



## COMPORTAMENTO LUMINOSO DE DUTOS DE LUZ E SEU EMPREGO COMO FONTE LUMINOSA NO MÉTODO DOS LÚMENS

**Fernando O. Ruttkay Pereira (1); Fernando Flesch de A. Fernandes (2); Fellipy Souza Hipólito (3); Gabriel George Grosskopf (4);**

(1) PhD, Professor do PósARQ/UFSC, [ruttkay.pereira@ufsc.br](mailto:ruttkay.pereira@ufsc.br)

(2) Graduando de Arquitetura e Urbanismo, bolsista IC – UFSC – CNPq, [fernandoflesch@yahoo.com.br](mailto:fernandoflesch@yahoo.com.br)

(3) Graduando de Arquitetura e Urbanismo, bolsista PIBIC – CNPq, [fellipyhipolito@gmail.com](mailto:fellipyhipolito@gmail.com)

(4) Graduando de Arquitetura e Urbanismo, PET/ARQ/UFSC, [gabreorge@gmail.com](mailto:gabreorge@gmail.com)

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721-7080

### RESUMO

Soluções convencionais para iluminação natural, como aberturas laterais, nem sempre são a melhor opção por gerarem usualmente uma distribuição de iluminação irregular. Hoje em dia, o espaço para construções vem se reduzindo, tornando mais difícil o acesso à luz do sol e abóbada celeste. A oferta de sistemas não convencionais voltados à captação de luz natural no Brasil é ainda bastante incipiente e há uma carência de informações sobre o seu efetivo comportamento fotométrico. Sendo assim, este trabalho procura estudar o comportamento luminoso de dutos de luz (DL), buscando a sua efetiva inserção como um sistema luminoso integrado a outros sistemas de iluminação. As etapas do estudo consistiram em: (i) medição do fluxo luminoso transmitido através de diversas configurações de um duto de luz da marca Solatube, utilizando-se fotografias HDR; (ii) determinação de coeficientes de transmissão luminosa (CTL); (iii) medição dos valores de iluminância em um modelo físico, a fim de verificar a hipótese de trabalho de se usar os coeficientes de transmissão para configurar o duto como um plano envidraçado para efeitos de simulação computacional; (iv) configuração do duto como uma fonte de luz para efeitos de seu uso no Método dos Lúmens. A proposta mostrou-se consistente no que diz respeito à determinação do fluxo luminoso admitido por sistemas não convencionais. Através da adaptação do Método dos Lúmens, concebeu-se um sistema com um número de dutos capaz de garantir a iluminância alvo por quase metade do tempo de ocupação. Assim, viabiliza a integração e complementação entre os dois sistemas na busca da redução do consumo de energia elétrica em edificações.

Palavras-chave: iluminação natural, duto de luz, método dos lúmens, técnica HDR,

### ABSTRACT

Conventional solutions for daylighting, such as lateral apertures, are not always the best option because they usually generate uneven lighting distribution. Nowadays, the space for constructions has been reduced, making difficult the access of the building to the light of sun and sky vault. The offer of non-conventional systems directed to the capture of daylight in Brazil is still very incipient and there is a lack of information about the its effective photometric behavior. Thus, this work aims to study the luminous behavior of light ducts, seeking its effective insertion as a light source aiming at the complementation of other lighting systems. The steps of the study consisted of: (i) measurement of the luminous flux transmitted through several configurations of a light duct called Solatube, using HDR photographs; (ii) determination of light transmission coefficients; (iii) measurement of the illuminance values in a physical model, in order to verify the working hypothesis of using the transmission coefficients to characterize the duct, configuring it as a glazed plane for the purpose of computer simulation; (iv) configuration of the duct as a light source to be used in the Lumens Method. The proposal was quite consistent with regard to the determination of the luminous flux of non-conventional systems. Through the Lumens Method, it was obtained a light duct system capable of guarantee the illuminance target during almost half of the occupied período. Thus, it allows the integration and complementation between the two systems in the search for a reduction in the electric energy consumption in buildings.

Keywords: daylighting, light duct, lumen method, HDR technique.

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais, com o adensamento populacional, o espaço edificável torna-se mais limitado pelo entorno, dificultando o acesso das edificações à luz do sol. As soluções convencionais, através de aberturas laterais (janelas), quando utilizadas isoladamente, geralmente estabelecem uma distribuição da iluminação muito irregular nos ambientes internos, provocando iluminâncias excessivas nas regiões próximas à abertura, com consequentes problemas de ofuscamento e iluminação insuficiente nos pontos mais distantes (REINHART, 2014; CIE, 2006; SILVA, 2006). Com isto, as soluções não convencionais surgem na complementação e inovação dos sistemas tradicionais, ou seja, conduzindo a luz natural até onde seja necessário e onde não seja possível o uso de aberturas laterais, como por exemplo, nos subsolos. Muitas corporações estrangeiras já têm assumido o uso de dutos de luz natural em seus projetos corporativos (LAOUADI, 2005; TORCELLINI et al, 2007). Estudos de campo mostram que dutos podem contribuir com 25% a 50% da iluminância alvo geral (ALMARWAE & CARTER, 2006).

