XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Avanços no desempenho das construções – pesquisa, inovação e capacitação profissional

12, 13 E 14 DE NOVEMBRO DE 2014 | MACEIÓ | AL

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ILUMINÂNCIAS EM AMBIENTES ATRAVÉS DO TROPLUX

RIBEIRO, Pedro Vítor Sousa (1); CABUS, Ricardo Carvalho (2)

(1) Universidade Federal de Alagoas, (82) 880211154, pedrovsribeiro@gmail.com (2) Universidade Federal de Alagoas, (82) 3214-1311, r.cabus@pq.cnpq.br

RESUMO

A simulação computacional utilizada na análise da eficiência energética acelera o processo de cálculo e estudo da incidência de luz natural em edificações. Além dos valores de iluminância, o estudo da qualidade da distribuição de luz no ambiente passa por parâmetros estatísticos. O valor médio de iluminâncias não consegue representar de forma eficaz as variações existentes, sobretudo em locais iluminados naturalmente. A pesquisa teve por objetivo analisar a correlação entre quatro parâmetros de análise da distribuição de luz, tendo como referência o proposto pela norma correspondente e padrões internacionais. Estes foram: o da ISO/CIE 8995-1, denominado na pesquisa de DeltaMedMin, o coeficiente de variação, como a relação entre o desvio padrão amostral e o valor médio; a relação entre os valores extremos, mínimo e máximo no plano de trabalho; e a razão entre mínimo e a média, denominado de Fator de Uniformidade das Iluminâncias. Para modelagem e simulação dos ambientes foi utilizado o software TropLux, um modelo de dimensões fixas e aberturas zenitais variáveis. Os processamentos procuraram estudar a relação entre os coeficientes e a influência da composição das aberturas neles. O fator mais relevante na distribuição de luz foi o posicionamento das aberturas zenitais. A relação geométrica entre a escolha dos pontos de estudo em função do tipo e disposição de abertura que se deseja é importante, podendo a escolha errada causar distorções nos resultados. Tomando-se como valor base DeltaMedMin em 70%, foram obtidos valores de referência para as outras variáveis: c.v. deve ser menor que 20%, relação entre a iluminância média e a mínima menor que 1,5 e a relação entre a iluminância máxima e a mínima menor que 2. Estes valores dão parâmetros para análise da distribuição de iluminâncias em projetos com luz natural.

Palavras-chave: Iluminação Natural, Conforto Luminoso, Distribuição de Iluminâncias.

ABSTRACT

The computer simulation for the analysis of energy efficiency accelerates the calculation and the study of incidence of natural light in buildings. Besides the illuminance values, the study of the quality of light distribution in the environment undergoes statistical parameters. The average illuminance can't represent effectively the variations, especially in daylight. The research studied the correlation between four parameters for analyzing the light's distribution, with reference to the proposed ISO / CIE 8995-1 and international standards. These were: ISO / ICE 8995-1, called DeltaMedMin in research, the coefficient of variation, as the relationship between the sample standard deviation and mean value; the ratio between the extremes, minimum and maximum values; and the ratio between the minimum and the average, called the Illuminance Uniformity Ratio. TropLux was used for simulate models with variable zenithal apertures. The processing attempted to study the relationship between the coefficients and the influence of the composition of openings. The most relevant factor in the distribution of light was the positioning of zenithal openings. The geometric relationship between the choice of the calculation points to the type and arrangement of the opening is important, the wrong choice can lead to distorted results. Taking as base DeltaMedMin value by 70% reference values for other variables were obtained. DeltaMedMin must be bigger than 70%, which implies that c.v. smaller than 20%, a ratio between average and minimum illuminance smaller than 1.5 and a ratio between maximum and minimum

illuminance smaller than 2. These values give parameters for analyzing the illuminance distribution on daylighting design.

Keywords: Daylight, Illuminance Distribution.

