GABRIELA DA CONCEIÇÃO BOLSSONI E ANDRÉA COELHO LARANJA

Elementos vazados: análise do desempenho térmico e lumínico

Perforated solar screen: analysis of thermal and luminic performance

Gabriela Da Conceição Bolssoni

Arquiteta e urbanista pela Universidade Federal do Espírito Santo em 2018. Foi bolsista de iniciação científica pela mesma Universidade, onde desenvolveu pesquisas relativos ao desempenho lumínico de ambientes internos. Atualmente é bolsista CAPES do programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo e pesquisadora do Laboratório de Planejamento e Projetos (LPP – UFES), atuando principalmente no âmbito da iluminação natural.

Architect and urban planner at the Federal University of Espírito Santo in 2018. He received a scientific initiation scholarship at the same University, where researches related to the lighting performance of indoor environments. He is currently a CAPES fellow in the Graduate Program in Architecture and Urbanism at the Federal University of Espírito Santo and a researcher at the Planning and Projects Laboratory (LPP - UFES), working mainly in the field of daylighting.

gabriela_bolssoni@hotmail.com

Andréa Coelho Laranja

Arquiteta e urbanista pela Universidade Federal do Espírito Santo em 1995, mestre em arquitetura pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2000 e doutora em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2010. Atualmente é professora adjunta da Universidade Federal do Espírito Santo no curso de Arquitetura e Urbanismo. Tem experiência na área de Arquitetura e Urbanismo, com ênfase em conforto ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: eficiência energética, arquitetura bioclimática, iluminação natural e ergonomia.

Architect and urban planner at the Federal University of Espírito Santo in 1995, master in architecture at the Federal University of Rio de Janeiro in 2000 and PhD in Architecture at the Federal University of Rio de Janeiro in 2010. She is currently an adjunct professor at the Federal University of Espírito Santo in the course of Architecture and Urbanism. He has experience in the area of Architecture and Urbanism, with an emphasis on environmental comfort, working mainly on the following themes: energy efficiency, bioclimatic architecture, daylighting and ergonomics.

andreacoelholaranja@gmail.com

Resumo

A radiação solar é um recurso de extrema importância a ser considerado nos projetos por ser a principal fonte de luz e calor do planeta, tendo dessa forma relação direta com o desempenho térmico e lumínico das edificações. Nesse sentido, vale mencionar os elementos vazados, recursos arquitetônicos, que podem ser utilizados no controle dessa radiação, contribuindo para a redução de sua incidência direta, responsável pelos ganhos térmicos, ao mesmo tempo que permitem a passagem da luz natural. Assim, esta pesquisa se propõe a avaliar o desempenho lumínico e o percentual de redução da radiação solar transmitida a partir da atuação de diferentes geometrias de elementos vazados ortogonais para um ambiente interno de escritório localizado na cidade de Vitória – ES (20°19'15" latitude Sul e 40°20'10" longitude Oeste). Na metodologia, foram feitas modelagens por meio do Grasshopper, editor de algoritmos do software Rhinoceros 3D, e simulações computacionais relativas à iluminação natural e à radiação solar com a utilização do plug-in DIVA-for-Rhino, ambas foram realizadas para a orientação Norte. O ambiente interno utilizado para as simulações possui geometria retangular, no qual foram avaliados 6 modelos de fechamento: um modelo em vidro e demais modelos compostos por vidro e elementos vazados com furos ortogonais como segunda pele externa. Os elementos vazados avaliados apresentam o mesmo percentual de abertura, variando-se, porém, a quantidade e dimensão dos furos. Para a avaliação dos modelos propostos foram realizadas duas etapas de simulação. Na primeira etapa, foi fixada a mesma espessura dos elementos vazados, que resultou em diferentes ângulos de insolação externos (α e β). Na segunda etapa foram mantidos os mesmos ângulos de insolação (α e β), que resultou em elementos vazados com diferentes espessuras. Para as análises de desempenho lumínico, foram utilizados como parâmetros de comparação os intervalos da UDI (Useful Daylight Illuminance) e o índice de uniformidade indicado pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013). Em relação ao período das simulações computacionais, esse foi definido em função da ocupação do ambiente analisado. As avaliações relativas aos intervalos da UDI foram realizadas para todos os dias do ano no horário de 8h às 18h. Enquanto as análises da uniformidade foram feitas para solstícios de inverno e verão (21 de junho e 21 de dezembro, respectivamente), a cada duas horas, como indica a NBR 15215-4 (ABNT, 2005), para os horários das 8h, 10h, 12h, 14h e 16h. Para a avaliação de desempenho térmico foi verificada a capacidade de os elementos vazados reduzirem a radiação solar transmitida ao ambiente interno. Para tanto, utilizou-se como parâmetro o Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida (PRRST), que avaliado para todos os meses do ano no período das 8h às 18h. Como principais resultados, identificou-se que os ângulos de insolação externos (α e β) são os fatores mais determinantes no desempenho lumínico e na redução radiação solar transmitida pelos elementos vazados, ou seja, uma vez que mantido o mesmo percentual de área de abertura da fachada e os mesmos ângulos de insolação a quantidade e dimensão dos furos exercem pouca influência no desempenho dos mesmos. Ademais, quanto menores os ângulos de insolação dos elementos vazados, maior a capacidade desses de reduzirem a iluminação excessiva nos trechos mais próximos à fachada e por consequência também possuem maior aptidão para reduzir a radiação solar transmitida. Todavia, quanto menores os ângulos de insolação, maior a dificuldade de os elementos vazados iluminarem os trechos mais profundos do ambiente interno. Destaca-se, por fim, que nenhum dos modelos avaliados alcançou a uniformidade de 0,6 recomendada pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013). Isso pode ser atribuído aos grandes contrastes luminosos ocasionados pela redução drástica da iluminação nos trechos mais profundos do ambiente interno, no caso dos modelos com elementos vazados, principalmente aqueles com menores ângulos de insolação, ou decorrentes da iluminação excessiva admitida próximo à fachada no caso do modelo sem proteção solar.

Palavras-chave: Desempenho lumínico; Desempenho térmico; Elementos vazados; Simulação computacional.