Entretanto, atualmente no Brasil, existe uma oferta muito reduzida destes produtos de captação de luz natural. Além disso, há uma carência de informação sobre o efetivo comportamento fotométrico dos dutos de luz. Poucos dados técnicos estão disponíveis para possibilitar a efetiva inserção de Dutos de Luz (DL) como um sistema de complementação a outros sistemas de aberturas e de iluminação artificial. A dinâmica da disponibilidade de luz natural, seja na variação de sua magnitude, seja na sua distribuição espacial, impõe também mais esta variável no comportamento luminoso dos DL, somando-se a sua já reconhecida complexa geometria (ASHRAE, 2012; MALET-DAMOUR et al, 2014).

Estudos recentes (INANICI, 2006; MARDALJEVIC et al, 2009; PEREIRA, et al, 2015) apresentam o potencial da técnica fotográfica baseada em HDR (High Dynamic Range) para medir o fluxo luminoso transmitido através de sistemas de aberturas de geometria complexa. Estudo relativamente recente conduzido pela ASHRAE, reconhece a falta de métodos de cálculo e ferramentas de projeto capazes de prever o desempenho luminoso-energético de DL (KOCIFAJ et al, 2010; ASRHA, 2012).

Por outro lado, um dos métodos mais empregados internacionalmente para o projeto luminotécnico é o Método dos Lúmens, que pressupõe o conhecimento da razão entre o fluxo luminoso útil (que gera iluminação no plano de trabalho) e o fluxo luminoso emitido pelo conjunto lâmpada/luminária (IESNA, 2013). Desta forma, a configuração de sistemas de iluminação não convencionais para este método, pode proporcionar uma efetiva combinação entre sistemas de iluminação natural e artificial, desde os primeiros passos de projeto, na busca de eficiência energética em iluminação. Assim, uma vez possível a determinação do fluxo luminoso de sistemas de DL, através da técnica HDR, fica viável a possibilidade de se realizar o pré-dimensionamento de ambos os sistemas, natural e artificial, através do mesmo procedimento de cálculo.

Considerando todos estes aspectos, o objeto de estudo é uma investigação de como introduzir uma fonte de luz natural não convencional, tal como um DL, no contexto de métodos regularmente empregados para o projeto de sistemas de iluminação.

## 2. OBJETIVO

Determinar o comportamento luminoso de DL utilizando a técnica HDR e configurá-lo no contexto do Método dos Lúmens para integração dos dutos com o sistema de iluminação artificial.

## 3. MÉTODO

O método utilizado está estruturado em quatro etapas. A primeira etapa trata-se do principal procedimento experimental, que consistiu na medição do fluxo luminoso transmitido através de diversas configurações do duto de luz Solatube 160 DS; estes dados experimentais foram utilizados para determinação do Coeficiente de Transmissão Luminosa (CTL) para cada configuração do dispositivo. O CTL é definido como a razão entre o fluxo luminoso emitido pelo difusor do duto e o fluxo luminoso incidente na abertura superior do mesmo. A segunda etapa consistiu numa avaliação comparativa entre iluminâncias medidas e simuladas, produzidas pelas diferentes configurações do duto no interior de um modelo físico, com o intuito de verificar o uso do CTL para configurar o DL, assumindo este coeficiente como a Transmitância Visível (TV) de um simples plano envidraçado para efeitos de simulação computacional. A terceira etapa consistiu na realização de simulações computacionais utilizando-se o plug in DIVA-for-Rhino, versão 3, 2014 (desenvolvido pela empresa Solemma LLC), para o software Rhinoceros 3D, v 5 (13/09/2016), a fim de verificar o comportamento dinâmico de um ambiente iluminado por dutos de luz, através do parâmetro Daylight Autonomy (Autonomia da Luz Natural). Na última etapa, procurou-se incorporar o duto de luz natural como uma alternativa de fonte luminosa no Método dos Lúmens, ainda hoje muito empregado pela grande maioria de projetistas de sistemas de iluminação. Este método parte do conhecimento do fluxo luminoso proporcionado por uma fonte e como este

atinge de forma útil o plano de trabalho, para determinar quantas destas fontes seriam necessárias para produzir uma iluminância média alvo, considerando os aspectos geométricos do ambiente e as propriedades fotométricas das superfícies internas.

### 3.1. Medição do fluxo luminoso do duto em diferentes configurações

Os experimentos com DL foram feitos em um céu artificial do tipo “caixa de espelhos”, localizado em um anexo do Laboratório de Conforto Ambiental do curso de Arquitetura e Urbanismo da UFSC. O local é composto por quatro paredes revestidas com espelhos e um sistema de iluminação artificial superior coberto por um plano difusor (CASTAÑO, 2007). Foi utilizado um cilindro de papel preto instalado na saída do duto para evitar o contato da lente da câmera com a parcela de luz refletida no entorno, considerando somente o fluxo luminoso com origem na fonte de iluminação artificial através do plano difusor (Figura 1).

