

DETERMINAÇÃO DO FLUXO LUMINOSO DE SISTEMAS COMPLEXOS DE ABERTURAS ATRAVÉS DE IMAGENS HDR

Fernando O. Ruttkay Pereira (1); Felipe Carbonera (2); Letícia Niero Moraes (3)

(1) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ruttkay.pereira@ufsc.br

(2) Graduando de Arquitetura e Arquitetura, bolsista IC – CNPq, felipe.carbonera@gmail.com

(3) MSc, Doutoranda do Programa de Pós-Grad. em Arquitetura e Urbanismo, letinierom@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

Com os avanços tecnológicos nos últimos anos, surgem novos materiais que modificam o aproveitamento da luz natural no ambiente construído. Este estudo procura explorar um método simplificado para determinação do comportamento fotométrico de sistemas complexos de aberturas. O método empregado para a medição do fluxo luminoso transmitido por materiais/sistemas complexos baseia-se na obtenção de imagens HDR (High-Dynamic Range). Esta técnica permite mapear as luminâncias de uma cena e pode ser utilizada para caracterizar o fluxo luminoso que emerge de um sistema que esteja transmitindo luz. A primeira fase dos estudos consistiu da verificação e ajuste da técnica com materiais simples e de comportamento radiante conhecidos, tais como: vidros, policarbonatos e painéis fotovoltaicos semitransparentes. Os experimentos foram realizados em um céu artificial tipo “caixa de espelhos”, caracterizando um ambiente controlado para estudos de iluminação, disponibilizando um grande plano de iluminação difusa. Os primeiros testes de fluxo transmitido apresentaram erros menores que 11%. Numa segunda etapa foram realizadas medições em sistemas mais complexos, tais como: chapas metálicas perfuradas, tecidos e persiana perfurada. A técnica se mostrou uma alternativa bastante prática e confiável para a medição do fluxo luminoso nas diferentes amostras, apresentando resultados bastante animadores com erros considerados desprezíveis. Uma das aplicações identificadas reside na capacidade de avaliar o comportamento de fotométrico de sistemas seletivos quanto à direção da radiação incidente. O método exige investimentos modestos em equipamentos se comparados com as ferramentas recomendadas na literatura, tais como o uso de uma esfera integradora.

Palavras-chave: imagens HDR, procedimento experimental, fluxo luminoso transmitido, sistemas de aberturas.

ABSTRACT

With the technological advances in recent years, new materials that modify the use of daylight in the built environment have been proposed. This study seeks to explore a simplified method for the determination of the photometric behavior of complex fenestration systems. The method used for measuring the luminous flux transmitted by materials/complex systems is based on the generation of HDR images (High-Dynamic Range). This technique allows mapping the luminance of a scene to characterize the luminous flux emerging from a system that is transmitting light. The first phase of the study consisted of verification and technical setting with simple materials and well-known radiant behavior, such as: glass, polycarbonate and semi-transparent photovoltaic panels. The experiments were developed inside an artificial sky type "mirror box", featuring a controlled environment for lighting studies, providing a large diffuse lighting plan. The first tests showed errors lower than 11% for visible transmittance. In a second step, measurements in more complex systems, such as perforated metal sheets, fabrics and perforated venetian blinds shutter, were performed. The technique proved to be a very practical and reliable alternative for the measurement of luminous flux in the different samples, providing very encouraging results with errors considered negligible. One of the identified applications is the ability to evaluate the photometric behavior of selective systems regarding the incoming direction of incident radiation. The method requires modest investments in equipment when compared to the recommended tools in the literature, such as the use of an integrating sphere.

Keywords: HDR images, experimental procedures, transmitted luminous flux, complex fenestration systems.

1. INTRODUÇÃO

Diante das recentes preocupações mundiais relacionadas ao uso de energia elétrica nas edificações, o aproveitamento da luz natural é apontado como uma das estratégias mais promissoras para a redução de energia elétrica (DIDONÉ, 2009). A utilização eficaz da luz natural nos edifícios tem duas vantagens principais: 1) pode melhorar a qualidade da luz no espaço, o que leva a um aumento da produtividade de trabalho e bem-estar (BOYCE, 1998); e 2) pode melhorar o desempenho do edifício, devido à redução da necessidade de iluminação artificial e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia elétrica e as cargas de refrigeração (DIDONÉ, 2009).