Abstract

Solar radiation is an extremely important resource to be considered in projects as it is the main source of light and heat on the planet, thus having a direct relationship with the thermal and lighting performance of buildings. In this sense, it is worth mentioning the perforated solar screen, architectural resources, which can be used to control this radiation, contributing to the reduction of its direct incidence, responsible for the thermal gains, at the same time that they allow the passage of daylighting. Thus, this research proposes to evaluate the luminous performance and the percentage of reduction of the solar radiation transmitted from the performance of different geometries of orthogonal perforated solar screen for an internal office environment located in the city of Vitória - ES (20 ° 19' 15" South latitude and 40° 20' 10" West longitude). In the methodology, modeling was done using Grasshopper, editor of algorithms of the software Rhinoceros 3D, and computer simulations related to daylighting and solar radiation using the plug-in DIVA-for-Rhino, both were performed for the North orientation. The internal environment used for the simulations has a rectangular geometry, in which 6 models of closure were evaluated: a glass model and other models composed of glass and perforated solar screen with holes orthogonal as a second external skin, the perforated solar screen evaluated have the same percentage of opening, however, the quantity and size of the holes vary. action of the proposed models, two simulation steps were carried out. In the first stage, the same thickness of the perforated solar screen was fixed, which resulted in different external insolation angles (α and β). In the second stage, the same insolation angles (α and β) were maintained, which resulted in perforated solar screen with different thicknesses. For the analysis of lighting performance, the UDI intervals (Useful Daylight Illuminance) and the uniformity index indicated by NBR ISO / CIE 8995-1 (ABNT, 2013) were used as comparison parameters. Regarding the period of the computer simulations, this was defined according to the occupation of the analyzed environment. The evaluations related to the IDU intervals were carried out for all days of the year, from 8 am to 6 pm. While uniformity analyzes were performed for winter and summer solstices (June 21 and December 21, respectively), every two hours, as indicated by NBR 15215-4 (ABNT, 2005), for the hours of 8 am, 10 am, midday, 2 pm and 4 pm. For the evaluation of thermal performance, the ability of the perforated solar screen to reduce the solar radiation transmitted to the internal environment was verified. For that, the Transmitted Solar Radiation Reduction Percentage (PRRST) was used as a parameter, which is evaluated for all months of the year in the period from 8 am to 6 pm. As main results, it was identified that the external insolation angles (α and β) are the most determining factors in the luminous performance and in the reduction of solar radiation transmitted by the perforated solar screen, that is, once the same percentage of opening area is maintained of the facade and the same insolation angles the quantity and dimension of the holes have little influence on their performance. In addition, the smaller the insolation angles of the perforated solar screen, the greater their capacity to reduce excessive lighting in the sections closest to the facade and consequently also have greater ability to reduce the transmitted solar radiation. However, the smaller the insolation angles, the greater the difficulty for the perforated solar screen to illuminate the deepest sections of the internal environment. Finally, it should be noted that none of the evaluated models achieved the uniformity of 0.6 recommended by NBR ISO / CIE 8995-1 (ABNT, 2013). This can be attributed to the great luminous contrasts caused by the drastic reduction of the illumination in the deepest sections of the internal environment, in the case of models with perforated solar screen, mainly those with smaller insolation angles, or due to the excessive daylighting allowed near the facade in the case of model without sun protection.

Keywords: Daylighting performance; Thermal performance; Perforated solar screen; Computacional simulation.

Resumen

La radiación solar es un recurso de suma importancia a considerar en los proyectos ya que es la principal fuente de luz y calor del planeta, por lo que tiene una relación directa con el rendimiento térmico y lumínico de los edificios. En este sentido, cabe mencionar la pantalla solar perforada, recursos arquitectónicos, que pueden utilizarse para controlar esta radiación, contribuyendo a la reducción de su incidencia directa, responsable de las ganancias térmicas, a la vez que permiten el paso de los naturales. ligero. Así, esta investigación propone evaluar el desempeño luminoso y el porcentaje de reducción de la radiación solar transmitida por el desempeño de diferentes geometrías de pantalla solar perforada ortogonales para un ambiente de oficina interno ubicado en la ciudad de Vitória - ES (20° 19' 15" latitud Sur y 40° 20' 10" longitud Oeste). En la metodología, el modelado se realizó utilizando Grasshopper, editor de algoritmos del software Rhinoceros 3D, y simulaciones por computadora relacionadas con la iluminación natural y la radiación solar mediante el plug-in DIVA-for -Rhino, ambos se realizaron para la orientación Norte. El ambiente interno utilizado para las simulaciones es de geometría rectangular, en el cual se evaluaron 6 modelos de cierre: un modelo de vidrio y otros modelos compuestos por vidrio y pantalla solar perforada con orificios ortogonales como un segundo externo piel, la pantalla solar perforada evaluados tienen el mismo porcentaje de apertura, sin embargo, la cantidad y tamaño de los orificios varían acción de los modelos propuestos, se llevaron a cabo dos pasos de simulación. En una primera etapa se fijó el mismo espesor de los elementos huecos, lo que resultó en diferentes ángulos de insolación externa (α y β). En la segunda etapa, se mantuvieron los mismos ángulos de insolación (α y β), lo que resultó en pantalla solar perforada con diferentes espesores. Para el análisis del rendimiento lumínico se utilizaron como parámetros de comparación los intervalos UDI (Useful Daylight Illuminance) y el índice de uniformidad indicado por NBR ISO / CIE 8995-1 (ABNT, 2013). En cuanto al período de las simulaciones por computadora, este se definió de acuerdo con la ocupación del entorno analizado. Las evaluaciones relacionadas con los intervalos de UDI se realizaron para todos los días del año, de 8h a 18h. Mientras que los análisis de uniformidad se realizaron para los solsticios de invierno y verano (21 de junio y 21 de diciembre, respectivamente), cada dos horas, como lo indica NBR 15215-4 (ABNT, 2005), para las horas de 8h, 10h, 12h, 14h y 16h. Para la evaluación del desempeño térmico se verificó la capacidad de los elementos huecos de reducir la radiación solar transmitida al ambiente interno. Por lo tanto, se utilizó como parámetro el Porcentaje de Reducción de Radiación Solar Transmitida (PRRST), el cual se evalúa para todos los meses del año en el período de 8h a 18h. Como principales resultados, se identificó que los ángulos de insolación externos (α y β) son los factores más determinantes en el desempeño luminoso y en la reducción de la radiación solar transmitida por la pantalla solar perforada, es decir, una vez que se alcanza el mismo porcentaje de área de apertura. Si se mantiene la fachada y los mismos ángulos de insolación, la cantidad y dimensión de los huecos influye poco en su rendimiento. Además, cuanto menores son los ángulos de insolación de la pantalla solar perforada, mayor es su capacidad para reducir la iluminación excesiva en los tramos más cercanos a la fachada y, en consecuencia, también tienen mayor capacidad para reducir la radiación solar transmitida. Sin embargo, cuanto más pequeños sean los ángulos de insolación, mayor será la dificultad de los elementos huecos para iluminar las partes más profundas del entorno interno. Finalmente, cabe señalar que ninguno de los modelos evaluados alcanzó la uniformidad de 0,6 recomendada por NBR ISO / CIE 8995-1 (ABNT, 2013). Esto se puede atribuir a los grandes contrastes luminosos provocados por la drástica reducción de la iluminación en los tramos más profundos del ambiente interno, en el caso de modelos con pantalla solar perforada, principalmente aquellos con menores ángulos de insolación, o por la excesiva iluminación permitida cerca la fachada en el caso de modelo sin protección solar.

Palabras clave: Rendimiento lumínico; Rendimiento térmico; Pantalla solar perforada; Simulación computacional.

Introdução

Promover eficiência energética nas edificações tem se mostrado uma necessidade crescente. O setor da construção civil é responsável por consumir mais de um terço do total de energia primária (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2016; YOSHINO; HONG; NORD, 2017). Isso decorre, entre outros usos, da grande quantidade de energia para refrigeração, aquecimento e iluminação artificial demandada pelos edifícios ao redor do mundo (YAN; NAM, 2010).

Por outro lado, algumas premissas podem auxiliar em um melhor uso da energia elétrica nos edifícios. Dentre elas destaca-se o aproveitamento da iluminação natural (MESA; CORICA; PATTINI, 2011; RAPHAEL, 2011) e o sombreamento das envoltórias (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; CORBELLA; YANNAS, 2003; FREEWAN, 2014; ALVARENGA, 2013; BELLIA; FALCO E MINICHIELLO, 2013). Bader (2010); Cho; Yoo; Kim (2014) enfatizam que os elementos de controle solar quando corretamente incorporados à fachada auxiliam no controle da radiação solar, na redução dos excessos de luz próximos da abertura e na distribuição da luz de maneira mais uniforme.