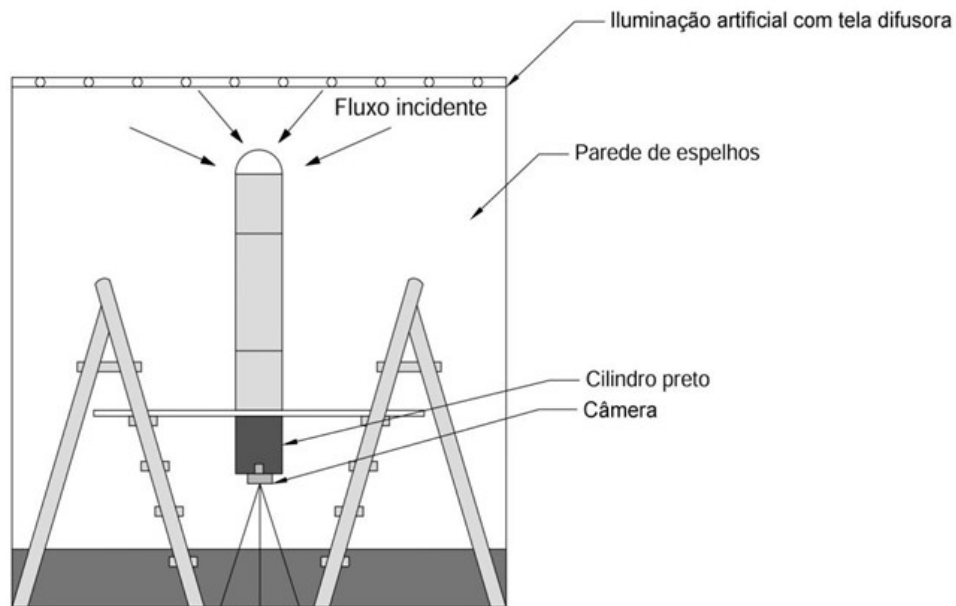


Figura 1 - Desenho esquemático das medições no céu artificial. Fonte: produzido pelos autores

Foi montada uma estrutura no céu artificial a fim de proporcionar suporte ao DL enquanto os devidos equipamentos fossem utilizados para fazer as medições. A estrutura era composta por um apoio de madeira e um par de escadas de alumínio. O DL utilizado é composto basicamente por três partes: domo acrílico para entrada de luz, tubo extensor para conduzir a luz admitida pelo domo e difusor de acrílico e policarbonato, que possui a função de difundir a luz para o ambiente.

Foram propostas seis diferentes configurações do DL (Figura 2), utilizando também a peça curva (joelho de 90°). Através do procedimento experimental para a obtenção de imagens HDRs e da simulação computacional através do programa PHOTOLUX v. 3.2, 2014 (<https://www.photolux-luminance.com>), foram obtidos valores de luminância média difusa apresentada pelo difusor acrílico da saída do duto.

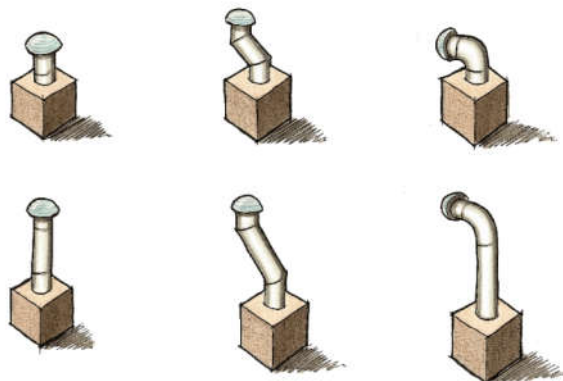


Figura 2 – Desenho esquemático das seis configurações do duto de luz

Para a determinação do fluxo luminoso, os valores obtidos nas medições foram aplicados na Equação 1, conforme segue:

$$\Phi = EA = q^{-1} (L_t - L_r)A \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\Phi$  - fluxo luminoso emitido [lm]

E - iluminância na boca de entrada do duto [lx]

q - coeficiente de luminância do elemento difusor [ $\text{cd}/\text{m}^2 \cdot \text{lx}^{-1}$  ou  $\text{sr}^{-1}$ ]

$L_t$  - luminância média da área da amostra juntamente com o elemento difusor e elemento opaco [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$L_r$  - luminância do elemento opaco [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

A - área de saída de luz do duto [ $\text{m}^2$ ]

A técnica já demonstrou ser viável para medição de elementos simples, como vidros comuns e elementos vazados, apresentando erros médios inferiores a 10%. A técnica também se mostra vantajosa comparada a outros métodos utilizados, principalmente pelo seu baixo custo e praticidade (MARDALJEVIC et al, 2009; PEREIRA & SOUZA, 2016).

Desta forma, a razão entre os fluxos luminosos de saída e entrada do duto determina o CTL que representa o quanto da luz natural que incidente na entrada do duto passa pela saída difusora do mesmo, ingressando no ambiente. Este parâmetro, em última análise, possibilita a caracterização do duto como uma abertura qualquer.