1 INTRODUÇÃO

O uso da luz natural para iluminação de ambientes é um aspecto importante no projeto de edificações. Com o avanço dos métodos computacionais este estudo se tornou muito mais rápido, com análises muito mais precisas e amplas que com os métodos tradicionais.

O caminho que o sol trilha na abobada celeste, a nebulosidade local, as características do entorno e a forma de incidência solar sobre as aberturas são fatores importantes e que devem ser definidos de forma correta quando forem realizadas as simulações, pois influenciam diretamente na disponibilidade de luz. (ANDER, 1995)

Como meio prático para a análise da luz incidente em um ambiente, a simulação computacional funciona como ferramenta essencial no processo de estudo. Um dos programas disponíveis é o TropLux, este se utiliza do Método Monte Carlo, o método do raio traçado (*Ray Tracing*) e o conceito de coeficientes de luz natural para calcular a incidência da luz em ambientes.

A técnica do raio traçado (*Ray Tracing*) trilha o caminho de um raio estudado. Esta solução foi abordada inicialmente para computação gráfica pelo fato de lidar bem com cenas complexas. O método Monte Carlo (KALOS; WHITLOCK, 1986) é uma abordagem estatística para solucionar integrais múltiplas, e se torna uma boa solução quando métodos analíticos são impossíveis ou computacionalmente dispendiosos.

Os Coeficientes de Luz Natural (TREGENZA; WATERS, 1983) relacionam a iluminância em uma determinada superfície, i , a partir de uma dada subdivisão do céu, j ; e a iluminância normal (E_n) em um plano desobstruído, a partir desta mesma subdivisão, j . Estes são independentes da orientação das aberturas, hora do dia e dia do ano, mas dependentes da geometria do ambiente, do solo e das obstruções, bem como da refletância das suas superfícies.

A forma como a luz se distribui no ambiente é fundamental para o modo como o usuário realiza a sua tarefa. A tecnologia atual permite uma melhor caracterização de como a distribuição da luz fornece um maior conforto ao usuário, através de técnicas de investigação e determinação dos fatores que determinam esta distribuição (TILLER D.K.; VEITCH. J.A.). O estudo tem por objetivo analisar a correlação entre quatro parâmetros de análise da distribuição de luz disponibilizados no TropLux, tendo como referência o proposto pela norma correspondente, DeltaMedMin, e padrões internacionais.

O valor médio de iluminâncias, para análise de distribuição, é frequentemente adotado como parâmetro de estudo, porém ele não consegue representar de forma eficiente as variações existentes sobretudo quando temos ambientes iluminados naturalmente.

Segundo a ISO/CIE 8995-1 a uniformidade da iluminância no plano de trabalho é a relação entre o valor mínimo (E_{min}) e o valor médio (E_m), e não deverá ser menor que

0,7 (ISO/CIE, 2013), ou 70%. Quando analisado em uma malha de pontos expressa a variação percentual da iluminância dos pontos com relação à média global. Este coeficiente foi denominado de DeltaMedMin no estudo, sendo expresso em percentual servindo como referência para a análise dos demais.

O coeficiente de variação de Pearson é a relação entre o desvio padrão amostral (s) e o valor médio (E_m). Proposto para análise da distribuição de iluminâncias, o c.v. permite a comparação entre dados com médias de diferentes ordens de magnitude.

Outro índice proposto é a relação entre os valores extremos, mínimo (E_{min}) e máximo (E_{max}), de iluminâncias no plano de trabalho (IESNA, 2000). A razão entre o valor máximo e o mínimo dá uma noção da amplitude dos valores obtidos.

O último coeficiente analisado foi a relação entre o mínimo (E_{min}) e a média (E_m) das iluminâncias, denominado de Fator de uniformidade das Iluminâncias. Um valor adimensional que também dá uma noção de amplitude de valores. (BAKER et al., 1993). As relações matemáticas estão descritas no Quadro 01.

