abertura, para o primeiro caso, e na superfície oposta à janela para o segundo.

(8) Mapas isolux são mapas formados por curvas isolux, que, por sua vez, são linhas as quais unem os pontos de mesma iluminância (mesmo nível de lux). Possibilitam identificar regiões com maior ou menor nível de iluminação. Quanto maior a proximidade entre as curvas, maior a estratificação da iluminação.

Uma obra que contempla esse tipo de solução arquitetônica é a *slice house*, do arquiteto Fernando Rihl (Figura 2). Um estudo realizado em laboratório na Universidade Federal de Santa Catarina, com participação dos alunos Lissandra, Marlon e Ricardo avaliou as condições da iluminação natural em modelo em escala sob céu artificial de caixa de espelhos, considerando o cômodo principal da obra. O espaço apresenta uma abertura superior (fundo da piscina) em uma face estreita, uma grande abertura de acesso na outra e uma abertura superior em uma das faces mais amplas. Em um segundo momento foi avaliado o ambiente com a abertura da face ampla fechada. Apesar de as medições terem sido realizadas considerando a iluminação total, a comparação dos mapas isolux⁸, resultantes dessas medições, com os mapas decorrentes das simulações da luz refletida nos modelos I_C, ilustram como a leitura em modelos abstratos pode ser aplicada à arquitetura. A mancha verde indicando redução dos níveis de iluminação (Figura 2-1b), quando a abertura é fechada, coincide com a forma da distribuição da luz no modelo abstrato (Figura 2-2a), distribuindo-se a partir da parede oposta à abertura. O que permite demonstrar que, com o fechamento da abertura, a perda de luz refletida foi extremamente significativa para o contexto, evidenciando a contribuição da mesma para a iluminação dos ambientes.

Iluminação refletida interna x porcentagem de abertura em relação à área da fachada

A razão entre a área do envelope e a área de abertura pode constituir-se em um parâmetro de avaliação do desempenho da luz refletida, pois apresentou correlação relevante tanto para características quantitativas (FLD_{rm}) quanto para qualitativas (contribuição da CRI). Embora a relação com FLD_{rm} tenha apresentado correlação positiva, a relação com a contribuição da CRI foi correlação negativa.

Por sua vez, o aumento na porcentagem de abertura não modifica a tendência de direcionamento da luz, apenas aumenta a intensidade da iluminação refletida.

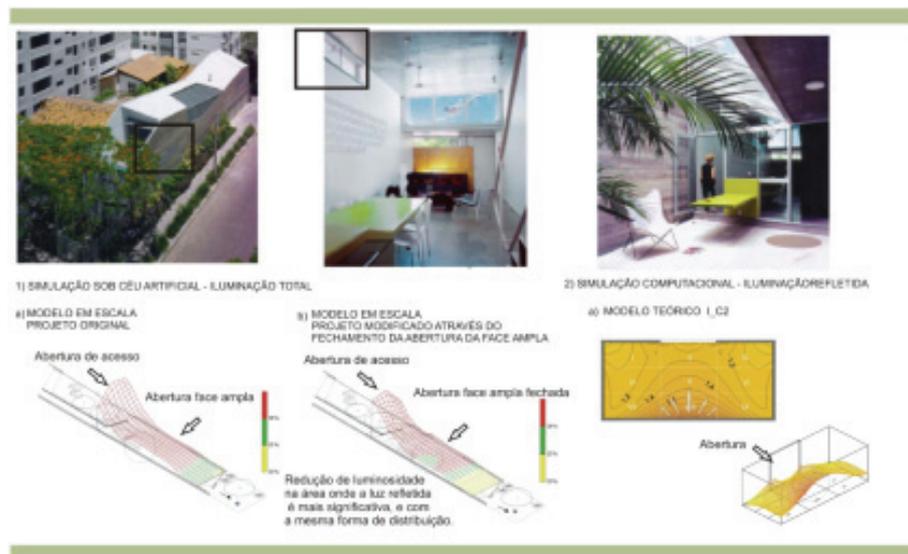


Figura 2: Relação entre modelos teóricos e caso real. Obra *slice house*. Fonte: FONSECA, 2007

Iluminação refletida interna x posicionamento das aberturas

A modificação do posicionamento de uma abertura pode alterar a tendência de direcionamento da luz. O resultado dessa modificação de posição ocorre de forma singular para cada geometria de espaço; porém é muito semelhante quando a diferença geométrica é apenas na altura.