Dentre os elementos de controle solar, podem ser citados os elementos vazados. Ching (2010) define elemento vazado como qualquer sistema de vedação que inclua o espaço vazio, ou seja, que não seja maciço em toda a sua superfície. No Brasil, o uso de elementos vazados teve destaque, inicialmente, com o arquiteto e urbanista Lúcio Costa, o qual utilizou o elemento vazado cobogó no projeto do Parque Guinle - RJ na década de 1940. Posteriormente, os elementos vazados passaram a ser amplamente utilizados nas áreas de serviço, localizadas no fundo das casas, o que com o tempo acabou caracterizando-os como um elemento construtivo pejorativo (PAULERT, 2012).

Em relação ao desempenho dos elementos vazados, Cartana; Pereira; Mayer (2018) constataram que esses são capazes de reduzir a radiação solar admitida, proporcionando uma melhor distribuição da luz natural, além de reduzirem a incidência de iluminação excessiva na área próxima à fachada. Cordeiro (2018) também identificou a eficiência desses elementos na redução da iluminação excessiva.

Em paralelo às questões de eficiência energética e conforto no ambiente interno, a utilização de ferramentas de simulações computacionais tem ganhado destaque nas últimas décadas. Essas simulações permitem prever e observar fenômenos complexos com tempo hábil e precisão. Segundo Dunn (2012) a simulação computacional integrada à modelagem paramétrica auxilia na tomada de decisões em diferentes etapas de projeto. No que se refere à luz natural, por exemplo, Pereira (2009) atenta que se trata de um fenômeno complexo, que sofre interferência de diversos elementos, tais como: o horário do dia, as estações do ano, a presença de nuvens, as condições do entorno, a orientação da fachada, os elementos de controle solar e as características de transmissividade dos materiais. Dessa forma, o autor enfatiza que as ferramentas de simulações computacionais permitem a avaliação conjunta dessas variáveis citadas, facilitando a representação do comportamento da luz natural.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho lumínico e o percentual de redução da radiação solar transmitida a partir da atuação de diferentes geometrias de elementos vazados ortogonais para um ambiente interno de escritório localizado na cidade de Vitória – ES (20°19'15" latitude Sul e 40°20'10" longitude Oeste).

Metodologia

Apresenta-se a seguir os procedimentos metodológicos adotados neste estudo, descrevendo os parâmetros utilizados nas avaliações de desempenho térmico e lumínico. É importante destacar que os parâmetros adotados foram separados em dois grupos: parâmetros gerais e parâmetros específicos.

Parâmetros gerais

Os parâmetros gerais referem-se aos parâmetros comuns a todas as etapas de avaliações. Como parâmetros gerais deste estudo menciona-se: caracterização do ambiente interno; caracterização dos elementos vazados; modelagem paramétrica e simulações computacionais.

Caracterização do ambiente interno

Para definição da geometria do ambiente interno utilizou-se uma sala hipotética de escritório situada em Vitória – ES (20°19'15" latitude Sul e 40°20'10" longitude Oeste). Para reproduzir as características do clima de Vitória - ES, foi utilizado o arquivo climático da cidade de Vitória – ES (Vitória TRY1962_05CSV.epw, disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>).

Apesar de Vitória – ES estar localizada na Zona Bioclimática 08, que de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005) tem como uma das principais diretrizes adoção de grandes aberturas sombreadas, observa-se aplicação demasiada do vidro em fachadas de edificações de escritórios sem proteções solares.

A geometria da sala obedece às diretrizes do Código de Obras de Vitória (1998), além disso, tem dimensões que se aproximam dos modelos reais de escritório construídos em Vitória e, por fim, atende uma relação de proporcionalidade entre os lados descrita por Lamberts; Ghisi; Ramos (2006).

A Tabela 1 traz as dimensões do ambiente interno adotado para as avaliações e a verificação em relação aos requisitos do Código de Obras de Vitória (1998).

TABELA 1 – Verificação dos parâmetros adotados em função dos requisitos indicados pelo Código de Obras.

Fonte: as autoras

Dimensão	Requisitos do Código de Obras	Dimensões do ambiente adotado
Pé-direito (Pd)	$Pd \geq 2,60 \text{ m}$	$Pd = 2,60 \text{ m}$
Largura (L)	$L \geq 2,00 \text{ m}$	$L = 4,00 \text{ m}$
Profundidade (P)	$P \leq 4 \times L$	$P = 8,00 \text{ m}$
Área (A)	$A \geq 7,50 \text{ m}^2$	$A = 32,00 \text{ m}^2$

A [Figura 1], abaixo, apresenta perspectivas com as dimensões do ambiente interno adotado para as avaliações.

FIGURA 1 – Perspectivas do ambiente interno com as dimensões adotadas para as avaliações.

Fonte: as autoras

As características dos materiais foram estabelecidas baseadas em recomendações de estudos anteriores. No que se refere as refletâncias das superfícies do ambiente interno (piso, parede e teto) essas foram definidas com base nas refletâncias internas sugeridas pela NBR ISO/CIE 8995 (ABNT, 2013), como indica a Tabela 2.

TABELA 2 – NBR ISO CIE 8995
(ABNT, 2013), adaptado.

Fonte: as autoras

Superfícies	Refletância recomendada (%) - NBR ISO/CIE 8995	Refletância utilizada (%)
Piso	10 - 50	20
Parede	30 - 80	60
Teto	60 - 90	80

Em relação ao vidro utilizado na fachada foi empregado vidro simples com 6mm de espessura e fator de transmitância de 88%.

Caracterização dos elementos vazados

Os elementos vazados, perfazendo uma área de 10,40 m² (4,0 m de comprimento e 2,6 m de altura), foram posicionados a 20 cm da fachada apenas em vidro funcionando dessa forma como uma segunda pele externa, como indica a [Figura 2].

FIGURA 2 – Corte esquemático do ambiente interno indicando o posicionamento dos elementos vazados.

Fonte: as autoras

TABELA 3 – Área total de abertura adotada para os elementos vazados em função dos requisitos do Código de Obras.

Fonte: as autoras

No que se refere à refletância das superfícies dos elementos vazados, essas foram determinadas com base nos estudos de Bolssoni e Laranja (2019) que identificaram que elementos vazados com cor clara (refletância 80%) apresentaram maior capacidade de iluminar o ambiente interno de forma satisfatória. Assim, foi utilizada a refletância de 80% para os elementos vazados.

Para determinação da área de abertura dos elementos vazados, foram levadas em consideração as determinações do Código de Obras de Vitória (1998). Esse estabelece que as aberturas para iluminação e ventilação de ambientes de escritório devem ter no mínimo 1/8 da área de piso do compartimento e atender a área mínima de 0,60 m².

Optou-se, dessa forma, por adotar como área total de abertura dos elementos vazados a área de abertura mínima permitida pelo Código de Obras, como indica a Tabela 3.

Requisitos do Código de Obras de Vitória quanto à área de abertura	Área de piso do ambiente avaliado	Área de fachada do ambiente avaliado	Razão entre a área de abertura em relação à área de piso	Área total de abertura dos elementos vazados	Percentual de área de abertura na fachada' (PAF)
- Área de abertura mínima $\geq$ 1/8 da área do piso - Área de abertura mínima $\geq$ 0,6 m ²	32 m ²	10,40 m ²	1/8	4 m ²	38%

1 O percentual de área de abertura na fachada (PAF) corresponde a razão entre a soma das áreas de abertura com fechamento translúcido da fachada e a área total de fachada.