No entanto, somente se a iluminação natural for considerada desde as primeiras fases do projeto, quando decisões básicas sobre o desempenho de sistemas de aberturas são tomadas, tais como: dimensões, orientação, características e materiais, este fenômeno pode ter um impacto positivo sobre a sustentabilidade do edifício. Desta forma, é de grande importância que os projetistas tenham conhecimento acerca das características dos materiais utilizados no projeto de aberturas e seus respectivos desempenhos. As ferramentas de simulações computacionais mais precisas para avaliações de iluminação estão disponíveis em alguns programas de CAD; no entanto, estas ferramentas não têm tido uma aceitação e assimilação significativa pela comunidade de arquitetura nas fases iniciais de projeto (REINHART & FITZ, 2006).

As aberturas verticais tradicionais, usuais na maioria das edificações, conseguem proporcionar iluminação natural adequada até certa distância, mas com níveis de iluminação decrescendo rapidamente com a distância da abertura. Átrios, aberturas zenitais ou lanternins podem iluminar áreas afastadas das aberturas laterais, mas sofrem com a elevada radiação solar incidente em planos horizontais e são de pouca utilidade para iluminar áreas localizadas muito no interior das edificações. Um dos desafios colocados neste momento é o de conduzir a luz natural para áreas dos edifícios que não podem ser iluminadas por aberturas convencionais, seja por estarem muito distantes no interior do edifício ou por estarem expostas à intensa insolação. A ideia de canalização ou maximização do efeito da luz natural vem sendo estudada ao longo dos últimos anos com propostas interessantes para o ambiente construído (LUZ, 2009).

Desde o início dos anos 90, diversos tipos de envidraçados e sistemas de controle de admissão de calor solar/luz natural, também chamados de sistemas complexos, ganharam espaço em edifícios comerciais, abrindo oportunidades para a melhor distribuição de luz do dia e um controle de luz solar adequado e na melhora do conforto visual. Prever o desempenho desses sistemas é uma das principais dificuldades para os projetistas interessados em especificá-los. Apesar dos progressos significativos observados neste campo, as propriedades de redirecionamento de luz são complexas pela distribuição variável de luminância do céu (MAAMARI et al, 2006).

Os sistemas complexos de aberturas têm como características o fato de serem feitos especificamente para o local de instalação e possuírem componentes de grandes dimensões, o que dificulta a obtenção de dados fotométricos (ROSEMANN et al, 2005). Caso os dados fotométricos estivessem disponíveis, processos de cálculo tradicionais da engenharia de iluminação poderiam ser empregados. Entretanto, existem alguns problemas no que diz respeito à fotometria destes sistemas, em especial a disponibilidade de equipamentos capazes de lidar com componentes de grandes dimensões, tais como: esfera integradora ou goniofotômetros (CIE, 2006).

Alguns estudos recentes, exploram a caracterização fotométrica de sistemas complexos de aberturas através de diferentes procedimentos, com o intuito de promover o uso destes sistemas na prática de projeto (MAAMARI et al, 2006). Equipamentos sofisticados denominados goniofotômetros, funcionando seja através de processos de varredura ou baseados em levantamento por vídeo, são capazes de avaliar espacialmente distribuições de transmissão ou reflexão da luz, sendo um dos caminhos viáveis para se medir a função de distribuição bidirecional de transmissão de diferentes sistemas (BDTF), tornando possível prever com razoável precisão (tanto qualitativa como quantitativamente) o comportamento de diferentes materiais (DE BOER, 2006; ANDERSEN & DE BOER 2006).

Recentemente, Mardaljevic et al (2009) descreveram uma técnica para medição do fluxo luminoso, denominada TFL-HDRI que consiste na utilização de uma câmera digital e materiais do cotidiano, como papel branco, para determinar a transmissão de luz através dos materiais. O método é estabelecido através da relação entre a luminância do fluxo incidente na superfície de entrada e a luminância da superfície de saída. A medição das luminâncias ocorre através dos mapas de luminância da cena em análise, geradas por imagens HDR, uma técnica muito empregada para este tipo de mapeamento (INANICI, 2005; 2013).

