

Investigando a influência das variáveis arquitetônicas na iluminação natural do poço de luz residencial

Investigating the influence of architectural variables on the daylighting of a residential light well

Recibido: marzo 30 / 2022 • Evaluado: septiembre 16 / 2022 • Aceptado: junio 6 / 2023

João Pedro de Melo Souza*

Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora (Brasil)
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído

Klaus Chaves Alberto**

Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora (Brasil)
Departamento de Projeto, Representação e Tecnologia da
Arquitetura e do Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído

Sabrina Andrade Barbosa***

Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Petrópolis (Brasil)
Departamento de Arquitetura e Urbanismo
Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora (Brasil)
Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído

RESUMO

O poço de luz é um recurso arquitetônico utilizado para promover iluminação natural a partir do núcleo do edifício. Frequentemente, ele é projetado de acordo com um índice sem levar em consideração a influência de cada uma das variáveis arquitetônicas nos ganhos de iluminação natural. Assim, este estudo tem como objetivo identificar e comparar a influência dessas variáveis arquitetônicas no desempenho da iluminação natural de um poço de luz do edifício residencial. Para isso, foi simulado parametricamente um modelo-base de poço de luz de seis pavimentos na cidade de São Paulo, Brasil, variando, em casos alternativos, sua dimensão geométrica, a refletância das suas paredes e a abertura da janela das salas conectadas a ele. Para a avaliação da iluminação natural, foram utilizadas, através do software ClimateStudio, as métricas Annual Sunlight Exposure (ASE1000) e Spatial Daylight Autonomy (sDA300/50%). Observou-se que o aumento da refletância é uma solução que melhora a distribuição da iluminação natural sem elevar os níveis de luz solar direta, enquanto o aumento da dimensão geométrica resulta em maior alcance da luz solar direta no poço, não ultrapassando o quarto pavimento. Para minimizar o risco de desconforto visual nos ambientes, as janelas devem ter abertura menor na metade superior e maior na metade inferior do poço de luz. Assim, as variáveis consideradas contribuem, de maneira distinta, para o aumento da iluminação natural nos ambientes avaliados, porém é necessário considerar o risco de desconforto visual em alguns casos.

Palavras-chave:

climateStudio; luz natural; métricas dinâmicas; poço de Iluminação; simulação em iluminação

ABSTRACT

The light well is an architectural resource used to provide daylighting from the core of the building. It is often designed according to an index without taking into account the influence of each of the architectural variables on the daylighting gains. Therefore, this study aims to identify and compare the influence of these architectural variables on the daylighting performance of a residential light well. For this purpose, a basic model of a six-storey light well in the city of São Paulo, Brazil, was parametrically simulated by varying, in alternative cases, its geometric dimension, the reflectance of its walls and the window opening of the rooms connected to it. The Annual Sunlight Exposure (ASE1000) and Spatial Daylight Autonomy (sDA300/50%) metrics were used to evaluate daylighting, using ClimateStudio software. It was observed that increasing reflectance is a solution that improves the distribution of natural light without increasing the level of direct sunlight, while increasing the geometric dimension results in a greater area of direct sunlight in the fountain, not exceeding the fourth floor. To minimize the risk of visual discomfort in the rooms, the windows should be smaller in the upper half and larger in the lower half of the light well. Thus, the variables considered contribute in different ways to increase the daylighting in the evaluated environments, although the risk of visual discomfort must be considered in some cases.

Keywords:

climateStudio; daylight; dynamic metrics; light well; lighting simulation

CÓMO CITAR

Melo Souza, J. P., Chaves Alberto, K., y Andrade Barbosa, S. (2023). Investigando a influência das variáveis arquitetônicas na iluminação natural do poço de luz residencial. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 26(1) pp. 91-106 <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.4599>