Aberturas zenitais centralizadas sempre refletirão a luz nas superfícies verticais mais próximas, gerando tendência de direcionamento da luz a partir das superfícies laterais independentemente da geometria.

Exemplo arquitetônico relacionado a um modelo teórico – Capela da Luz

Para a observação da influência da luz refletida, segundo o posicionamento das aberturas, foi escolhida uma edificação emblemática, a Capela da Luz do arquiteto japonês Tadao Ando. Foram utilizados dados obtidos em estudo realizado em laboratório com participação dos alunos Cecília, Mariana e Marcelo, no qual foi confeccionado um modelo físico em escala e simulado sob céu artificial de caixa de espelhos. O objeto de estudo constituiu-se em fenda em forma de cruz, comparada com o modelo teórico III_B2 que apresenta uma abertura vertical.

Constatou-se que a porção das paredes laterais em que a luz é refletida será mais próxima das arestas adjacentes à abertura quanto maior for esta; conseqüentemente, apresentando níveis mais elevados de luz. Esse fenômeno é explicado pelo ângulo de céu visível que a dimensão da abertura permite ver (Figura 3).

A Figura 3-1a mostra a planta original, na qual foi avaliada apenas a seção frontal da igreja. Em seguida, a fenda da cruz foi ampliada de 20 cm para 60 cm (Figura 3-1b). Vale salientar que o modelo foi construído na escala 1:20. Por fim, compara-se com o modelo teórico III_B2, Figura 3-2a. Apesar de os dois primeiros casos considerarem a luz total, e a cruz ainda possuir um elemento horizontal, que, ampliado, aumenta os níveis de iluminação no sentido transversal, fica claro

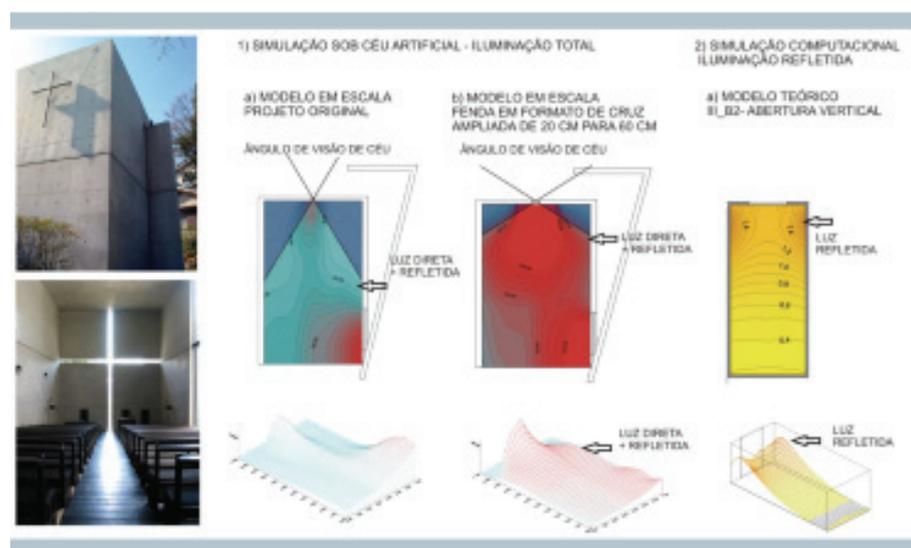


Figura 3: Relação entre modelos teóricos e caso real. Capela da Luz
Fonte: FONSECA, 2007

o mesmo foco de distribuição de luz refletida para os três modelos: as paredes laterais. Obviamente, resguardando suas respectivas proporções.

Iluminação refletida interna x distribuição das aberturas

A mesma área de abertura, distribuída de forma diferente, pode gerar tendências de direcionamento de luz semelhantes, mas com intensidades distintas, como ocorreu com aberturas centralizadas distribuídas paralela e perpendicularmente uma à outra.

Quando duas aberturas são combinadas, a tendência de reflexão de luz na superfície oposta é a mais freqüente; porém, quando existe apenas uma abertura, a tendência de reflexão de luz proveniente das arestas do ambiente é predominante.

A mesma área de abertura distribuída em uma ou duas aberturas apresenta FLDm muito próximos, desde que essas aberturas apresentem altura semelhante e estejam inseridas em superfícies no plano vertical, tendo acesso às áreas de céu de mesmas características.