Para as avaliações dos elementos vazados foi definido, inicialmente, um modelo base (Modelo III) com furos quadrados constituindo uma matriz de 8 furos no eixo X e 6 furos no eixo Y, como indica a [Figura 3].

FIGURA 3 – Modelo base de elemento vazado ortogonal adotado com a relação dos furos.

Fonte: as autoras

MODELO III – MODELO BASE

Fachada em vidro + elemento vazado;

Matriz de furos: 8 furos no eixo X e 6 furos no eixo Y;

Quantidade total de furos: 48 furos;

Dimensão dos furos: 29 x 29 cm;

Área total de vazio: 4 m².

A fim de se compreender a influência de outros parâmetros no desempenho dos elementos vazados, optou-se por fixar o mesmo percentual de área de abertura dos modelos avaliados. Dessa forma, a partir do modelo base (Modelo III), mantendo-se a mesma área total de vazio (4 m²) e evidentemente o mesmo percentual de área de abertura da fachada (38%), variou-se o percentual da quantidade de furos nos eixos X e Y em 50% para mais e para menos, obtendo-se mais dois modelos (Modelo II e Modelo IV). Assim, foram simulados três modelos com fachada em vidro + elemento vazado como segunda pele externa: Modelos II, III e IV e a critério de comparação foi acrescentado o Modelo I com fachada apenas em vidro com área de 10,40 m², que corresponde a um percentual de área de abertura na fachada de 100%, ou seja, apresenta 62% a mais de área exposta que os modelos com elementos vazados avaliados. A [Figura 4] apresenta cada um desses modelos, evidenciando a área total de abertura, a matriz de furos utilizada, a quantidade total de furos e as dimensões dos furos.

MODELO I: fachada apenas com vidro, área total da fachada envidraçada de 10,40 m², percentual de área de abertura de 100%.

MODELO II: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 4 x 3, totalizando 12 furos com dimensões de 58 x 58 cm, área total de vazio de 4 m², percentual de área de abertura de 38%.

MODELO III: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 8 x 6, totalizando 48 furos com dimensões de 29 x 29 cm, área total de vazio de 4 m², percentual de área de abertura de 38%.

MODELO IV: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 16 x 12, totalizando 192 furos com dimensões de 14,5 cm x 14,5 cm, área total de vazio de 4 m², percentual de área de abertura de 38%.

FIGURA 4 – Geometria dos modelos avaliados.

Fonte: as autoras

Em um primeiro momento foi fixada a mesma espessura, 20 cm, para todos os modelos de elementos vazados ortogonais definidos anteriormente. Todavia, ao se fixar a mesma espessura, foram obtidos ângulos de insolação externos (α e β) variados em função das dimensões dos furos dos elementos vazados, em que o modelo com furo de maior dimensão (Modelo II) teve consequentemente maiores ângulos de insolação (α e $\beta = 71^\circ$) e o de menor dimensão (Modelo IV) apresentou os menores ângulos de insolação (α e $\beta = 36^\circ$), enquanto para o Modelo III, com furo intermediário, os ângulos de insolação (α e β) foram de 55° , conforme ilustra a [Figura 5].

MODELO II: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 4×3 , totalizando 12 furos com dimensões de 58×58 cm, área total de vazio de 4 m^2 , espessura de 20 cm e ângulos de insolação externos (α e β) de 71° .

Planta baixa, vista e corte esquemáticos do Modelo II

MODELO III: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 8×6 , totalizando 48 furos com dimensões de 29×29 cm, área total de vazio de 4 m^2 , espessura de 20 cm e ângulos de insolação externos (α e β) de 55° .

Planta baixa, vista e corte esquemáticos do Modelo III

MODELO IV: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 16×12 , totalizando 192 furos com dimensões de $14,5 \times 14,5$ cm, área total de vazio de 4 m^2 , espessura de 20 cm e ângulos de insolação externos (α e β) de 36° .

Planta baixa, vista e corte esquemáticos do Modelo IV

FIGURA 5 – Modelos de elementos vazados (II, III e IV): mesma espessura X diferentes ângulos de insolação externos (α e β).

Fonte: as autoras

Para se compreender a influência da geometria e dos ângulos de insolação externos (α e β) no desempenho dos elementos vazados fixou-se os mesmos ângulos de insolação (α e β), tendo como base o valor de 55° referente ao Modelo III (modelo base). Isso resultou nos Modelos II' e IV' com espessuras de 40 cm e 10 cm, respectivamente, como ilustra a [Figura 6].

MODELO II': fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 4×3 , totalizando 12 furos com dimensões de 58×58 cm, área total de vazio de 4 m^2 , espessura de 40 cm e ângulos de insolação externos (α e β) de 55° .

Planta baixa, vista e corte esquemáticos do Modelo II'

MODELO III: fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 8×6 , totalizando 48 furos com dimensões de 29×29 cm, área total de vazio de 4 m^2 , espessura de 20 cm e ângulos de insolação externos (α e β) de 55° .

Planta baixa, vista e corte esquemáticos do Modelo III

MODELO IV': fachada em vidro + elemento vazado com matriz de 16×12 , totalizando 192 furos com dimensões de $14,5 \times 14,5$ cm, área total de vazio de 4 m^2 , espessura de 10 cm e ângulos de insolação externos (α e β) de 55° .

FIGURA 6 – Modelos de elementos vazados (II', III e IV'): mesmos ângulos de insolação externos (α e β) X diferentes espessuras.

Fonte: as autoras

A [Figura 7] traz as máscaras de sombra para orientação Norte (orientação avaliada) proporcionada pelos Modelos II, II', III, IV' e IV. De imediato, observa-se que o Modelo IV de menores ângulos de insolação (36°) apresentou a maior área sombreada. Enquanto os Modelos II', III e IV' de mesmos ângulos de insolação (55°) apesar da diferença na espessura, na quantidade e dimensão dos furos apresentaram a mesma área sombreada.

MODELOS		MÁSCARAS DE SOMBRA
MODELO II	Ângulos de insolação: $\alpha = 71^\circ$, $\beta_d / \beta_e = 71^\circ$
MODELO II'	Ângulos de insolação: $\alpha = 55^\circ$, $\beta_d / \beta_e = 55^\circ$
MODELO III	Ângulos de insolação: $\alpha = 55^\circ$, $\beta_d / \beta_e = 55^\circ$
MODELO IV'	Ângulos de insolação: $\alpha = 55^\circ$, $\beta_d / \beta_e = 55^\circ$
MODELO IV	Ângulos de insolação: $\alpha = 36^\circ$, $\beta_d / \beta_e = 36^\circ$

FIGURA 7 – Máscara de sombra dos Modelos II, II', III, IV' e IV, orientação Norte.

Fonte: as autoras

Modelagem paramétrica e simulações computacionais

Os modelos simulados foram desenvolvidos utilizando o *Grasshopper*, editor de algoritmos do software de modelagem *Rhinoceros* 3D, e as simulações computacionais relativas ao desempenho lumínico e à admissão de radiação solar foram realizadas utilizando o plug-in *DIVA-for-Rhino*. O *DIVA-for-Rhino* é um plug-in de modelagem de energia e luz natural otimizado para o *Rhinoceros*. O aplicativo *DIVA* foi inicialmente

desenvolvido na Escola de Design da Universidade de Harvard por Alstan Jakubiec e Christoph Reinhart, atualmente é distribuído pelo Grupo Solemma LLC (SOLEMA, 2020). Dentre outras funções, o *DIVA-for-Rhino* permite avaliação de medidas dinâmicas de iluminação natural e análise da radiação solar.