Quadro 1 - Fórmulas dos índices de variação em estudo

c.v.	DeltaMedMin	MaxMin	MedMin
$\frac{s}{E_m} \times 100$	$\left(1 - \frac{(E_{med} - E_{min})}{E_m}\right) \times 100$	$\frac{E_{max}}{E_{min}}$	$\frac{E_m}{E_{min}}$

2 METODOLOGIA DE ESTUDO

A simulação computacional foi realizada no software TropLux. Para modelagem dos ambientes de estudo foi escolhida uma sala padrão quadrada, com 6 m de lado e 3 m de pé direito. Foram realizados múltiplos processamentos tendo em vista englobar todas as comparações desejadas.

Tomou-se como ponto de partida uma sala com única abertura zenital, variando apenas a sua dimensão. Iniciando por uma abertura de 0,6 m de lado e aumentando, ao passo de 20 cm, até 4 m. Posteriormente, esta única abertura foi subdividida de forma simétrica pelo teto, conservando a mesma área total dos processamentos anteriores, apenas reduzindo limite de intervalo para 3 m. A primeira disposição foi 2x2 aberturas, aumentando até 6x6.

Como o interesse do estudo é apenas a análise da distribuição de luz na sala utilizou-se o céu 1, totalmente encoberto, conforme a CIE (CIE, 2002). Para este céu a distribuição de iluminância é gradual à medida que a altura aumenta, mas não há pontos de luz contrastantes, pois não há sol visível. Os ambientes foram processados para todos os dias do ano, das 7 às 17 horas. A malha escolhida foi de 1m², calculada conforme a ISO/CIE 8995-1.

Visando a comparação numérica entre coeficientes foram feitas regressões através das nuvens de dados, com a finalidade de obter parâmetros entre o referencial e os demais. A análise estatística do comportamento de variáveis discretas pode ser feita através de regressões lineares e não-lineares, podendo esta última ser reformulada matematicamente para se comportar como linear (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

3 RESULTADOS E ANÁLISE

Esta composição de simulações resultou num total de 85 salas processadas. O estudo consistiu em verificar a relação matemática entre os índices de distribuição de iluminâncias. A análise da influência do aumento nas dimensões da abertura e da sua quantidade na distribuição de luz no ambiente foi utilizada apenas como forma de auxílio na interpretação dos resultados.

Como esperado, a incidência de luz no interior do ambiente aumenta com o crescimento da abertura, resultando em valores médios de iluminância cada vez mais altos (Figura 1). Inicialmente é possível perceber que a amplitude entre máximos e mínimos aumenta, este fato vem acompanhado da diminuição das relações Max:Min e Med:Min.

As taxas de variação Med:Min e Max:Min, por serem adimensionais em sua definição, fornecem valores de amplitude relativa, que diminuem conforme o aumento das dimensões da abertura. A maior entrada de luz difusa no ambiente faz com que haja uma maior uniformidade na sua distribuição, este fator pode ser observado em um coeficiente de variação, c.v., decrescente e um valor de DeltaMedMin crescente, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 1 - Gráfico da relação entre o lado da abertura zenital quadrada e os valores de iluminância calculados, com série de máximo, mínimo e média

Mesmo para grandes dimensões de aberturas zenitais, as simulações não atingiram o objetivo de um DeltaMedMin maior que 70%, mostrando que, para o ambiente em estudo, apenas uma abertura não consegue prover uma distribuição de iluminância ideal.

Figura 2 - Gráficos da relação entre a Dimensão Lateral da abertura e os índices estudados.

No próximo passo da pesquisa foram feitos novos processamentos, agora distribuindo uniformemente as aberturas no teto, mantendo a mesma área total das salas do estudo inicial. Tomando como referencial de estudo a área total de $1,44\text{m}^2$, correspondente ao lado de $1,2\text{m}$, é possível visualizar na Figura 3 que os valores de iluminância diminuem a medida que as aberturas se multiplicam pelo teto. Verifica-se a tendência de redução da amplitude dos valores de iluminância, seguidos de uma melhora na distribuição.