A proposta do presente estudo busca explorar esta técnica para determinar o fluxo luminoso de diferentes componentes de sistemas complexos de aberturas, usados cotidianamente, tais como: chapas

perfuradas, persianas e tecidos. Também espera-se empregar o procedimento para analisar o comportamento fotométrico de sistemas seletivos. Entende-se aqui como sistemas seletivos aqueles que apresentam propriedades fotométricas distintas conforme o ângulo de incidência da radiação luminosa à qual o mesmo encontra-se submetido.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é explorar uma técnica simplificada para determinar a transmissão luminosa de materiais complexos utilizados como elementos de arquitetura em fachadas e coberturas através do uso de imagens HDR.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A iluminação natural pode ser melhor integrada no processo de projeto arquitetônico e na análise de iluminação de ambientes através de ferramentas computacionais que são capazes de analisar com satisfatória precisão e confiabilidade. Para a caracterização do comportamento fotométricos de sistemas complexos de aberturas, seja para servir de dados de entrada para uma simulação computacional, seja para servir de parâmetro de comparação entre diferentes sistemas, é necessário o uso de aparatos, tais como: esfera integradora, para medir o fluxo luminoso e o goniofotômetro, para determinar a distribuição espacial da energia luminosa transmitida. Todavia, ambos os aparatos apresentam algumas limitações: custo, dimensões e infraestrutura laboratorial (ROSEMANN et al, 2005; CIE, 2006).

Imagens de alta resolução (*High-Dynamic Range Images*- HDRI) se mostram uma alternativa confiável para a medição de luminância, se comparada com os equipamentos utilizados, permitindo a medição em toda uma cena com facilidade. A técnica permite capturar luminâncias dentro de uma grande área em alta resolução e criam escalas tanto de valores absolutos de luminâncias, como de relações entre luminâncias de diversas superfícies de uma maneira rápida e com baixo custo comparado aos atuais equipamentos utilizados (INANICI, 2005). A técnica possui a capacidade de gravar toda a gama de luz que chega em um ponto no espaço, contendo informações sobre a forma, cor e intensidade das fontes de luz direta, assim como a distribuição da luz indireta de superfícies no resto da cena (REINHART, 2014). Para a obtenção de uma imagem HDR é necessária uma sequência de imagens de uma mesma cena, obtidas com diferentes condições de exposição (variados tempos de obturação combinado com aberturas), o que permite que tanto as áreas menos iluminadas da cena como as mais iluminadas possam ser representadas, controlando a quantidade de luz na imagem e capturando uma grande variação de luminância que uma cena pode apresentar, onde cada pixel apresenta um valor em cd/m^2 . A sequência de fotos resulta em uma imagem síntese apresentando um mapa de luminância da cena em análise.

A técnica explorada neste artigo foi utilizada para medição do fluxo luminoso, nomeada TFL-HDRI (MARDALJEVIC et al, 2009). Considerando uma abertura exposta a um fluxo incidente (Figura 1), coloca-se um elemento difusor sobre a abertura (que recebe o fluxo incidente “E”), com o objetivo de eliminar a componente direta da iluminação. Este fluxo pode ser absorvido, refletido e transmitido, dependendo das propriedades do material difusor utilizado, um material opaco é utilizado para calcular a parcela não transmitida pelo elemento. Este material produzirá uma luminância L que dependerá das características do fluxo incidente.

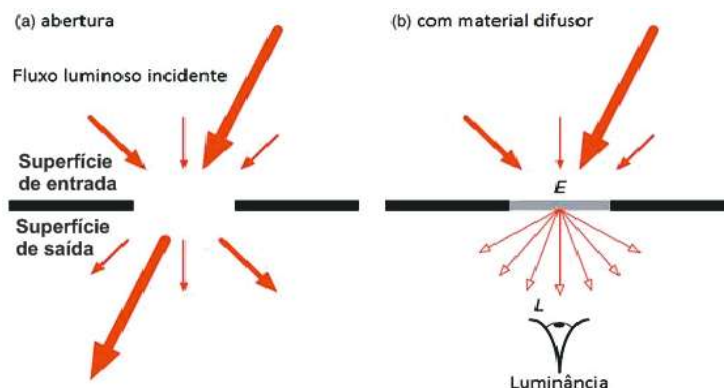


Figura 1 Fluxo luminoso produzido por luz direta e difusa incidente numa abertura (a). Este fluxo produz uma luminância que pode ser vista e medida com a superposição de um material difusor na abertura (b).

Fonte Adaptado de Mardaljevic et al (2009)

Se a relação entre o fluxo incidente na abertura e a luminância do elemento difusor for obtida, então podemos determinar o fluxo luminoso a partir de medições de luminância do material difusor. Numa primeira aproximação, estabelece-se a relação entre L e E , expressa na equação 1:

$$L = qE \quad \text{Equação 1}$$

Onde q ($\text{cd}/\text{m}^2 \cdot \text{lux}^{-1}$ ou sr^{-1}) é o coeficiente da luminância para a luz transmitida pelo material difusor.