Iluminação refletida interna x refletividades das superfícies

Quanto à alteração na refletância das superfícies, observaram-se mudanças somente na intensidade do direcionamento da luz. Apenas em caso extremo, no qual foi adotada refletância nula para as paredes, ocorreu alteração na tendência de direcionamento da luz. As reflexões, que nos outros modelos ocorriam a partir das arestas da envolvente ou da superfície oposta, passaram a distribuir-se radialmente.

As reflexões nas paredes são mais significativas que as reflexões no teto. Não apenas por constituírem quase o dobro da área, mas por algumas partes dessas superfícies receberem luz diretamente do céu.

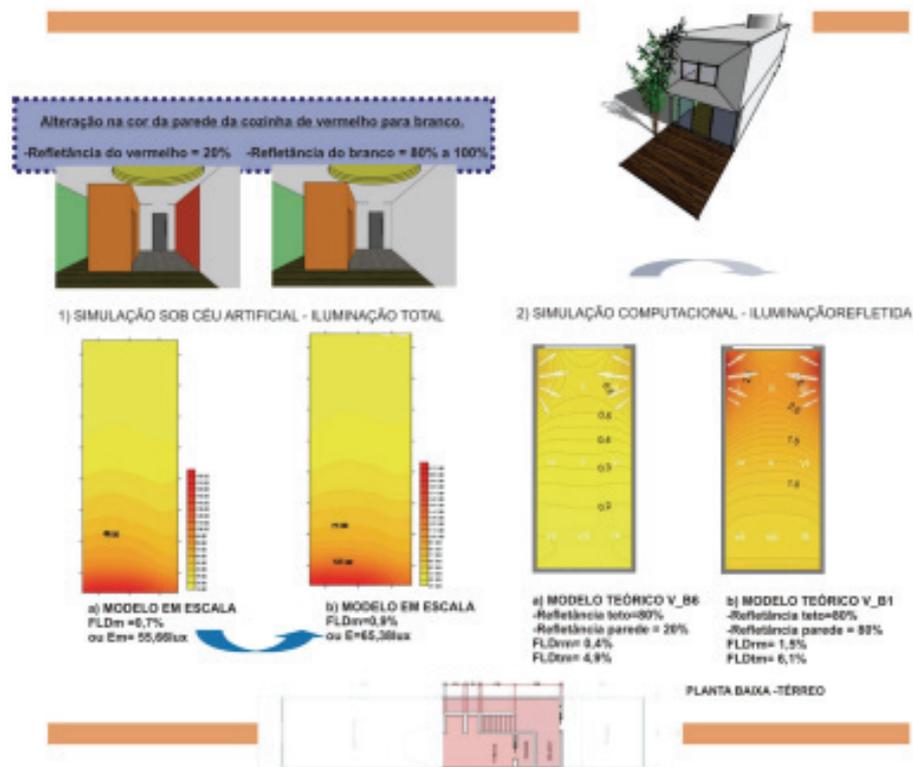
A redução simultânea das refletâncias de parede e teto ocasiona maior impacto na contribuição da luz refletida para homogeneizar o ambiente luminoso em ambientes de geometria intermediária e larga, seguidos da geometria profunda e com menos intensidade em ambientes altos.

Exemplo arquitetônico relacionado a um modelo teórico – Residência em Paris

A edificação adotada trata-se de uma residência localizada em Paris. Foi efetuado um estudo da iluminação do ambiente em modelo físico sob céu artificial de caixa de espelhos, em laboratório, com participação dos alunos da graduação Thiago e Anielle. O estudo concedeu maior enfoque para a área da cozinha, na qual uma das paredes era pintada de vermelho ($r = 20\%$), (Figura 4-1a). Foi proposta a alteração da cor da parede para o branco ($r = 80\%$ a 100%), (Figura 4-1b). Considerou-se o FLDm referente à iluminação total do ambiente; todavia, como a única variável alterada foi a refletância da parede, pode-se atribuir a variação dos valores de iluminação à parcela refletida da luz.

A Figura 4 traz uma comparação deste estudo, considerando alteração de refletâncias em edifícios, com os resultados obtidos nas simulações dos modelos teóricos abordados neste trabalho. Foram destacados os modelos V_B6 (Figura 4-2a) e V_B1 (Figura 4-2b), nos quais a refletância do teto foi mantida constante ($r = 80\%$) e a refletância das quatro paredes corresponde a 20% a 80% respectivamente.