A [Figura 8] traz exemplo dos resultados relativos ao desempenho lumínico, para um plano de simulação paralelo ao piso, e à radiação solar transmitida (kW/m²), para um plano de avaliação paralelo a fachada, ambos possibilitados pelo plug-in *DIVA-for-Rhino*.

FIGURA 8 – Exemplos de resultados possibilitados pelo plug-in *DIVA-for-Rhino* para desempenho lumínico e radiação solar transmitida, respectivamente..

Fonte: as autoras

Parâmetros específicos

Os parâmetros específicos, como o próprio nome já diz, são os parâmetros particulares de uma determinada etapa de avaliação. Como parâmetros específicos desse estudo menciona-se: simulações computacionais de desempenho lumínico; simulações computacionais de desempenho térmico.

Simulações computacionais de desempenho lumínico

Nas simulações de desempenho lumínico buscou-se avaliar até que ponto os elementos vazados são capazes de garantir iluminação natural satisfatória, reduzir os contrastes luminosos e proporcionar uma distribuição da luz mais uniforme. Para tanto, foi feita análise das iluminâncias com base nos intervalos da UDI (*Useful Daylight Illuminances*) propostos por Nabil e Mardaljevic (2006). A UDI expressa a porcentagem de horas que cada ponto do ambiente analisado se encontra em cada um dos intervalos, sendo os seguintes os intervalos considerados: $E < 100 \text{ lx}$ - intervalo insuficiente, $100 \text{ lx} \leq E < 2000 \text{ lx}$ - intervalo recomendado e $E \geq 2000 \text{ lx}$ - intervalo excessivo.

Outro parâmetro utilizado para a análise dos resultados foi a uniformidade indicada pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013). A uniformidade (U) é determinada pela razão entre o valor de iluminância mínimo ($E_{\text{mín}}$) e o valor de iluminância médio ($E_{\text{méd}}$), como indica a Equação 1, adotando-se como base a uniformidade mínima a ser alcançada de 0,6 (ABNT, 2013) em função do layout flexível das salas de escritório.

EQUAÇÃO 1 – Uniformidade

Fonte: ABNT, 2013.

$$U = \frac{E_{\text{mín}}}{E_{\text{méd}}}$$

Para ambas as simulações da iluminação natural (intervalos da UDI e uniformidade) adotou-se um plano horizontal de análise à 75 cm de altura, com sensores espaçados ortogonalmente em 50 cm entre si, como indica a NBR 15215-4 (ABNT, 2005), estando 8 sensores dispostos no eixo X e 16 sensores dispostos no eixo Y, totalizando 128 sensores, como demonstra a [Figura 9].

FIGURA 9 – Posicionamento dos sensores de avaliação do desempenho luminico.

Fonte: as autoras

Para a análise dos intervalos da UDI, a fim de se fazer uma análise mais apurada dos resultados encontrados, levou-se em consideração a malha de 50 x 50 cm estabelecida para as simulações, em que a profundidade do ambiente interno com dimensão de 8 m foi dividida em 4 trechos de 2 m, onde o Trecho 1 é o mais próximo da fachada e o Trecho 4 o mais distante da fachada onde, como indica a [Figura 10].

FIGURA 10 – Setorização do ambiente interno utilizada na avaliação dos intervalos da UDI.

Fonte: as autoras

As simulações computacionais relativas aos intervalos da UDI foram realizadas para todos os dias do ano no horário de 8h às 18h conforme o período de ocupação do ambiente analisado para a orientação Norte.

Em relação a avaliação da uniformidade, foram realizadas simulações para solstícios de inverno e verão (21 de junho e 21 de dezembro, respectivamente), a cada duas horas, como indica a NBR 15215-4 (ABNT, 2005), para os horários das 8h, 10h, 12h, 14h e 16h, também para a orientação Norte.

Simulações computacionais de desempenho térmico

Nas simulações de desempenho térmico buscou-se identificar qual dos modelos de elementos vazados possui maior capacidade de reduzir a radiação solar transmitida ao ambiente interno. Para tanto, foi utilizado como base o Coeficiente de Admissão da Radiação Solar Incidente (CRS) proposto por Cartana (2018), que determina o percentual de radiação solar transmitida antes e depois da utilização dos elementos vazados, como indica a Equação 2.

EQUAÇÃO 2 – Coeficiente de Admissão da Radiação Solar Incidente (CRS).

Fonte: Cartana, 2018.

$$PRRST = \left(\frac{\text{Radiação Solar Incidente} - \text{Radiação Solar Transmitida}}{\text{Radiação Solar Incidente}} \right) \times 100$$

Todavia, visando comparar qual dos modelos possui maior capacidade de reduzir a radiação solar transmitida, foi feita uma adequação na fórmula do Coeficiente de Admissão da Radiação Solar Incidente (CRS) proposto por Cartana (2018) para facilitar

as análises dos resultados. Assim, ao invés de se verificar o percentual de radiação solar transmitida optou-se por verificar o percentual de radiação solar que não foi transmitido para o ambiente interno, ou seja o Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida (PRRST) indicando assim qual dos modelos apresenta maior capacidade de reduzir a radiação solar transmitida em comparação com a fachada apenas em vidro, sem qualquer tipo de proteção, como demonstrado na Equação 3.

EQUAÇÃO 3 – Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida (PRRST).

Fonte: as autoras..

$$PRRST = \left(\frac{\text{Radiação Solar Incidente} - \text{Radiação Solar Transmitida}}{\text{Radiação Solar Incidente}} \right) \times 100$$

Para as simulações de desempenho térmico, como sugerido Cartana; Pereira; Meyer (2018), foi criado um plano vertical de análise afastado internamente 10 cm do alinhamento da fachada, com sensores espaçados ortogonalmente em 20 cm entre si, estando 20 sensores dispostos no eixo X e 13 sensores dispostos no eixo Y, totalizando 260 sensores, como indica a [Figura 11].

FIGURA 11 – Corte esquemático e perspectiva, respectivamente, indicando o plano com os sensores de simulação da radiação solar.

Fonte: as autoras

O Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida (PRRST) foi avaliado para a Orientação Norte, para todos os meses do ano no período das 8h às 18h em função do horário de ocupação do ambiente interno avaliado.

A [Figura 12] a seguir traz a síntese do método adotado nesse estudo.

FIGURA 12 – Síntese do método adotado nesse estudo

Fonte: as autoras

Resultados

Os resultados dessa pesquisa foram estruturados de acordo com as etapas de simulação referentes ao desempenho lumínico e a percentual de redução da radiação solar transmitida. Apresenta-se ao final um quadro síntese resultante de ambas as etapas de avaliação.

Simulações computacionais de desempenho lumínico

As avaliações de desempenho lumínico foram divididas nas seguintes subetapas: intervalos da UDI para elementos vazados com mesma espessura; intervalos da UDI para elementos vazados com mesmos ângulos de insolação externos (α e β); uniformidade, que avalia simultaneamente os modelos de elementos vazados com mesma espessura e mesmos ângulos de insolação.

Intervalos da UDI para elementos vazados com mesma espessura

Na avaliação dos elementos vazados de mesma espessura, como indica a [Figura 13], pode-se dizer que para a orientação Norte o Modelo IV apresentou um melhor desempenho nos Trechos 1 e 2 (mais próximos da fachada). Tendo em vista, que esse modelo foi o que contribuiu de maneira mais significativa na redução da iluminação excessiva nesses trechos, garantindo mais de 80% das horas do dia no intervalo recomendado ($100\text{lx} \leq E < 2000\text{lx}$)

No caso dos demais modelos com elementos vazados (Modelo II e Modelo III) à medida que se reduz a quantidade de furos e aumenta-se as dimensões dos mesmos há um aumento ganho de iluminação no intervalo excessivo ($E \geq 2000\text{lx}$) nos Trechos 1 e 2, até chegar à pior situação que ocorre no Modelo I (fachada apenas em vidro), que apresenta elevados valores de iluminância, mas que não podem ser aproveitados devido ao brilho extremo que ocasiona o ofuscamento.