### 3.2. Medição da iluminação gerada em um modelo físico em escala reduzida

A medição das iluminâncias proporcionadas pelo duto no interior de um ambiente foi realizada com o uso de um modelo físico no formato de um cubo de 50cm de aresta (Figura 3), com as seis configurações do DL (Figura 2) encaixado na superfície superior do modelo. Este foi produzido com chapas de compensado, sendo a face superior (tampa) independente das outras cinco faces para o encaixe do duto. A caixa possui duas aberturas de apoio, uma superior necessária para se fixar a fotocélula dentro do modelo e para o correto posicionamento do duto, enquanto a abertura lateral serve para eventual registro fotográfico do interior. Na tampa inferior há uma pequena fenda para o encaixe do cabo da célula fotovoltaica, sem interferir na iluminação interna. A fotocélula utilizada foi da marca Li-Cor, modelo 210SA, acoplado a um leitor Li-Cor, modelo LI-250A.



(a)



(b)

Figura 3 – (a) desenho esquemático do modelo em escala; (b) montagem do duto como fonte de luz do modelo no interior do céu artificial.

As medições de iluminância desta etapa foram realizadas em dois casos diferentes, com a aplicação de

revestimentos internos de alta (tinta branca) e baixa refletância (papel *Canson* preto, colocada no momento das medições):

- Caso 1: revestimento branco, DL completo, com refletância interna aproximada de 85%
- Caso 2: revestimento preto, DL completo, com refletância interna aproximada de 10%

Para a medição foi considerada uma malha de pontos, dividindo-se o ambiente interno do modelo em áreas iguais. A quantidade de pontos mínima foi estabelecida conforme procedimento especificado na NBR 15.215-4 (ABNT, 2004).

Para definir a malha, foi dada uma distância de recuo de 2cm dos planos laterais do modelo. A malha foi então constituída por 9 pontos de medição (Figura 4).

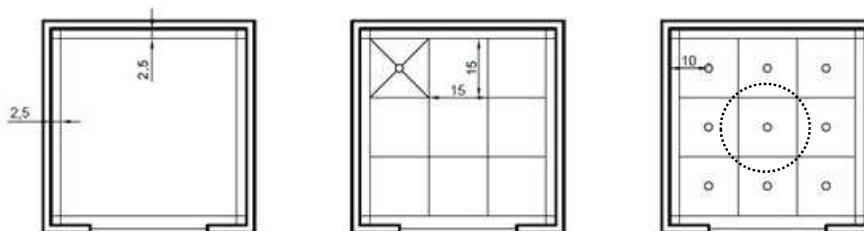


Figura 4 - Traçado da malha de pontos para a medição da iluminância no modelo. A abertura lateral serve apenas para acesso ao interior do modelo, enquanto o círculo tracejado representa o duto.

Com os resultados das medições, são gerados gráficos de iluminância do modelo físico com o uso do software *Surfer*, v 10. Também são calculados a iluminância média ( $E_{média}$ ) e o coeficiente de uniformidade  $U$ , através de  $U = E_{min} / E_{média}$ .

### 3.3. Simulações computacionais

As simulações, desenvolvidas com DIVA-for-Rhino, versão 3, 2014 (desenvolvido pela empresa Solemma LLC), plugin para o software Rhinoceros 3D, v 5 (13/09/2016), serviram para dois propósitos: (1) verificar a hipótese de substituir o DL por uma abertura envidraçada de igual seção com a transmissão luminosa determinada experimentalmente (conforme seção 3.1); esta simulação de iluminâncias foi estática, para condições de Céu Encoberto, em 21 de setembro, às 12:00h; e (2) avaliar o potencial do duto como um sistema de complementação de iluminação num período anual. Para tal, foi simulado o parâmetro dinâmico Daylight Autonomy (Autonomia da Luz Natural), que indica o percentual das horas ocupadas no ano, durante as quais um nível alvo de iluminância pode ser mantido pela iluminação natural (REINHART et al, 2006). O ambiente escolhido foi uma sala de aula do edifício do Curso de Arquitetura e Urbanismo da UFSC. O nível de iluminância alvo foi de 500 lx para salas de aula (ABNT, 2013). As simulações dinâmicas foram realizadas para a cidade de Florianópolis, latitude 27° 35' S, numa base horária, em um intervalo de 8h a 18h e o arquivo climático utilizado possui formato EPW, obtido na base SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment).

## 4. RESULTADOS







### 4.1. Coeficientes de transmissão luminosa obtida para diferentes configurações do duto

A partir das medições de fluxo luminoso através da técnica empregada, foi elaborada uma tabela contendo a configuração do DL, suas dimensões, o fluxo luminoso incidente medido e o transmitido e a transmissão luminosa calculados para cada caso (Tabela 1).