Figura 4: Relação entre modelos teóricos e exemplo arquitetônico. Residência em Paris
 Fonte: FONSECA, 2007



Independente da variação das refletâncias ocorrerem nas quatro paredes nos modelos teóricos e apenas em uma no exemplo arquitetônico, aponta-se, como conseqüência do aumento da refletância de 20% para 80% em ambos os casos, a intensificação na iluminação do ambiente. Por outro lado, não houve alteração relevante no direcionamento da luz.

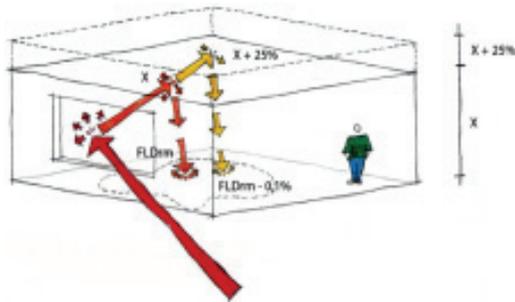
CONSIDERAÇÕES FINAIS

No tocante às considerações sobre o comportamento da luz natural refletida no interior dos ambientes em relação às suas características físicas, alguns aspectos finais puderam ser elencados.

Quanto à tendência de distribuição de luz mais freqüente, considerando todas as variações tipológicas estudadas, a tendência de distribuição de luz mais freqüente constituiu-se na luz que se distribui a partir das arestas dos ambientes seguida das reflexões na superfície oposta à abertura. Na maioria dos casos, elas correspondem às superfícies que apresentam melhor relação com o céu. Com menos freqüência, aparece a luz refletida nas paredes laterais. Em casos muito específicos surge a tendência de a luz se refletir paralelamente à abertura e a distribuir-se a partir do centro do espaço.

Já no âmbito da contribuição da CRI para a homogeneidade do ambiente luminoso, pode-se afirmar que o acréscimo de seus valores não é garantido pelo aumento do FLDm, exceto quando a variante é a refletância das superfícies, que mantém correlação independente da geometria do espaço. Se a variação for à

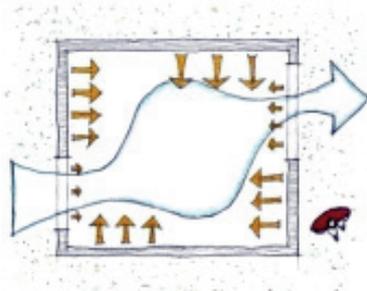
Figura 5: Croqui de diretrizes de projeto para o aproveitamento da CRI
 Fonte: FONSECA, 2007



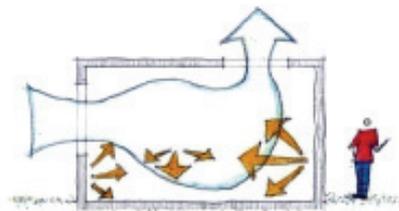
(a) Esquema da redução do FLDrm para ambientes de proporções 2:2:1, quando o pé-direito é elevado em 25%

(b) Croqui de planta com distribuição paralela descentralizada

LUZ



VENTO



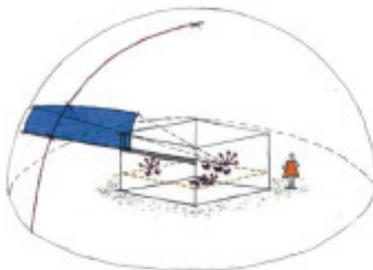
VENTO

(c) Corte esquemático com distribuição perpendicular

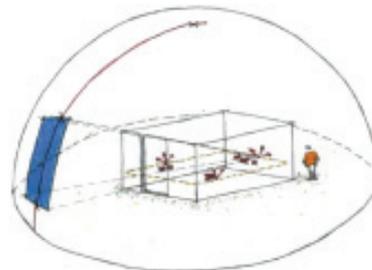
(d) Planta esquemática do aproveitamento da refletividade das superfícies



(e) Ambiente de planta quadrangular com abertura horizontal alta



(f) Ambiente de planta retangular com abertura vertical



porcentagem das aberturas, só existe correlação para cada geometria separadamente. Quando a posição das aberturas é alterada, não é possível relacionar o aumento do FLDr_m com a contribuição da CRI. Para alterações na distribuição das aberturas existe correlação apenas para ambientes de planta regular (quadrada). Logo, pode-se inferir que a refletância é o parâmetro mais significativo na manipulação da luz refletida.