Assim, a tarefa resume-se na calibração do coeficiente q através de diversas medições da iluminância E e da luminância L . Isto feito, o fluxo incidente pode ser determinado por medições da luminância do material difusor. Com certeza, o coeficiente q será dependente da direção do fluxo incidente quando não uniforme, p.ex. luz direta do sol.

São medidas a iluminância incidente E e a luminância do material difusor junto com a amostra em análise L_t . Para a luminância refletida calcula-se o L_r , que é a resultante da reflexão do material difusor. A luminância L é a resultante, conforme a equação 2.

$$L = L_t - L_r \quad \text{Equação 2}$$

Para a determinação do fluxo luminoso, aplicamos os valores que foram obtidos nas medições na equação 3.

$$\Phi = EA = q^{-1} (L_t - L_r)A \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Φ - fluxo luminoso transmitido (lm)

q - coeficiente de luminância do elemento difusor ($\text{cd}/\text{m}^2 \cdot \text{lux}^{-1}$ ou sr^{-1});

L_t - luminância média da área da amostra juntamente com o elemento difusor e o papel preto (cd/m^2);

L_r - luminância do papel preto (cd/m^2);

A - área aberta da amostra (m^2).

No estudo de Mardaljevic et al (2009), a técnica demonstrou ser viável para medição de elementos simples, como vidros comuns, apresentando erros médios inferiores a 14%. A técnica se mostra vantajosa comparada aos atuais métodos utilizados no estudo na área de iluminação, principalmente pelo seu baixo custo e os materiais simples utilizados.

4. MÉTODO

O método utilizado neste estudo consiste em três etapas. A primeira trata-se do procedimento experimental para obtenção de imagens HDRs de diferentes amostras de elementos; a segunda consiste na simulação computacional através do programa Photolux, que permite a geração de uma imagem síntese daquelas obtidas na etapa anterior, assim como a aquisição de dados de luminância; e a terceira consiste no cálculo do fluxo luminoso transmitido através das amostras. O procedimento é aplicado inicialmente para a validação da técnica através de materiais que apresentam superfícies/materiais simples com valores de transmissão de fluxo luminoso conhecidos, informados pelos fabricantes. Após a validação, é realizada a aplicação da técnica em materiais mais complexos aplicados em sistemas de aberturas.

4.1. Local e Equipamentos

O ambiente utilizado para a experimentação foi o céu artificial, localizado em anexo ao Laboratório de Conforto Ambiental – UFSC desenvolvido para estudos na área de iluminação (CASTAÑO, 2007). As condições de iluminação são simuladas com uma distribuição similar a de um céu encoberto. O ambiente foi escolhido devido ao fato de apresentar uma condição de iluminação difusa, que permite um maior controle do ambiente luminoso. O local é composto por quatro paredes revestidas com placas de espelho e um sistema de iluminação artificial superior, coberto por um plano difusor. A técnica HDR necessita de uma condição estável durante o período de processo de captura do conjunto de imagens, o que justifica a escolha do local. Condições de iluminação dinâmicas resultam em alterações significativas que podem comprometer a precisão do resultado (INANICI, 2005).

As imagens para o processamento das luminâncias foram feitas com uma câmera Canon EOS 60D com lente olho de peixe, fixada em um tripé. Foi utilizado o software Smart Shooter, que possui função para disparo da câmera através de um computador, reduzindo imprecisões no processo. O programa utilizado para a manipulação, geração e tratamento das imagens HDR é o Photolux, que opera no sistema Microsoft Windows.

Com o objetivo de se limitar a parcela difusa do céu proveniente das proximidades do zênite, foi utilizada uma caixa com todo o seu interior de cor preta, a fim de minimizar os efeitos da luz refletida pelos espelhos laterais do ambiente, evitando o contato da lente com a parcela refletida do entorno. Dessa forma, é considerado somente o fluxo luminoso com origem da fonte de iluminação artificial através do plano difusor.

As iluminâncias são medidas com um luxímetro Minolta T-10. Para as amostras de tecidos, também foram feitas medidas de transmissão luminosa com um Espectofotômetro Lambda 750, do Laboratório de Filmes Finos e Superfícies, Departamento de Física/UFSC.