O CTL está diretamente ligado às dimensões e configuração do duto, sendo que é natural quanto maior a área de saída de luz, maior o fluxo luminoso. Outra característica que influencia na eficiência dos DL é a sua forma. Como a principal forma de transmissão da luz no duto é por reflexão, por maior que seja a reflexão interna, dutos retos tenderiam a conduzir melhor a luz do que aqueles "angulados". Outro ponto a ser lembrado é que a transmissão luminosa através do DL também depende do ângulo de incidência da luz. O ângulo de incidência com que os raios atingem a entrada do duto influencia no número de reflexões que ocorre no interior do tubo e podem, conseqüentemente, interferir na transmissão de luz. Considerando este aspecto, carece de uma investigação mais detalhada sobre a sensibilidade dos dutos frente à direcionalidade da energia luminosa incidente. É importante lembrar que o ambiente ao qual os dutos foram expostos representa um céu encoberto (gerado no céu artificial), com uma distribuição conhecida, sem a inclusão do sol direto. Supõe-se que o CTL apresente valores distintos diante da incidência de luz direta do sol, especialmente em ângulos de incidência reduzidos.

Quanto aos valores do CTL, os resultados foram os esperados, exceto para as configurações curvas (joelho de 90°). Para estas, esperava-se um coeficiente mais reduzido, mas ocorreu o inverso. A explicação mais plausível é a de que como o céu artificial apresenta um brilho mais intenso (luminâncias mais elevadas) na direção do Zênite, uma grande parcela do fluxo luminoso proveniente desta direção, no caso das configurações voltadas para cima (reto e “s”, códigos 1 a 4), acaba sendo refletida pelo sistema de lentes Fresnel, existente no domo de entrada de luz, para as laterais no interior do tubo; fenômeno que é parcialmente compensado nas configurações voltadas para o horizonte (joelhos, códigos 5 e 6). Nestes últimos, com os maiores coeficientes de transmissão (77,8% e 63,8%), supõe-se que as lentes Fresnel tenham direcionado o fluxo transmitido para o interior do duto. Esta descoberta reforça a necessidade de se aprofundar o processo de caracterização do comportamento dos dutos diante de céus reais, em especial com a consideração da condição dinâmica da luz direta do sol.

Tabela 1 – Medidas dos fluxos luminosos incidentes e transmitidos e coeficiente de transmissão

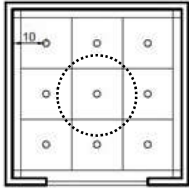
Código	Modelo duto de luz Solatube 160 DS	Dimensões h x Ø <sub>saída</sub> (m)	Fluxo luminoso incidente (lúmens)	Fluxo luminoso transmitido (lúmens)	CTL Coeficiente Transmissão Luminosa (%)
1		0,30 x 0,23	289,2	157,0	54,3%
2		0,90 x 0,23	315,6	160,5	50,8%
3		(0,1+0,1+0,1) x 0,23	289,2	147,0	51,0%
4		(0,3+0,60+0,30) x 0,23	315,6	150,5	47,7%
5		(0,1+0,1+0,2) x 0,23	101,4	79,0	77,8%
6		(0,40 + 0,50) x 0,23	114,0	72,5	63,6%

#### 4.2. Iluminâncias geradas no interior do modelo físico em escala reduzida

Os valores de iluminância, representados a seguir na Tabela 2, são referentes à configuração do DL reto estendido (código 2, da Tabela 1).

Observando os dados da Tabela, é possível concluir que o duto na condição de céu encoberto, fornece níveis de iluminação mais elevados na parte mais central do modelo físico. A medida que se aproxima das extremidades do modelo, observa-se uma queda de iluminância, o que é um indicativo do comportamento difusor da superfície emissora do duto. É possível constatar também que a refletância do revestimento interno do modelo faz uma diferença considerável nos valores de iluminância. O DL apresenta valores de iluminância maiores quando colocado em um ambiente com revestimento de cor branca, elevando a componente de reflexão interna, com uma diferença de aproximadamente 255 lx entre a iluminância média dos ambientes. Isso reafirma a importância da cor e do material do revestimento interno no aproveitamento da luz natural promovida pelo DL. A diferença na uniformidade (U) do ambiente luminoso em favor do modelo com elevada refletância das superfícies internas era esperado, confirmando a influência da componente refletida internamente na maior uniformização das iluminâncias internas.

Tabela 2: Valores de iluminâncias [lx] obtidos experimentalmente com o duto (código 2) fixado no topo do modelo físico, os valores estão dispostos na grade (9 pontos) em que foram medidos no interior do modelo.

Caso 1: interior branco			Caso 2: interior preto			
430,0	483,6	431,4	178,8	228,0	170,0	
485,6	546,7	481,2	230,3	291,0	221,6	
445,8	481,5	432,3	178,0	230,0	183,6	

$$E_{\text{média}} = 468,7 \text{ lx} \quad U = 0,92$$

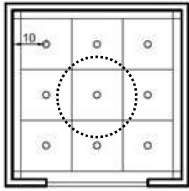
$$E_{\text{média}} = 212,4 \text{ lx} \quad U = 0,80$$

### 4.3. Simulações computacionais

Inicialmente, foi realizada uma simulação com um ambiente igual ao modelo físico usado na etapa experimental. Assim, o primeiro propósito era verificar a adequação de se substituir o DL por uma abertura simples com um fechamento translúcido com uma TV assumida igual ao CTL do duto, determinado anteriormente através da técnica fotográfica HDR. Este artifício é particularmente atraente, uma vez que simplifica significativamente o processo de simulação eliminando a necessidade do programa de simular o complexo processo de condução de luz através do duto.