- * Arquitecto e urbanista, Centro Universitário Uni-Academia. Juiz de Fora (Brasil)
Mestrando em Ambiente Construído, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora (Brasil)
<https://scholar.google.com/citations?user=QwBSlacAAAAJ&hl=pt-BR&oi=ao>
<https://orcid.org/0000-0002-1539-1695>
joao.pedro@arquitetura.ufjf.br
- ** Arquitecto e urbanista, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora (Brasil)
Doutor em Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro (Brasil)
Estágio pós-doutoral, Columbia University. Nova York (Estados Unidos)
<https://scholar.google.com/citations?user=IWvhaUwAAAAJ&hl=pt-BR>
<https://orcid.org/0000-0003-2845-8307>
klaus.alberto@ufjf.edu.br
- *** Arquiteta e urbanista, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa (Brasil)
PhD em Ambiente Construído, University of Brighton. Brighton (Inglaterra)
Pós-doutora em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa (Brasil)
Pós-doutora em Ambiente Construído, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora (Brasil)
<https://scholar.google.com/citations?user=REngbhIAAAAAJ&hl=pt-BR&oi=sra>
<https://orcid.org/0000-0002-4129-5541>
sabrina.barbosa@uerj.br

INTRODUÇÃO

Este artigo é o resultado de parte das investigações realizadas durante a elaboração de uma dissertação de mestrado, dentro do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora, no Brasil. A pesquisa que dá origem à dissertação investiga o poço de luz do edifício residencial e propõe soluções para melhorar o desempenho da iluminação natural nos espaços conectados a ele. Para isso, são testadas diversas variáveis arquitetônicas através da simulação computacional paramétrica. Os resultados são analisados com base em métricas que determinam a qualidade da luz natural no ambiente.

A luz natural é importante para a saúde humana. Ela estimula o corpo a produzir vitamina D (Santana et al., 2022), ajuda na regulação do ritmo circadiano (Duffy & Czeisler, 2009; Knoop et al., 2020; Wirz-Justice et al., 2020) e promove a esterilização do ambiente (Wiehe, 2019). Outro benefício é sua capacidade de proporcionar economia de energia no edifício ao substituir a iluminação artificial durante o dia (Balabel et al., 2022; Wong, 2017). Quando a luz natural é exclusivamente utilizada para iluminar um ambiente para a realização de uma tarefa visual, ela deve ser mantida, durante todo o dia, dentro dos valores ideais de iluminância recomendados (Chartered Institution of Building Services Engineers [CIBSE], 2009, p. 133). A norma brasileira permite um nível de iluminação natural igual ou superior a 60 lux nos ambientes residenciais (ABNT NBR 15575-1, 2013). No entanto, para Mardaljevic et al. (2012), a iluminação natural ideal acontece a partir de 300 até 3.000 lux e, acima desse valor, pode gerar desconforto visual e aquecimento indesejado do ambiente. Bellia et al. (2017) enfatizam que o projeto de iluminação natural é um desafio ambicioso ao tentar encontrar um equilíbrio entre a máxima captação de luz natural e o controle do risco de desconforto térmico e visual.

Um importante recurso arquitetônico na distribuição da iluminação natural nas áreas centrais de uma edificação em que as aberturas para o exterior são limitadas é o poço de luz (Bolssoni et al., 2018). Além da iluminação, o poço também favorece a ventilação e o conforto térmico passivo dentro do edifício (Farea et al., 2014; Ahadi et al., 2018.). Desde que devidamente projetado, seu uso se justifica como uma alternativa sustentável para a obtenção de iluminação natural nos ambientes conectados a ele (Freewan, 2014; Kristl & Krainer, 1999). Dessa forma, os projetistas podem utilizar fórmulas matemáticas, chamadas “índice”, para calcular dimensões como a relação da altura do edifício com o diâmetro de abertura do poço, a fim de permitir a entrada adequada de luz nos ambientes. Esse índice normalmente é definido por meio dos códigos