Figura 3 - Gráfico da relação entre quantidade de aberturas zenitais para a área

A partir de 16 aberturas o ganho em uniformidade com o processo de subdivisão se torna pequeno. Quando a área total aumenta, no caso da abertura a partir de 4m^2 , esta uniformidade nos resultados já foi observada na distribuição com 9 aberturas.

Os dados obtidos na segunda etapa da pesquisa mostraram que os valores dos índices estudados inicialmente não possuem uma relação linear tão clara. No caso do c.v. a

tendência era que os valores fossem gradualmente decrescentes, mas na sala com 16 aberturas o valor não seguiu esta tendência. Para DeltaMedMin, onde os valores deveriam crescer com o aumento no número de aberturas, houve uma redução quando chegamos ao valor de 16 aberturas.

É possível perceber que há uma variação na tendência dos índices c.v. e DeltaMedMin (Figura 5), inicialmente apresentam claro comportamento mas depois variam em crescente e decrescente.

Figura 4 - Gráfico da Variação de c.v. e DeltaMedMin, com destaque para a variação de tendência dos valores de salas ímpares e pares para o DeltaMedMin

Uma explicação para isto é a posição relativa entre abertura zenital e ponto de estudo. No caso, de 6x6 pontos, esta posição varia para cada configuração de abertura zenital, alterando a posição relativa entre ela e o ponto. Pela lei dos cossenos a intensidade da luz medida em um ponto varia conforme o ângulo de incidência do raio de luz, diminuindo na medida em que o ângulo cresce.

Pela figura 5 é possível perceber que os pontos em análise no plano de trabalho não se encontram alinhados verticalmente com as aberturas. Esta diferença de alinhamentos muda para cada configuração de aberturas, fazendo com que haja variabilidade nos coeficientes conforme o posicionamento. Percebe-se que os pontos de análise de iluminância nem sempre estão sobre a abertura. Pode-se esperar que a relação só será precisa se todos os pontos em estudo estiverem situados perpendicularmente ao centro da abertura zenital.

Figura 5 - Comparação entre posições das aberturas zenitais e dos pontos de estudo para as salas com distribuição de 4x4 e 5x5.

Quando fixada a distribuição de aberturas e variando apenas a área total verificou-se a pequena diferença entre os coeficientes de variação da sala acompanhada do aumento na quantidade de luz. Este fato indica que a forma como as aberturas são dispostas em uma sala é mais importante para a melhoria da qualidade da distribuição de luz que a dimensão dela.

Visando a obtenção de um grande conjunto de dados para a última etapa das análises as simulações anteriores foram feitas para o intervalo de dimensões utilizado na primeira etapa, resultando num total de 85 simulações.

O último objetivo das simulações foi obter uma relação direta entre os índices estudados, Para tanto foi tomado como referencial o valor de DeltaMedMin em 70% e a partir deste determinar os valores das outras variáveis.

A figura 6 mostra graficamente o conjunto de dados obtidos com todas as simulações realizadas no estudo. Este se agrupa de tal forma que duas nuvens de dados se distinguem, uma mais densa à esquerda e outra mais esparsa à direita. O comportamento mais denso à direita é relativo às salas com múltiplas aberturas, enquanto os dados mais distantes são relativos às salas com apenas uma abertura.

Como as primeiras simulações não alcançaram o referencial, o grupo de estudo se restringirá à análise do conjunto à esquerda. A seleção das amostras não prejudicará a validade global do estudo pois este visa apenas a determinação de referenciais numéricos, e não de funções de comportamento global.