4.2 Materiais utilizados

A primeira etapa dos estudos corresponde à validação da técnica com materiais que possuem superfícies simples e com referências de valores de transmissão luminosa informada pelos fabricantes. Foram utilizados: dois vidros com propriedades distintas, um policarbonato e um painel fotovoltaico semitransparente (Figura 2).

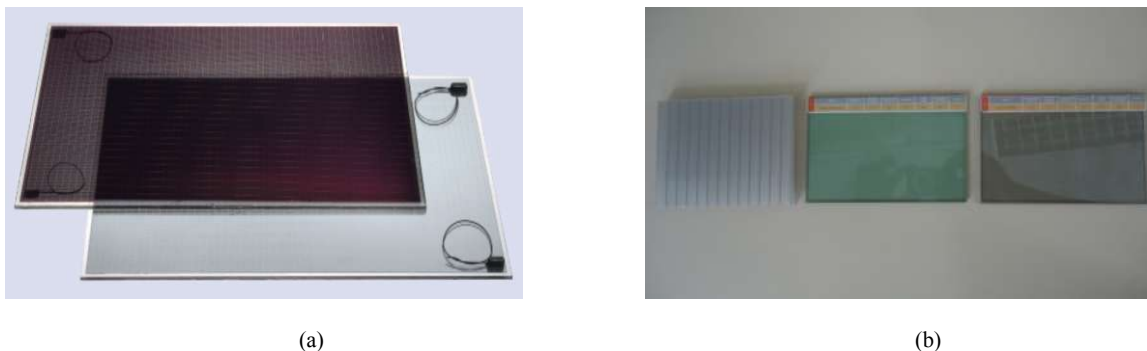


Figura 2 Materiais utilizados na primeira etapa: (a) policarbonato, vidros (b) painel fotovoltaico semitransparente
Fonte: RWE Solutions

Com inovações no mercado de construção, novos materiais surgem em diversas formas e complexidades oferecendo diferentes oportunidades no emprego em fachadas e sistemas de coberturas, maximizando o efeito da iluminação natural. Na segunda etapa foram realizados testes em materiais como: chapas perfuradas, persiana perfura e persianas em tecido, apresentados na Figura 3.

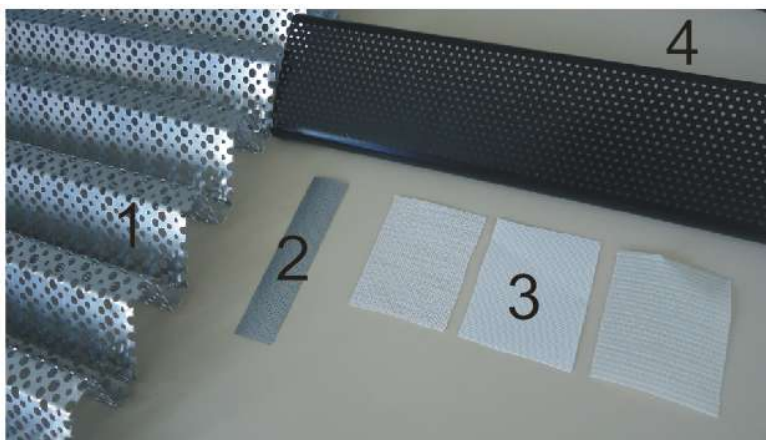


Figura 3 Materiais utilizados na segunda etapa: (1) Chapa Multiperfurada, (2) Persiana Perfurada, (3) Persianas em tecido, (4) Chapa Perfurada utilizada em brises

4.3 Procedimentos experimental para a obtenção de imagens HDR

A Figura 4 apresenta desenhos esquemáticos do procedimento de medição. A caixa possui as dimensões de 30x26cm, com uma abertura 13x8cm para posicionamento da amostra. O elemento difusor utilizado foi uma folha de papel branco com gramatura de 75g; o elemento opaco consiste em um papel preto de 4x3cm. Não há nenhuma recomendação específica quanto ao número e dimensões do elemento opaco a ser utilizado.