Comparando-se os valores apresentados nas Tabelas 2 e 3, obtêm-se uma diferença entre as iluminâncias absolutas e médias dos processos experimental e simulação computacional inferior a 10%, mais especificamente de 8% para o interior branco e de 9% para o interior preto. Vale lembrar, que para efeito de comparações, as iluminâncias internas simuladas foram normalizadas pela iluminância horizontal externa medida no céu artificial,  $E_{\text{ExtCéu}}=6.500 \text{ lx}$ .

Tabela 3: Valores de iluminâncias [lux] obtidos por simulação computacional com o duto (código 2), os valores estão dispostos na mesma grade (de 9 pontos) em que foram medidos no interior do modelo.

Caso 1: interior branco			Caso 2: interior preto			
467,0	537,0	463,0	195,0	248,5	185,0	
521,0	591,0	521,0	251,0	317,2	241,5	
478,0	519,0	452,0	194,0	250,7	200,0	

$$E_{\text{média}} = 505,4 \text{ lx} \quad U = 0,89$$

$$E_{\text{média}} = 231,4 \text{ lx} \quad U = 0,82$$

O segundo propósito do conjunto de simulações foi de avaliar o potencial do duto como um sistema de complementação de iluminação.

Segundo recomendações de Lam (1986), a área total de aberturas zenitais deve corresponder a aproximadamente 1% da área do ambiente. Como cada abertura (seção do duto) possui  $0,047 \text{ m}^2$  de área e a

área da sala de aula é 56,40 m<sup>2</sup>, foram modeladas 12 aberturas envidraçadas (ver Figura 5 (a)), representando 12 dutos e correspondendo a uma área total de 0,564 m<sup>2</sup>, ou seja, 1% da área da sala de aula.

Os resultados indicaram que o ambiente apresenta uma Autonomia de Luz Natural Média (DA500) de 49,5 %, o que significa que em aproximadamente 1.807 horas das 3.650 horas ocupadas no ano as 12 aberturas são capazes de fornecer uma iluminância média requerida igual ou superior a 500 lx (ver Figura 5 (b)). Outra forma de avaliar os resultados da simulação é verificar que 61% da área do plano de trabalho apresenta 500lux ou mais durante 50% das horas ocupadas (na escala de cores falsas, corresponde da cor verde até o amarelo). Este comportamento já atenderia um dos requisitos para verificação do desempenho da iluminação natural, estabelecidos por vários regulamentos a exemplo do método proposto pelo Comitê de Iluminação Natural da IESNA, LM 83-12 (IESNA, 2012). Este mapeamento também pode indicar não apenas o potencial de redução de consumo de energia elétrica através da dimerização ou desligamento das fontes de iluminação artificiais em kWh/m<sup>2</sup>, como servir de guia para a distribuição dos circuitos elétricos.

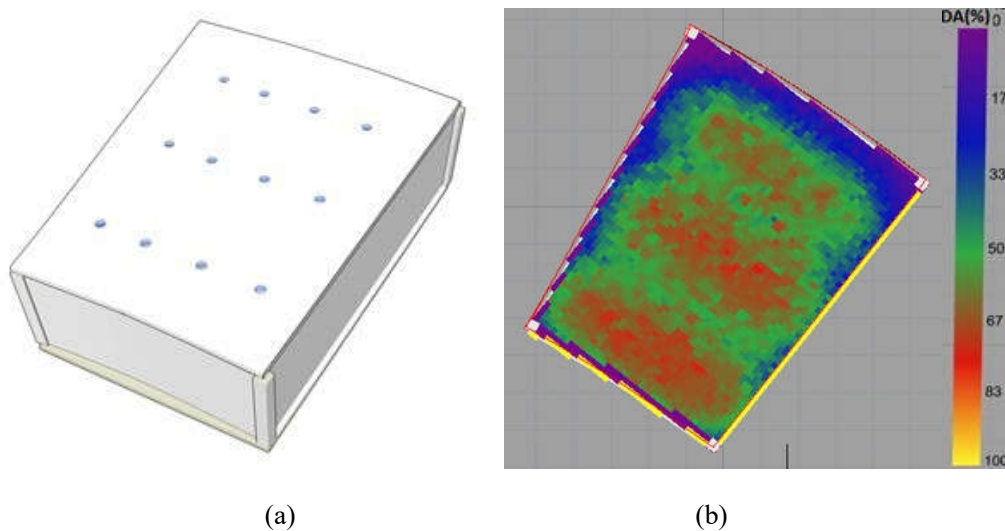


Figura 5 - (a) Sala de aula com aberturas representando os dutos 160 DS e (b) resultados da simulação para DA500.