A alteração da geometria do espaço e da distribuição das aberturas, isoladamente, não provoca variações muito expressivas nos níveis de FLDr_m. Por outro lado, alterações na refletividade das superfícies, posição e porcentagem de abertura são bastante significativas.

O método gráfico proposto possibilitou análise eficiente do comportamento da luz refletida interna. Esse método permite, ao arquiteto, a visualização dos pontos de maior potencial para o aproveitamento dessa parcela de luz, em variadas conformações de ambientes.

Por sua vez, o método analítico desenvolvido permitiu avaliar o desempenho da luz refletida inserida no contexto da iluminação total. A correlação entre FLDr_m e a contribuição da CRI para a homogeneidade luminosa do ambiente evidenciou que nem sempre há vínculo entre os níveis que a luz refletida alcança e sua contribuição, considerando o ambiente luminoso total.

O Programa Apolux, utilizado nas simulações computacionais, mostrou-se amigável à implementação de novos elementos, como o plano de análise e os zoneamentos de iluminação, que facilitaram a avaliação dos resultados.

Decisões de projeto que potencializam o aproveitamento da iluminação refletida interna

Baseado no que foi discutido, foram elaboradas algumas recomendações para a consideração da luz refletida interna como parâmetro de verificação nas fases iniciais de projeto.

Geometrias mais compactas, espaços projetados com menor relação entre comprimento x largura x altura, possibilitam maior contribuição da CRI para homogeneizar a iluminação natural do ambiente. No caso de um ambiente de proporções 2:2:1, com abertura centralizada, quando tem sua altura elevada em 25% e suas refletâncias mantidas constantes, seus níveis de FLDr_m na região central são reduzidos em cerca de 0,1% ver (Figura 5a). Essa redução média de 0,1% repete-se quando se distribui a área de uma abertura em duas também centralizadas, porém localizadas em superfícies distintas.

Visando maior contribuição da CRI, o posicionamento das aberturas deve ser projetado em função da área de céu visível, considerando a geometria do ambiente como o meio que definirá a trajetória de distribuição da luz na direção desejada.

A opção por distribuir a área de abertura em duas aberturas, por exemplo, pode ser mais vantajosa, principalmente se forem desencontradas e não exatamente paralelas. Pois, além do melhor aproveitamento da luz refletida, permite a aplicação de estratégias bioclimáticas como ventilação cruzada, como ilustra a Figura 5.b.c. A opção por aberturas perpendiculares permite, ainda, um contato direto com o zênite; porém, apesar de garantir maiores níveis de iluminação, deve-se considerar a questão do ganho de calor.

Intervenções nas propriedades das superfícies podem tornar a distribuição de luz mais uniforme. É possível, por exemplo, utilizar cores com refletâncias altas

(como o branco) nas áreas mais afastadas das aberturas e cores claras, com refletância intermediária, nas superfícies nas quais as aberturas estão inseridas ou próximas a elas. Assim, evita-se o ofuscamento utilizando-se emolduramentos escuros ao redor das aberturas, garante-se uma distribuição de luz adequada e obtém-se um melhor aproveitamento da luz refletida nas áreas no interior do ambiente. O mobiliário pode ser aproveitado para alcançar esse tipo de combinação de refletâncias, de acordo com a Figura 5d.

As superfícies internas mais favorecidas pelo ângulo de visão de céu serão as mais expressivas no direcionamento da luz refletida, seguidas das superfícies que recebem luz daquelas primeiras, diretamente. O aproveitamento adequado dessas superfícies, com o aumento de suas refletâncias, por exemplo, pode elevar o desempenho do ambiente luminoso (Figura 5.d).

O melhor desempenho da contribuição da luz refletida para a homogeneidade do ambiente luminoso ocorre:

- Para ambientes de planta regular (quadrada), com aberturas horizontais elevadas (Figura 5.e) ou verticais, e, quanto à distribuição, com aberturas em superfícies perpendiculares;

- ambientes largos se diferenciam dos anteriores apenas pelo fato de a distribuição de aberturas mais vantajosa ser a de aberturas em superfícies adjacentes;

- ambientes profundos são favorecidos por aberturas verticais (Figura 5.f) e zenitais. Quanto à distribuição, o maior potencial é atribuído a aberturas em superfícies paralelas.