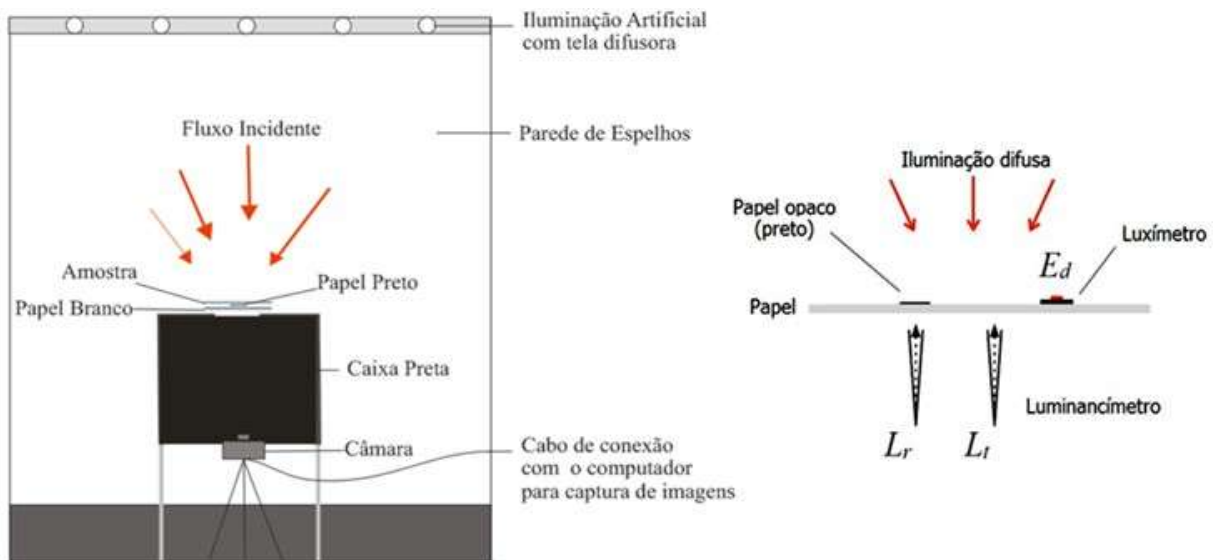


Figura 4 Desenho esquemáticos da experimentação no Céu Artificial – Sem Escala

A caixa preta utilizada como auxílio foi posicionada no ponto central do céu artificial, apresentando uma distância do chão com uma proporção de 2:3 (80cm). Esta relação determina a altura de um plano de trabalho com um comportamento no Padrão de Distribuição de Luminâncias (PDL) muito aproximado ao modelo padrão de céu encoberto da CIE (CASTAÑO, 2007).

Com os valores de abertura e tempo do obturador da câmera combinados, para o controle de luz no sensor, são obtidos os valores de exposição para uma determinada imagem. O manual do programa Photolux sugere uma tabela com combinação de valores de exposição para serem empregados nas medições, onde cada valor corresponde a uma das sete imagens utilizadas. Os valores de exposição empregados foram: 3,0 – 7,0 – 9,9 – 12,9 – 15,8 – 18,9 – 21,9.

São realizadas duas medições, formando dois conjuntos de imagens. Inicialmente, são capturadas as imagens apenas com o elemento difusor sobre a caixa preta para o cálculo do coeficiente da luminância (q) para a luz transmitida pelo material difusor. Esta medição é realizada uma única vez, visto que na medição de diversas amostras é utilizado o mesmo elemento difusor branco. Posteriormente, uma amostra de papel preto é posicionada sobre o elemento em estudo, juntamente com o elemento difusor, e são capturadas as imagens segundo os valores de exposição recomendados.

Os mapas de luminâncias dos dois conjuntos de imagens são gerados no software Photolux, conforme exemplo apresentado na Figura 5. O programa apresenta uma ferramenta que possibilita a seleção apenas da área de interesse, permitindo a obtenção do valor médio da luminância apenas da área selecionada, em cd/m^2 . Com auxílio de um luxímetro é medida a iluminância sobre a amostra, para o cálculo do fluxo incidente.

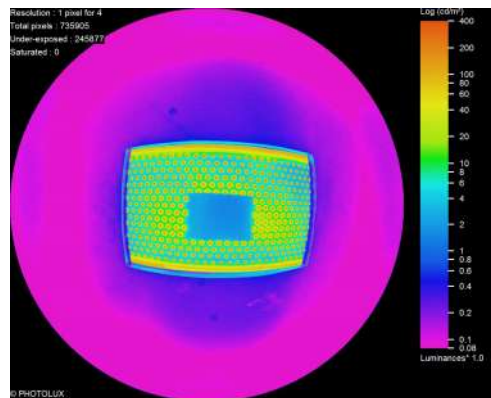


Figura 5 Mapa de Luminância de uma Chapa Perfurada

4.4 Procedimentos de cálculo

Exemplifica-se o procedimento de cálculo aplicado em todas as amostras selecionadas neste estudo através da amostra da chapa perfurada da Figura 5. A primeira medição realizada foi a do coeficiente de luminância do material difusor. Com o auxílio de um luxímetro, a iluminância (E) sobre a amostra produzida pela fonte difusa do céu artificial foi medida, resultando em 4390 lux. O valor da luminância do elemento difusor (L) foi obtido através do mapa de luminância das imagens HDR resultando em 222 cd/m². Aplicando-se a equação 1, obtém-se o valor do coeficiente de luminância do elemento difusor (q), resultando em 0,05057 cd/m².lux⁻¹.