#### 4.4. O DL no Método dos Lúmens

Por fim, para incorporar o DL como uma alternativa de fonte luminosa no Método dos Lúmens, partiu-se da equação do método, apresentada na forma abaixo (Equação 2):

$$N = \frac{E_{pht} \text{ Área}}{FU PL \text{ luminária}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

N - número de fontes luminosas;

$E_{pht}$  - iluminâncias média alvo requerida no plano de trabalho [lx];

Área - área do plano de trabalho [m<sup>2</sup>];

FU - fator de utilização, que é a fração do fluxo luminoso da fonte que atinge a área de trabalho [-];

PL - perdas de luz, por depreciação do sistema [%];

$\Phi_{luminária}$  - fluxo luminoso produzido pela fonte [lm].

Desenvolveu-se a aplicação da equação para uma sala de aula do Departamento de Arquitetura da UFSC, com uma área de 57,4 m<sup>2</sup> (Room Cavity Ratio = 2,25), refletância do teto e paredes de 70% e uma iluminância alvo  $E_{pht}$  de 500 lux, conforme NBR 8995-1 (ABNT, 2013). O FU (Fator de Utilização) foi interpolado de uma tabela de dados fotométricos para luminárias perfeitamente difusoras, constante da Figura 9-34 (pág. 438) do Handbook da IESNA (IESNA, 2013). Considerando o CTL de 50,8% (medido com o duto no Céu Artificial/LabCon), as dimensões do ambiente e as refletâncias das superfícies internas, o valor obtido para FU



foi de 0,25. As perdas de luz (PL), que consideram vários aspectos de uma instalação de iluminação, tais como: depreciação do fluxo, limpeza das fontes e luminárias e regularidade de reposição de lâmpadas, foram aproximadas em 85%, uma depreciação média encontrada em estudos de campo (AI-MARWAE & CARTER, 2006). Cabe salientar, que os parâmetros FU e PL funcionam como majoradores do fluxo luminoso necessário, ou seja, quanto menores os seus valores, maior deverá ser o fluxo luminoso da fonte para atingir a iluminância média alvo e, por esta razão, um maior número de fontes pode vir a ser especificado.

Estabeleceu-se o fluxo luminoso da fonte como sendo o fluxo necessário para produzir 500 lux, reduzido pelo CTL, o que gera 14.580 lm ( $28.700\text{lm} \cdot 0,508$ ).

Desta maneira, a Equação 2 fica:

$$N = (500 \cdot 57,4) / (0,25 \cdot 0,85 \cdot 14.580)$$

$$N = 9,26 \cong 10 \text{ dutos}$$

Considerando o comportamento do conjunto de 12 dutos simulados na cidade de Florianópolis (conforme visto na seção 4.3 e Figura 5) e interpolando para os 10 dutos recomendados pela Equação 2, estes seriam suficientes para gerar uma média de 500 lx em aproximadamente 41,2% das horas ocupadas (8h a 18h), ou seja, aproximadamente 1.500 horas de um total de 3.650 horas anuais. Cabe salientar, que o sistema de DL não garante a iluminância alvo por 100% do tempo, uma vez que a disponibilidade da luz natural não ocorre de forma constante ao longo do dia. Este procedimento simplificado apresenta grande potencial para ajudar projetistas a avaliar e decidir a respeito da incorporação de DL em seus projetos de iluminação, tanto do ponto de vista de complementação entre sistemas artificial e natural, como da busca de redução de consumo de energia elétrica. Com certeza, existem outras variáveis, tais como: condições de obstrução da vizinhança e variações do comportamento do duto diante da luz solar direta, que podem ainda fazer variar esta primeira aproximação.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo consistiu em uma investigação sobre o comportamento luminoso de dutos de luz natural (DL), sua caracterização como fonte luminosa e uma verificação de sua inclusão no Método dos Lúmens para projeto de sistemas de iluminação.

Inicialmente, a técnica HDR se apresentou adequada para a realização do mapeamento das luminâncias neste estudo, pois a utilização de um luminancímetro demandaria um gasto considerável de tempo para realizar as medições pontuais, que ainda estariam sujeitas a imprecisões.

O procedimento alternativo como o usado neste estudo para a caracterização luminosa de componentes de sistemas de aberturas, fornece um caminho simplificado para comparar o comportamento luminoso de sistemas complexos de aberturas. O conhecimento do fluxo luminoso transmitido, em especial quando se busca uma distribuição difusa, pode ser uma informação útil para uma primeira aproximação das condições de iluminação resultantes. A técnica mostrou potencial para estudos a respeito de sistemas seletivos que envolvam toda uma fachada ou cobertura ou na análise de sistemas de condução de luz natural, como dutos de luz (DL). Nestes casos, independente do percurso da luz dentro deste elemento, a técnica pode ser bastante eficaz para determinação do fluxo luminoso transmitido/admitido. Entretanto, diante das diferenças encontradas nas configurações de DL testadas, carece de maiores estudos considerando a dinâmica da distribuição de luminâncias da abóbada celeste e da geometria da insolação.