de obra, que variam conforme a localidade e determinam valores mínimos para o dimensionamento do poço de luz, dependendo do tipo de ambiente que será iluminado, seja esse de permanência prolongada, seja transitória (Bolssoni et al., 2018). Em São Paulo, Brasil, uma das exigências do código de obra é que o poço de luz tenha dimensão mínima de 1,5 metros e relação mínima entre os seus lados igual a dois terços (Lei 16.642/2017, São Paulo, Brasil, 2017). No entanto, nem sempre a eficiência do poço de luz é garantida pelo tamanho das suas dimensões. Um poço de luz mais largo não é necessariamente o mais eficiente, pois as características dos materiais que revestem suas superfícies podem influenciar a distribuição e disponibilidade de iluminação na sua parte inferior (Kristl & Krainer, 1999; Bugeat et al., 2020). Portanto, para garantir um bom desempenho do poço de luz, os projetistas devem se atentar não somente às suas dimensões, mas também aos critérios técnicos dos seus materiais. Um poço de luz mal projetado tem como consequência um excesso de luz natural nos pisos superiores e luz insuficiente nos pisos inferiores (Goharian et al., 2022; Bugeat et al., 2020; Ahadi et al., 2018). A geometria e a altura da claraboia do poço de luz exercem influência na distribuição da luz que atravessa a sua abertura superior (Goharian et al., 2022; Acosta et al., 2013). A reflexão das superfícies internas do poço também desempenha um papel importante na iluminação dos ambientes internos. Bugeat et al. (2020) constataram que superfícies mais claras tendem a distribuir melhor a luz na porção mais profunda do poço. No entanto, também perceberam que variações na refletância das paredes pouco influenciam a iluminação natural nos pavimentos superiores, uma vez que a maior parte da luz recebida vem diretamente do sol por meio da abertura superior do poço de luz.

Assim, ainda é necessário que seja aprofundado o entendimento sobre as variáveis arquitetônicas que influenciam no desempenho da luz natural no ambiente construído, pois o conhecimento que se tem ainda não é suficiente para satisfazer as lacunas deixadas pelas normas e pelos códigos de obras (Albuquerque & Amorim, 2012). Em especial, é ainda relevante que seja determinada a influência de soluções arquitetônicas na iluminação natural obtida por meio do poço de iluminação. Mais pesquisas em diferentes localidades podem contribuir para o enriquecimento do tema, sobretudo no Hemisfério Sul, onde são poucos os estudos que abordam a otimização de elementos que influenciam a iluminação natural (Mangkuto et al., 2016).

A hipótese principal trabalhada neste estudo supõe que a solução para a melhoria do desempenho da iluminação natural no poço de luz,

sobretudo nos pavimentos inferiores, esteja no aumento de variáveis como a dimensão geométrica, a refletância e o percentual de abertura na fachada (PAF) do poço. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é comparar e analisar a influência dessas variáveis arquitetônicas no desempenho da iluminação natural de um poço de luz do edifício residencial. O estudo, realizado para a cidade de São Paulo, Brasil, foi conduzido por meio de simulações computacionais paramétricas. Modelos com poços de luz de diferentes dimensões geométricas, refletâncias de parede e áreas de abertura das janelas foram comparados, considerando a influência das quatro principais orientações solares.

Revisão de literatura

Diversas são as variáveis que podem influenciar as condições de iluminação natural dentro dos ambientes conectados ao poço de luz, das quais as mais relevantes são a dimensão geométrica do poço (Goharian et al., 2022; Ahadi et al., 2018), a altura do edifício, a orientação das fachadas (Freewan et al., 2014) e a refletância das superfícies (Bugeat et al., 2020; Acosta et al., 2013).

No estudo de Freewan et al. (2014), realizado em Irbid, Jordânia, em um edifício de dois pavimentos, um poço de luz de 2x2 metros de abertura sob o céu claro de junho ofereceu, ao meio-dia, uma iluminação natural de 1.000 lux próximo à janela e 200 lux no fundo do ambiente, considerando um espaço de 3,5 metros de profundidade. Porém, para atingir esses mesmos níveis de iluminação natural em um edifício de três pavimentos, foi necessária uma abertura de 3x3 metros do poço de luz e, para um edifício de quatro pavimentos, o vão teria de ser 4x4 metros. Assim, sob boas condições de iluminação no ambiente exterior, o aumento da área do poço e da abertura do vão das janelas promoveu uma melhoria na iluminação natural dos ambientes, sobretudo em edifícios baixos, que necessitam apenas de uma pequena variação na abertura do vão do poço para que a luz seja mais bem distribuída em todos os ambientes internos. É interessante notar, contudo, que esses autores não avaliaram os impactos das aberturas e da profundidade do poço maiores que 4x4 metros e quatro pavimentos (13 metros).

Por sua vez, Ahadi et al. (2018) investigaram o desempenho do poço de luz em função da dimensão geométrica na cidade de Teerã, Irã. A iluminância média anual foi 88% menor no piso térreo em comparação com o piso ao topo em salas internas conectadas a um poço de luz de 4 metros de diâmetro em um edifício de 7 pavimentos. Bugeat et al. (2020) verificaram que, em Barcelona, essa redução da iluminação chegou a 90% em um edifício com poço de luz de 12 metros de altura e dimensão geométrica

quadrada de 3 metros. É relevante notar que essas pesquisas se limitaram a estudar dimensões geométricas de no máximo 3 ou 4 metros de vão.