Na sequência, foi realizada a medição com a amostra da chapa perfurada em análise e o papel opaco. A luminância de toda a amostra sobreposta com o elemento difusor e o papel opaco (L_t) foi de 29,3 cd/m². A luminância do papel opaco (L_r) resultou em 1,97cd/m² e a área exposta da amostra (A) é de 0,0013 m². Aplicando-se a equação 3, obteve-se um fluxo luminoso transmitido de 0,7 lúmens.

É simples determinar a transmissão luminosa para fins de comparação, basta dividir o fluxo luminoso transmitido (0,7 lm) pelo fluxo incidente que é o produto E x A (4390 x 0,0013), que resulta em 5,73 lm; assim, tem-se uma transmissão luminosa de 12,3%.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Na primeira etapa dos estudos, foram realizados testes com quatro diferentes materiais que apresentam superfícies simples, comparando-se os valores encontrados com os informados pelos fabricantes. A Tabela 1 apresenta os resultados das comparações entre os valores dos catálogos de fabricantes e as medições com a técnica HDR através do erro percentual. Os resultados apresentaram erros inferiores a 10%.

Tabela 1 Resultados obtidos comparados aos informados pelo fabricante na primeira etapa

Material	Luminância Média - L _t (cd/m ²)	Luminância elemento opaco - L _r (cd/m ²)	Transmissão Luminosa informada pelo fabricante (%)	Transmissão Luminosa obtida (%)	Erro (%)
Emerald Verde (vidro)(1)	146,0	7,1	70,0	62,6	10,6
Eco Lite Incolor (vidro)(1)	127,0	6,6	56,0	54,2	3,2
Painel Fotovoltaico Semitransparente (2)	26,8	6,7	10,0	9,0	10,0
Polycarbonato (3)	81,0	3,3	35,0	35,0	0,0

(1) CEBRACE Vidros

(2) RWE Solutions

(3) REPLAEX

Após estes testes para verificação da técnica com materiais considerados simples, foram realizadas as medições com alguns materiais mais complexos, como os apresentados anteriormente. A Tabela 2 apresenta os resultados desta segunda etapa do experimento.

Tabela 2 Resultados obtidos segunda etapa

Material	Percentual de área perfurada (%)	Luminância Média - L _t (cd/m ²)	Luminância elemento opaco - L _r (cd/m ²)	Transmissão Luminosa obtida (%)	Transmissão Luminosa medida pelo Espectrofotômetro (%)
Chapa Perfurada	13,0	29,3	2,0	12,3	-
Chapa Multiperfurada	30,0	66,0	3,7	28,8	-
Persiana Perfurada	4,0	22,9	1,3	8,1	7,6
Persiana Tecido 1	-	140,0	6,9	60,0	43,0
Persiana Tecido 2	-	82,0	5,0	34,6	18,0
Persiana Tecido 3	-	84,2	5,2	35,6	18,0

Os valores de transmissão luminosa obtidos para os elementos perfurados apresentaram uma boa aproximação com o percentual da área perfurada em relação à área total da amostra, o que para a incidência difusa, como foi realizado o teste, parece razoável (ver Tabela 2). Entretanto, em condições de incidência de

luz direta, as medições devem apresentar valores distintos e associados ao ângulo de incidência. Planeja-se realizar medições nestas condições.

No caso dos tecidos, os valores obtidos pelo procedimento proposto e pelo espectrofotômetro apresentaram diferenças de aproximadamente 40%. Deve-se considerar que o equipamento assume que as amostras sejam uniformes. Entretanto, levando-se em conta as dimensões reduzidas do feixe da máquina - 0,5x1,5cm – e a não uniformidade da trama dos tecidos, é possível que o feixe tenha acertado uma porção mais espessa do tecido, o que poderia explicar tais diferenças.