BIBLIOGRAFIA

- ANDER, G. A. Daylighting Performance and Design. *Ashrae Journal*, Georgia, 2003.
- BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STTEMERS, K. *Daylighting in architecture – A European reference book*. Commission of the European Communities, Directorate – General XII for Science Research and Development. Londres: James & James Ltd., 1993.
- BAKER, N.; STTEMERS, K. *Daylight design of buildings*. Londres: James & James Ltd., 2002.
- BOYCE, P. *Lighting research for interiors: Beginning of the end or the end of the beginning*. Department of Energy. Nova York: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2004.
- CIE Spatial distribution of daylight – *CIE standart overcast sky and clear sky*. Commission Internationale de L'Eclairage Viena: Publication CIE, S 003.3/E, 1996.
- CISBE. The Chartered Institution of Building Service Engineers. *Code for interior lighting*. Londres: CISBE, 1994.
- CLARO A.; PEREIRA, F. O. R.; AGUIAR, G. P. *Desenvolvimento do protótipo do software Luz Solar para análise e projeto de iluminação natural em arquitetura e Urbanismo*. Relatório Final do Projeto 027-01 entregue à CELESC, LABCON/UFSC, 2004.
- FONSECA, R. W. *A Influência das reflexões internas na iluminação natural no ambiente construído*. 2007. 167p. Dissertação (Mestrado) – PosARQ, Universidade Federal Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 2007.
- FLORIANÓPOLIS. Lei Complementar, n. 60. *Código de obras e edificações*. Florianópolis: Secretaria Municipal de Urbanismo e Serviços Públicos da Prefeitura de Florianópolis, 2000.
- LAM, W. M. C. *Sunlighting – As formgiver for architecture*. Nova York: Van Nostrend Reinhold Company, 1986.

- LAMBERTS, R. ; PEREIRA, F. O. R. ; DUTRA, L. *Eficiência energética na arquitetura*. 2. ed. São Paulo: PW, 2004.
- LITTLEFAIR, P. Daylight prediction in atrium buildings. UK-Watford WD25 – 9XX. *Solar energy*, v. 73, 2002. Artigo técnico. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: setembro 2006.
- LYNES, J. A. *Principles of natural lighting*. Nova York: Elsevier Publishing Company, 1968.
- MOORE, F. *Concepts and practice of architectural daylighting*. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- ROBBINS, Claude L. *Daylighting, design and analysis*. Nova York: An Nostrand Reinhold Company. 1986.
- REINHART C.; FITZ A. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. *Energy and buildings*. Grã-Bretanha: Elsevier Science Ltda, 2006.
- RUCK, N. C. Task 31, Daylighting buildings in the 21st Century International Energy Agency's Solar Heating and Cooling. Artigo técnico. *Energy and building*, Grã Bretanha: Elsevier Science Ltda, n. 38, 2006. Disponível em: <http://www.iea-shc.org/task31/>. Acesso em: setembro, 2006.
- SOUZA, M. A. S. Arquitetura eficiente e o uso de energia. Mais Suplemento. *Mais Arquitetura*, São Paulo, 2001.
- SZOCOLAY S. V. *Environmental science handbook*. Lancaster: The Construction Press, 1980.

Nota do Editor

Data de submissão: abril 2010

Aprovação: agosto 2010

Raphaela Walger da Fonseca

Arquiteta e Urbanista pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR) e mestrado em Arquitetura pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), doutoranda pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e pesquisadora do Laboratório de Conforto Ambiental da mesma Universidade.

Campus Universitário UFSC

Caixa Postal 476

88040-900 – Florianópolis, SC

(48) 3721-9393

raphawf@gmail.com, raphawf@labcon.ufsc.br

Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Engenheiro civil (UFRGS) MSc(UFRGS) e PhD(University of Sheffield/UK) e professor titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (UFSC).

Campus Universitário UFSC - Trindade

CTC - Departamento de Arquitetura e Urbanismo

CEP 88.040-900 Florianópolis, SC

feco@arq.ufsc.br

Anderson Claro

Arquiteto, doutor em Engenharia de Produção (UFSC). Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Conforto Ambiental

Cx Postal 470

88040-970 - Florianópolis-SC,

Tel.: (48) 3721-9550

ander@arq.ufsc.br