Todavia, em relação aos trechos mais profundos (Trechos 3 e 4) observa-se que o Modelo IV apresentou maior dificuldade para iluminá-los ao necessitar de acionamento de iluminação artificial em mais de 75% das horas do dia nesses trechos. Enquanto, o Modelo II, dentre os modelos de elementos vazados, apresentou maior capacidade de iluminar os trechos mais profundos garantindo que até 65% das horas do dia fossem iluminadas naturalmente até o Trecho 3.

FIGURA 13 – Plantas baixas demarcando as áreas compreendidas nos intervalos da UDI para os Modelos I, II, III e IV, sendo o Trecho 1 o mais próximo da fachada e o Trecho 4 o mais distante, orientação Norte. Fonte: as autoras

O Modelo I, por sua vez, apresentou aparentemente melhor capacidade de iluminar os trechos mais profundos (Trechos 3 e 4) garantido que mais de 90% das horas do dia fossem iluminados naturalmente.

Em função da diferença no desempenho lumínico identificada entre os modelos de elementos vazados avaliados, ainda que mantido o mesmo percentual de área de abertura da fachada, conduziu-se uma nova etapa de simulação, buscando identificar a qual parâmetro essa variação no desempenho estaria atribuída. Nessa nova etapa foi então verificada a influência dos ângulos de insolação externos (α e β) no desempenho dos elementos vazados, tendo em vista que ao se manter a mesma espessura obteve-se diferentes ângulos de insolação para modelos avaliados anteriormente.

Intervalos da UDI para elementos vazados com mesmos ângulos de insolação externos (α e β)

Na avaliação dos intervalos da UDI para os elementos vazados de mesmos ângulos de insolação externos (55°), vale destacar a semelhança no desempenho dos modelos com elementos vazados avaliados (Modelos II', III e IV'). A diferença percentual de desempenho apresentada por esses foi inferior 10% para os intervalos analisados, como indica a [Figura 14].

Os Modelos II', III e IV' contemplaram mais de 60% das horas do dia no intervalo recomendado ($100\text{lx} \leq E < 2000\text{lx}$) até o Trecho 3, onde o melhor desempenho se deu no Trecho 2 com mais de 90% nesse intervalo. Todavia, esses modelos apresentaram dificuldade de iluminar o Trecho 4 (mais distante da fachada), em que menos de 15% das horas do dia desse trecho foram contempladas no intervalo recomendado ($100\text{lx} \leq E < 2000\text{lx}$).

Enquanto o Modelo I, como na etapa anterior, apresentou os maiores percentuais no intervalo excessivo no trecho mais próximos à fachada (Trecho 1), com mais de 90% das horas do dia no intervalo excessivo ($E \geq 2000\text{lx}$). Todavia, apresentou, aparentemente, melhor capacidade de iluminar os trechos mais profundos (Trechos 3 e 4).

FIGURA 14 – Plantas baixas demarcando as áreas compreendidas nos intervalos da UDI para os Modelos I, II', III e IV', sendo o Trecho 1 o mais próximo da fachada e o Trecho 4 o mais distante, orientação Norte.

Fonte: as autoras

Síntese dos intervalos da UDI para todos os modelos avaliados (Modelos I, II, III, IV, II' e IV')

Ao avaliar simultaneamente a variação dos ângulos de insolação externos (α e β), Etapa 1, e da espessura, Etapa 2, para o intervalo recomendado ($100lx \leq E < 2000lx$), como traz a [Figura 15], foi possível verificar que a variação dos ângulos de insolação exerceu influência mais significativa no desempenho lumínico. Ou seja, se mantidos os mesmos ângulos de insolação para um mesmo percentual de área de abertura da fachada a quantidade e dimensão dos furos tem pouca influência no desempenho lumínico dos elementos vazados. O que pode ser observado por meio da similaridade na performance dos Modelos II', III e IV' de mesmo ângulo de insolação (55°). Tal resultado, corrobora com as máscaras de sombra dos modelos apresentadas anteriormente [Figura 7].

Verificou-se ainda, que os Modelos II', III, IV e IV' apresentaram um melhor desempenho nos Trechos 1 e 2 (mais próximos da fachada) ao contribuírem para a redução da iluminação excessiva. Nesse sentido, destaca-se o Modelo IV que apresentou a maior capacidade de reduzir a iluminação excessiva nesses trechos, muito em função dos menores ângulos de insolação (36°). Todavia, essa mesma característica acarretou uma redução acentuada na iluminação nos trechos mais profundos (3 e 4) do ambiente interno, impedindo que esses fossem iluminados de forma satisfatória.

No caso do Modelo I, esse apresentou melhor capacidade de iluminar os trechos mais profundos (Trechos 3 e 4). Entretanto, é importante destacar que em função da iluminação excessiva admitida por esse modelo nos Trechos 1 e 2 (mais próximos da fachada), que em geral requer dispositivos internos de controle como cortinas e persianas, dificilmente os Trechos 3 e 4 (mais distantes da fachada) desfrutarão da iluminação recomendada que chegaria até eles.

Assim, pode-se afirmar que os modelos de elementos vazados com menores ângulos de insolação possuíam melhor capacidade de reduzir a iluminação excessiva próxima à fachada, mas apresentaram dificuldade de iluminar os trechos mais profundos do ambiente interno. Enquanto os modelos com maiores ângulos de insolação reduziram de forma menos eficiente a iluminação excessiva próxima à fachada, mas conseguiram garantir os maiores percentuais de iluminação no intervalo recomendado nos trechos mais profundos.

FIGURA 15 – Síntese dos intervalos das UDI com base no intervalo recomendado ($100lx \leq E < 2000lx$) para todos os modelos avaliados, sendo o Trecho 1 o mais próximo da fachada e o Trecho 4 o mais distante, orientação Norte.

Fonte: as autoras

Uniformidade

Ao analisar a uniformidade, para a orientação Norte no solstício de inverno e verão, verifica-se que nenhum dos modelos avaliados alcançou o limite mínimo de

uniformidade de 0,6 estabelecido pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), como indica a Figura 16. Evidenciam-se assim os altos contrastes luminosos presentes no ambiente interno, que acarretará desconforto visual aos usuários.

De modelo geral, observa-se uma melhoria, ainda que pouco significativa, no solstício de verão se comparado ao solstício de inverno. Isso possivelmente pode ser atribuído à ausência de radiação solar direta na orientação Norte nessa época do ano, que fica mais evidente com o Modelo I. Além disso, verifica-se uma certa similaridade no desempenho dos elementos vazados avaliados nas duas épocas do ano, principalmente os modelos de mesmo ângulo de insolação (Modelos III, II' e IV').

Por fim, pode-se relacionar a dificuldade dos elementos vazados de alcançarem a uniformidade, a incapacidade desses de iluminarem os trechos mais profundos do ambiente interno, apesar de conterem de maneira eficiente os excessos luminosos próximo à fachada. Enquanto o Modelo I embora consiga atender a profundidade do ambiente com iluminação satisfatória, admite elevados percentuais de iluminação excessiva nos trechos próximos à fachada.