Figura 6 – Gráfico da relação entre c.v. e DeltaMedMin para o conjunto de dados obtidos nas 85 simulações realizadas

O fato dos dados apresentarem comportamentos isolados acontece tanto na relação mostrada na figura 6 quanto nas relações entre DeltaMedMim e os índices Avg:Min e Max:Min. Portanto a análise se restringirá, para estas variáveis, ao trecho de interesse, próximo do valor referencial. A escolha do trecho de interesse se justifica pelo fato de que o objetivo é encontrar um valor referencial para comparação, e não uma curva de comportamento global

Seguem as figuras 7, 8 e 9 que contêm os gráficos das relações entre o índice referencial, DeltaMedMin, e os demais. Junto deles vem descrita a equação de regressão linear para o conjunto e o coeficiente de correlação associado à regressão.

Figura 7 - Gráfico da relação entre c.v. e DeltaMedMin para o conjunto de dados selecionado

Figura 8 - Gráfico da relação entre Med:Min e DeltaMedMin para o conjunto de dados selecionado

Figura 9 - Gráfico da relação entre Max:Min e DeltaMedMin para o conjunto de dados selecionado

As regressões não obtiveram r^2 próximos do ideal tendo em vista a variação causada pelo posicionamento de pontos e aberturas, tratado anteriormente, mas não alteram significativamente os resultados. Para as funções obtidas através das regressões lineares, os valores ideais que atendem o critério de referência, DeltaMedMin de 70%, são de c.v. menor que 18%, Med:Min próximo de 1,46 e Max:Min próximo de 1,93.

4 CONCLUSÃO

A partir das variações feitas na geometria das aberturas é possível notar que o principal fator que influencia na distribuição de iluminâncias no plano de trabalho é a distribuição das aberturas. Para uma mesma área total, a utilização de múltiplas aberturas melhora a forma como a luz se distribui dentro do ambiente, mas deve ser levado em conta a perda na quantidade total.

Quando a distribuição tende a melhorar, os índices estudados se comportam de maneiras distintas mas relacionadas. O c.v. tende a diminuir, pois a variação é menor, enquanto o DeltaMedMin tende a crescer, pois mais pontos se enquadram neste critério. Por sua vez, os índices relativos Med:Min e Max:Min tendem a diminuir.

A relação entre a escolha dos pontos de estudo em função do tipo e disposição de abertura que se deseja é importante, podendo esta escolha interferir nos resultados.

Para que a distribuição de luz atenda à norma, *DeltaMedMin* deve ser maior do que 70 %. Isto implica em um c.v. menor que 18%, uma relação entre média e mínimo (Med:Min) próxima de 1,46 e uma relação entre máximo e mínimo (Max:Min) próxima de 1,93. Para fins de uso geral, uma aproximação pode facilitar o uso desses índices. Neste sentido propõe-se o uso de c.v. menor que 20%, Med:Min menor que 1,5 e Max:Min menor que 2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDER, Greeg D. **Daylighting Performance and Design**. Estados Unidos: Editora Van Nostrand Reinhold, 1995

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ISO/CIE 8995-1: **Iluminação de Ambientes de Trabalho, Parte 1:Interior** , 2013

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, K. **Daylight In Architecture, a European Reference Book**; Londres: James & James, 1993, ISBN 1-873936-21-4

CIE - Commission Internationale de l'Eclairage, Spatial distribution of daylight - CIE general sky, CIE: Wien, 2002.

IESNA. **Lighting Handbook**. New York: The Illuminating Engineering Society of North America, 2000

KALOS, M. H. e P. A. WHITLOCK. **Monte Carlo Methods**, 1986 v.1. 186 p

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros**. 4ª Edição, 2009. Rio de Janeiro: Editora LTC.

TILLER, D.K;VEITCH, J.A. **Perceived room brightness: Pilot study on the effect of illuminance distribution**. Lighting, Research and Technology. N27,1, 1995.

TREGENZA, P. e I. M. WATERS. 1983. **Daylight Coefficients**. Lighting Research & Technology, v.15, n.2, p.65-71

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e ao Grupo de Pesquisa em Iluminação (Grilu) da UFAL pelo apoio recebido.