Os resultados obtidos são bastante coerentes e apontam para a possibilidade de se empregar o mesmo procedimento para determinar o fluxo luminoso transmitido através de sistemas de aberturas mais complexos, onde a complexidade na simulação dos diversos fenômenos através dos quais a luz é conduzida acaba inviabilizando o processo.

6. CONCLUSÕES

A técnica utilizada neste estudo para levantamento de luminâncias é atraente para pesquisas que envolvam tal medição, uma vez que a técnica de mapeamento através de imagens HDR possibilita medir as luminâncias de toda uma cena com precisão e confiabilidade, eliminando as imprecisões inerentes de um processo de medição pontual das luminâncias feitas através de um luminômetro.

A utilização do software Smart Shooter foi de grande importância para a precisão no mapeamento de luminâncias através do Photolux. Devido à complexidade das superfícies analisadas na segunda etapa do experimento, que apresentam superfícies perfuradas com pequenas áreas de aberturas, qualquer movimentação na câmera durante o procedimento de aquisição das imagens HDR pode resultar em imagens com diferentes posicionamentos para uma mesma cena, o que compromete os resultados.

O procedimento alternativo como o usado neste estudo para a caracterização luminosa de componentes de sistemas de aberturas, fornece um caminho 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 aproximação das condições de iluminação resultantes.

O método mostrou-se uma alternativa confiável para a determinação do fluxo luminoso transmitido por diferentes superfícies, apresentando erros inferiores a 10% na etapa de validação, considerados desprezíveis por Mardaljevic et al (2009). A técnica empregada também se mostrou confiável para a medição do fluxo luminoso de outros materiais, podendo assim ser aplicada em superfícies com diferentes complexidades geométricas e de materiais, para os quais usualmente não se possui informações de dados fotométricos.

A técnica possui potencial para futuros 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. Nestes casos, independente do percurso da luz dentro deste elemento, a técnica pode ser bastante eficaz para determinação do fluxo luminoso transmitido/admitido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, M. & DE BOER, J. Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems. *Energy and Buildings* 38 (2006) 836–848.
- BOYCE, P. R. *Why daylight?* International Daylighting Conference 98. Anais...Ottawa, Ontario, Canada: 1998
- CASTAÑO, A.G. “**Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida**”. Dissertação Mestrado em Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2007.
- CIE (2006): “Tubular Daylight Guidance Systems”, TC. 3-38 Technical Report CIE 173:2006, Commission Internationale de L’Eclairage, 65 p.
- DE BOER, J. Modelling indoor illumination by complex fenestration systems based on bidirectional photometric data. *Energy and Buildings* 38 (2006) 849–868
- DIDONÉ, E. L. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009
- INANICI, M. Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system. *Lighting Research and Technology*. p.123–136. 2005.
- INANICI, M. Evaluation of High Dynamic Range Image-Based Sky Models in Lighting Simulation. *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, p. 37–41. 2013
- LUZ, B., Condução da luz natural por sistemas não convencionais. Tese de Doutorado - FAUUSP, São Paulo, 2009.
- MAAMARI, F., F.M., A, N. Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs. *Energy and Building*. National School of State Public Works, Department of Civil Engineering and Buildings, Vaulx-en-Velin Cedex, France. 2005.
- MAAMARI, F., ANDERSEN, M., DE BOER, J., CARROLL, W., DUMORTIER, D., GREENUP, P., 2006. Experimental Validation of Simulation Methods for Bi-directional Transmission Properties at the Daylighting Performance Level, *Energy and*

Buildings, 38 (2006) 878–889.

MARDALJEVIC, J., PAINTER, B., & ANDERSEN, M. **Transmission illuminance proxy HDR imaging: A new technique to quantify luminous flux.** *Lighting Research and Technology*, 2009.

REINHART, E., G, W., S, P., & P, D. **High dynamic range imaging: acquisition, display and image-based lighting.** San Francisco: Morgan Kaufmann. 2005

REINHART, C.F., FITZ, A., Findings from a survey on the current use of daylight simulations during building design, **Energy and Buildings** (2006) 824–835.

REINHART, C. **Daylight Handbook I, Fundamentals, Designing with the Sun.** Cambridge, EUA. 2014.

ROSEMANN, A.; KLOSS, S.H.; MÜLLER, T.; AYDINLI, S. KAASE; H. (2005): “**The photometry of hollow light guides**”. *Lighting, Research & Technology*, CIBSE, Vol. 37(1), pp. 60-72

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), através do Edital Universal (2013 – 2016), pela bolsa IC e pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.