FIGURA 16 – Uniformidade para todos os modelos avaliados (I, II, III, IV, II' e IV'), orientação Norte.

Fonte: as autoras

Simulações computacionais de desempenho térmico

As avaliações de desempenho térmico foram feitas a partir do percentual de redução da radiação solar transmitida para o ambiente interno com a utilização dos elementos vazados (Modelo II, Modelo III, Modelo IV, Modelo II' e Modelo IV') comparados ao Modelo I com fachada apenas em vidro, sem qualquer tipo de elemento sombreador.

Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida

Para a orientação Norte, ao avaliar o percentual de redução da radiação solar transmitida, conforme demonstrado na Figura 17, é possível observar que todos os elementos vazados avaliados (Modelo II, Modelo III, Modelo IV, Modelo II' e Modelo IV') reduziam mais de 50% da radiação solar transmitida ao ambiente interno, comparando com o ambiente com fachada apenas em vidro sem qualquer tipo de elemento de proteção, para os solstícios de inverno e verão.

Além disso, nota-se uma melhoria na performance à medida que se aproxima dos meses de menor altura solar (solstício de inverno), quando todos os modelos avaliados apresentam um ganho de performance superior a 10%. Isso possivelmente está associado a radiação solar direta recebida na orientação Norte nessa época do ano.

Vale destacar ainda, a relação entre o ângulo de insolação e o percentual de redução da radiação solar transmitida, onde o Modelo IV de menor ângulo de insolação (36°) apresentou os maiores percentuais de redução da radiação solar transmitida para todas as épocas do ano avaliadas. Já os Modelos III, II' e IV' de mesmo ângulo de insolação com valor intermediário (55°) apresentaram desempenho similar e intermediário se comparado aos demais modelos de elementos vazados. Enquanto o Modelo II de maior ângulo de insolação de (71°) apresentou, para todas as épocas do ano avaliadas, o pior desempenho dentre os elementos vazados, mas ainda assim com capacidade de reduzir mais de 50% da radiação solar transmitida para todas as épocas do ano avaliadas.

Relaciona-se esses resultados às máscaras de sombra dos modelos apresentadas na [Figura 7]. Foi possível verificar nela uma minoração dos horários de incidência da radiação solar para o Modelo IV de menores ângulos de insolação (36°). Já os Modelos II' III e IV', apesar de apresentarem diferentes parâmetros, a manutenção dos mesmos ângulos de insolação (55°) garantiu a mesma máscara de sombra, que acarretou um desempenho similar. Enquanto o Modelo II de maiores ângulos de insolação (71°) apresentou mais horas do dia expostas a radiação solar.

Destaca-se, por fim, um ganho de performance de cerca de 10% dos Modelos II', III e IV' (55°) em relação ao Modelo II (71°) e também de cerca de 10% do Modelo IV (36°) em relação aos Modelos II', III e IV' (55°) para todos os meses analisados.

Síntese dos resultados relativos ao desempenho lumínico e térmico

Apresenta-se, por fim, O Quadro 1 com as sínteses dos resultados relativos ao desempenho lumínico e térmico para todos os modelos (Modelos I, II, III, IV, II' e IV') e critérios avaliados. Os resultados de desempenho lumínico referem-se aos Intervalos da UDI para os Trechos 1, 2, 3 e 4, onde o Trecho 1 é o mais próximo da fachada e o Trecho 4 o mais distante; e a Uniformidade para solstício de inverno e verão para os horários das 8h, 10h, 12h, 14h e 16h. Já as avaliações de desempenho térmico são apresentadas para todos os meses do ano, tendo como base o percentual de redução da radiação solar transmitida. A fim de se facilitar a comparação entre os modelos para todos os critérios avaliados, foram estabelecidos parâmetros de avaliação de desempenho que compreende: desempenho satisfatório, desempenho moderado e desempenho insatisfatório, como consta na legenda.

Modelos Avaliados	Desempenho Lumínico															Desempenho Térmico											
	Intervalos da UDI				Uniformidade											Percentual de Radiação Solar Transmitida											
					Solstício de Inverno					Solstício de Verão						Meses do Ano											
	1	2	3	4	08h	10h	12h	14h	16h	08h	10h	12h	14h	16h		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Modelo I																											
Modelo II																											
Modelo III																											
Modelo IV																											
Modelo II'																											
Modelo IV'																											

LEGENDA:

INTERVALOS DA UDI:

Desempenho satisfatório: acima de 70% das horas no intervalo recomendado ($100\text{lx} \leq E < 2000\text{lx}$).

Desempenho moderado: entre 35% e 70% das horas no intervalo recomendado ($100\text{lx} \leq E < 2000\text{lx}$).

Desempenho insatisfatório: abaixo 35% das horas no intervalo recomendado ($100\text{lx} \leq E < 2000\text{lx}$).

UNIFORMIDADE:

Desempenho satisfatório: uniformidade igual ou superior a 0,6.

Desempenho moderado: uniformidade entre 0,3 e 0,6.

Desempenho insatisfatório: uniformidade inferior a 0,3.

PERCENTUAL DE REDUÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR TRANSMITIDA:

Desempenho satisfatório: Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida superior a 70%.

Desempenho moderado: Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida entre 35% e 70%.

Desempenho insatisfatório: Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida inferior a 35%.

QUADRO 1 – Síntese dos resultados relativos ao desempenho lumínico e térmico para todos os parâmetros e modelos avaliados (I, II, III, IV, II' e IV')..

Fonte: as autoras

Considerações finais

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho lumínico e o percentual de redução da radiação solar transmitida a partir da atuação de diferentes geometrias de elementos vazados ortogonais para um ambiente interno de escritório localizado na cidade de Vitória – ES ($20^{\circ}19'15''$ latitude Sul e $40^{\circ}20'10''$ longitude Oeste).

Como parâmetros, manteve-se o mesmo percentual de área de abertura da fachada para os modelos com elementos vazados avaliados e variou-se a quantidade e dimensão dos furos, a espessura e os ângulos de insolação externos (α e β) dos mesmos.

A partir dos resultados obtidos foi possível constatar na primeira etapa de avaliação dos intervalos da UDI para os elementos vazados com mesma espessura, que quanto menor o furo maior a capacidade de reduzir a iluminação excessiva nos trechos mais próximos à fachada. Todavia, a menor dimensão do furo acarreta maior dificuldade de iluminar os trechos mais profundos do ambiente interno.

Com a segunda etapa de avaliação dos intervalos das UDI, onde foram fixados os mesmos ângulos de insolação (α e β), observou-se que na verdade o parâmetro que estava influenciando a variação de desempenho lumínico entre os elementos

vazados avaliados na primeira etapa foram os ângulos de insolação (α e β), os quais foram variados em função da fixação da mesma espessura, numa relação de quanto menor o furo, menores os ângulos de insolação. Dessa forma, pode-se afirmar que os ângulos de insolação são os fatores mais determinantes no desempenho lumínico dos elementos vazados, ou seja, uma vez que mantido o mesmo percentual de área de abertura da fachada e os mesmos ângulos de insolação a quantidade e dimensão dos furos têm menor influência. Assim, se estabeleceu uma nova relação, quanto menores os ângulos de insolação (α e β), maior a capacidade de os elementos vazados de reduzirem a iluminação excessiva nos trechos mais próximos à fachada. Todavia, as menores dimensões dos ângulos de insolação acarretaram maior dificuldade de iluminar os trechos mais profundos do ambiente interno.