A proposta de comparação das luminâncias obtidas experimentalmente a partir da exposição do modelo físico em escala reduzida ao céu artificial, com as obtidas por simulação computacional através do plug-in DIVA-for-Rhino, permitiu verificar que a substituição do duto por uma abertura com o coeficiente de transmissão igual ao mesmo é sim capaz de gerar valores iniciais de iluminância razoavelmente próximos. Esta aproximação já permite um estudo preliminar do potencial do duto para iluminação e economia de energia elétrica para iluminação. Sabe-se também que, em muitos momentos, será necessária a complementação com iluminação artificial para atingir determinado nível de iluminação. Entretanto, a utilização dos dutos de luz com controle integrado do sistema de iluminação artificial, sempre significará um bom potencial de economia de energia elétrica.

É apresentada também uma primeira abordagem para consideração dos DL natural como uma alternativa de fonte luminosa a ser considerada através do Método dos Lúmens, um método ainda muito empregado pela comunidade de projetistas de iluminação. Os resultados são promissores, mostram que para o caso estudado o número de DL obtido pode suprir a iluminação alvo em mais de 40% do tempo de ocupação, restando para o sistema de iluminação artificial complementar no tempo restante. Entretanto, ainda se fazem necessários mais estudos, em especial em uma melhor caracterização do comportamento dos dutos e na consideração da relação

custo X benefício, considerando-se que o investimento inicial na aquisição dos dutos ainda se encontra significativamente alto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 8995-1**: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior". Rio de Janeiro, 2013.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING< REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING **RP – 1415**: Research Project – Thermal and Lighting Performance Metrics of Tubular Daylighting Devices, Ottawa, 2012
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15.215-4**: Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição, Rio de Janeiro, 2004
- AL-MARWAEI M., CARTER D. A field study of tubular daylight guidance installations, **Lighting Research and Technology**, v.38(3), pp.241-258, 2006.
- CASTAÑO, A.G. **Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida**. Dissertação (Mestrado) – curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2007.
- CIE – Commission Internationale de L'Éclairage **TC. 3-38** Technical Report CIE 173: Tubular Daylight Guidance Systems, , Commission Internationale de L'Eclairage, Viena, 2006, 65 p.
- INANICI, M. N. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. **Lighting Research And Technology**. [s.l], p. 123-136. jun. 2006.
- IESNA - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IES LM 83-12**: Approved Method - Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE), New York, 2012.
- IESNA - ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IESNA Handbook** New York, 2013.
- KOCIFAJ M., KUNDRACIK F., DARULA S., KITTLER R., Theoretical solution for light transmission of a bended hollow light pipe, **Solar Energy**, v.84 (8), pp. 1422–1432, 2010.
- LAM, W.M.C. **Sunlighting as Formgiver for Architecture**, Van Nostrand Reinhold Corp., NY, 1986
- LAOUADI, A. Design Insights on Tubular Skylights. **Lighting Journal: Art and Science for International Designers**, pp. 38-41, February 2005. Illuminating Engineering Society of Australia and New Zealand. URL: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/fulltext/prac/nrcc47334/>
- MALET-DAMOUR, B., BOYER, H., FAKRA, A.H., BOJIC, M. Light Pipes Performance Prediction: inter model and experimental confrontation on vertical circular light-guides, **Proceedings** of 2013 ISES Solar World Congress, Cancún/México, published by Energy Procedia, 7, 2014, pp. 1977 – 1986
- MARDALJEVIC, J.; PAINTER, B.; ANDERSEN, M. Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux. **Lighting Research and Technology**. [s.l], p. 27-49. mar. 2009.
- PEREIRA, F.O.R.; SOUZA, P.: Estudo experimental do comportamento de dutos de luz e o aproveitamento de luz natural utilizando imagens HDR. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção, 2016, São Paulo. **Anais do XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção**. Porto Alegre: ANTAC, 2016. v. unico. p. 1700-1711.
- PEREIRA, F.O.R.; CARBONERA, F.; MORAES, L. N.: Determinação do fluxo luminoso de sistemas complexos de aberturas através de imagens HDR, **Anais do XIII Encontro Nacional e IX Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, Campinas, 2015, v. único, pp. 1 – 9.
- PEREIRA, F.O.R.; SCHMITT, M.; MORAES, L. N. Zoneamento luminoso do território brasileiro através de histogramas de frequência acumulada de ocorrência de iluminâncias horizontais difusas externa, **Anais do XIII Encontro Nacional e IX Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, Campinas, 2015.
- REINHART, C. **Daylighting Handbook I - Fundamentals: Designing with the Sun**, published by the author, USA, 2014.
- REINHART, C.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building **LEUKOS - The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America**. [s.l], p. 1-4. Jul. 2006.
- SILVA, A. D. da. **Avaliação teórica e experimental do desempenho de dutos de luz, na cidade de São Carlos – SP**. 119 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- TORCELLINI P.A., PLESS D.S., JUDKOFF R., CRAWLEY D., Solar technologies and the building envelope, **ASHRAE Journal**, pp. 14-20, April 2007.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela bolsa IC de iniciação científica, através de projeto apoiado no Edital Universal (Processo 475951/2013-1). Agradecemos também ao PIBIC/UFSC/CNPq pela bolsa de iniciação científica.