Em relação a uniformidade, destaca-se que nenhum dos modelos avaliados alcançou a uniformidade de 0,6 recomendada pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013). Isso pode ser atribuído aos grandes contrastes luminosos ocasionados pela redução drástica da iluminação nos trechos mais profundos do ambiente interno, no caso dos modelos com elementos vazados, principalmente aqueles com menores ângulos de insolação, ou decorrentes da iluminação excessiva admitida próximo à fachada no caso do modelo sem proteção solar.

No que se refere ao percentual de redução da radiação solar transmitida, verifica-se novamente a influência dos ângulos de insolação (α e β) no desempenho dos elementos vazados, onde os modelos com mesmos ângulos de insolação apresentaram desempenhos similares. Além disso, também foi possível estabelecer uma associação entre os ângulos de insolação dos elementos vazados e o percentual de radiação solar transmitida em uma relação de que: quanto menores os ângulos de insolação, maior o percentual de redução da radiação solar transmitida dos elementos vazados. Associa-se ainda o desempenho dos elementos vazados à época do ano avaliada, em que todos os modelos de elementos vazados avaliados apresentam maior capacidade de reduzir a radiação solar transmitida nos meses em que a orientação Norte recebe radiação solar direta.

Ao analisar os mascaramentos, nota-se que esses apresentaram intrínseca relação com os resultados obtidos nas simulações computacionais, tanto de desempenho lumínico quanto de desempenho térmico, o que salienta a importância da compreensão da geometria solar.

Assim, destaca-se a relevância de se levar em consideração, dentre outros parâmetros, a espessura do elemento vazado em detrimento dos modelos com espessuras genéricas disponíveis no mercado. Tendo em vista, que a espessura será um fator determinante no desempenho térmico e lumínico dos elementos vazados por estar diretamente associada aos ângulos de insolação (α e β) e consequentemente as máscaras de sombras proporcionadas por esses.

Como limitações da pesquisa, destaca-se que o Percentual de Redução da Radiação Solar Transmitida (PRRST) utilizado nesse estudo serviu principalmente para complementar as avaliações de desempenho lumínico e dar um panorama geral da radiação solar transmitida por cada um dos modelos de elementos vazados avaliados. Todavia, para uma análise mais aprofundada e precisa do desempenho térmico faz-se necessária a complementação desse com outros parâmetros.

Por fim, como trabalhos futuros, indica-se a avaliação de outros modelos de elementos vazados, com geometrias mais complexas e até mesmo com diferentes Percentuais de Área de Abertura na Fachada (PAF). Tendo em vista que nesse estudo foram avaliados apenas elementos ortogonais com área de abertura fixada em função do valor mínimo indicado pelo Código de Obras de Vitória. Faz-se essa recomendação com a finalidade potencializar o desempenho dos modelos, principalmente no que se refere à uniformidade, parâmetro de grande importância, que não foi atendido por nenhum dos modelos aqui propostos.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela viabilização desta pesquisa.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15215-4: **Iluminação natural: verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações: método de medição**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO/CIE 8995-1**. Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ALVARENGA, A. **La piel de la arquitectura moderna brasileña: las soluciones de la envolvente a la luz de los conceptos de la arquitectura bioclimática**. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- BADER, S. **High-performance façades for commercial buildings**. Austin, Texas: The University of Texas at Austin - School of Architecture, Austin, 2010.
- BELLIA, L.; FALCO, F.; MINICHIELLO, F. Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates. **Applied Thermal Engineering**, Eng. 54, 2013.
- BOLSSONI, G.; LARANJA, A. A Influência da Refletância dos Elementos Vazados no Desempenho Lumínico. **II Congresso Internacional de Arquitetura e Cidade (ARQCIDADE) e X Coletânea ARQURB**. Vila Velha, 2019.
- BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Evaluating Energy Performance in Non-Domestic Buildings: a review. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 734-755, 2016.
- CARTANA, R. **Desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar para fachadas desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital**. 2018. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- CARTANA, R.; PEREIRA, F. MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 67-82, Porto Alegre, 2018.
- CHING, F. D. K. **Dicionário visual de arquitetura**. São Paulo: **Martins Fontes**, 2010.
- CHO, J.; YOO, C.; KIM, Y. Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings: Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. **Energy & Buildings**, v. 82, p. 771–785, 2014.
- CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos**. Editora Revan, 2003.
- CORDEIRO, A. **O uso de cobogós como uma segunda pele em edifícios de escritórios: análise do desempenho lumínico de diferentes geometrias**. 2018. 199p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing, 2012.

FREEWAN, A. A. Impacto of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. **Solar Energy**, v. 102, p.14-30, 2014.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª ed. São Paulo, 2014.

LAMBERTS, R.; GHISI, R.; RAMOS, G. Impactos da adequação climática sobre a eficiência energética e o conforto térmico de edifícios de escritórios no Brasil. 49p. Florianópolis: **LABEEE**, 2006.

MESA, N. A.; CORICA, L.; PATTINI, A. Evaluation of the potential of natural light to illuminate buildings in dense urban environment. A study in Mendoza, Argentina. **Renewable Energy**, n. 36, p. 2414-2423, 2011.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, London: Elsevier, v.38, p. 905 - 913, 2006.

PAULERT, R. **Uso de elementos vazados na arquitetura, estudo de três obras educacionais contemporâneas**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PEREIRA, R. C. **Avaliação de Ferramentas de Simulação de Iluminação Natural por meio de Mapeamento Digital de Luminâncias da abóbada celeste e entorno**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

RAPHAEL, B. Active control of daylighting features in buildings. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, n.26, p.393-405, 2011.

SOLEMMA. 2020. Disponível em: <<https://www.solemma.com/Diva.html>>. Acesso em: 26 jan. 2020.

VITÓRIA. Lei nº. 4821, de 30 de dezembro de 1998. **Código de Edificações do Município de Vitória**. Vitória, 1998. Disponível em: Acesso em: 17 out. 2019.

YOSHINO, H.; HONG, T.; NORD, N. IEA EBC Annex 53: total energy use in buildings, analysis and evaluation methods. **Energy and Buildings**, v. 152, p. 124-136, mar. 2017.

RESPONSABILIDADE INDIVIDUAL E DIREITOS AUTORAIS

A responsabilidade da correção normativa e gramatical do texto é de inteira responsabilidade do autor. As opiniões pessoais emitidas pelos autores dos artigos são de sua exclusiva responsabilidade, tendo cabido aos pareceristas julgar o mérito das temáticas abordadas. Todos os artigos possuem imagens cujos direitos de publicidade e veiculação estão sob responsabilidade de gerência do autor, salvaguardado o direito de veiculação de imagens públicas com mais de 70 anos de divulgação, isentas de reivindicação de direitos de acordo com art. 44 da Lei do Direito Autoral/1998: “O prazo de proteção aos direitos patrimoniais sobre obras audiovisuais e fotográficas será de setenta anos, a contar de 1º de janeiro do ano subsequente ao de sua divulgação”.

O CADERNOS PROARQ (ISSN 2675-0392) é um periódico científico sem fins lucrativos que tem o objetivo de contribuir com a construção do conhecimento nas áreas de Arquitetura e Urbanismo e afins, constituindo-se uma fonte de pesquisa acadêmica. Por não serem vendidos e permanecerem disponíveis de forma **online** a todos os pesquisadores interessados, os artigos devem ser sempre referenciados adequadamente, de modo a não infringir com a Lei de Direitos Autorais.

Submetido em 09/05/2020

Aprovado em 04/03/2021