Uma outra importante estratégia a ser considerada em poços de iluminação é a reflexão da luz promovida pelas superfícies internas do poço. A capacidade de reflexão depende principalmente das características físicas das superfícies, como rugosidade ou a cor do material. Paredes coloridas podem apresentar refletâncias em valores próximos a 0,50, enquanto paredes brancas podem atingir valores de refletância acima de 0,80 (Jakubiec, 2016; Castro et al., 2003). Um outro aspecto importante da cor das superfícies é a sua capacidade de reflexão de calor por meio do infravermelho. Nesse contexto, a pesquisa de Castro et al. (2003) obteve valores de refletância do infravermelho de várias cores de tintas utilizadas em pinturas externas. Através de análises óticas com espectrofotômetro em superfícies pintadas com tinta acrílica e PVC, foi possível identificar cores que apresentassem pouco ganho de calor em razão do alto índice de refletância do infravermelho, como o branco e marfim, com índice de 76%, e vanilla, com 74%. Todas essas apresentaram refletância total, que inclui a luz visível, acima de 70%.

Assim, o aumento dos índices de refletância nas paredes é uma solução que contribui para uma distribuição mais uniforme da luz no espaço (Mangkuto et al., 2016). No estudo de Bugeat et al. (2020), um acréscimo de 10% da refletância das paredes de um poço de luz quadrado (3x3 metros), aberto no topo, sob o clima mediterrâneo de Barcelona, Espanha (41° N), foi suficiente para dobrar a iluminância média anual do ambiente no piso térreo, considerando um edifício de quatro pavimentos. Os autores encontraram resultados similares nos climas de Estocolmo, Suécia (59° N), Bilbao, Espanha (43° N), Cidade do México, México (19° N), e Quito, Equador (0°). Porém, é preciso considerar que superfícies altamente reflexivas, quando refletem a luz direta do sol, podem gerar maior aquecimento do ambiente interno em relação a superfícies menos reflexivas (Joudi et al., 2013). No entanto, ainda no seu estudo, Bugeat et al. (2020) registram que, no poço de luz, superfícies com até 0,85 de refletância não promovem desconforto visual e térmico dentro do ambiente interno. Além disso, nas condições em que a trajetória aparente do sol está mais baixa, a luz solar direta atinge somente os pavimentos superiores, resultando em uma considerável redução de iluminação natural nos pavimentos inferiores do poço (Bugeat et al., 2020), que tendem a ser mais frescos (Ahadi et al., 2018).

Complementarmente, a proporção ou o PAF deve ser cuidadosamente planejado na fase inicial do projeto no edifício, pois interferirá na

demanda de energia e na disponibilidade de luz natural do edifício (Xue et al., 2014). Quanto maior a abertura da janela, maior o risco de ofuscamento e superaquecimento dentro de um ambiente no clima tropical (Mangkuto et al., 2016). De acordo com Hee et al. (2014), o tipo de vidro utilizado na janela também pode interferir na iluminação, uma vez que os vidros incolores ou mais claros tendem a possuir um alto índice de transmissividade da luz, o que pode demandar a redução do PAF. Como exemplo, ao aumentar a transmissividade do vidro de 0,4 para 0,8, o PAF pode ser reduzido de 50% para 30%. A dimensão ideal do PAF também foi estudada em diferentes contextos geográficos. Mangkuto et al. (2016) verificaram o desempenho do PAF variando a dimensão de 30% a 80%, em um ambiente localizado em Bandung, Indonésia (6,93° S), que é uma região tropical. Através da otimização multiobjetivo, os autores concluíram que um PAF de 30% voltado para o Sul é a solução mais adequada para se obterem iluminação e visibilidade satisfatórias dentro de um ambiente no local estudado, considerando paredes internas com refletância de 0,80 e transmissividade do vidro de 0,88. No clima oceânico temperado de Frankfurt, Alemanha (50° N), o PAF foi estudado por Goia et al. (2013) por meio de otimização por simulação computacional. Sua dimensão foi testada variando de 20% a 80%.

Nesse trabalho, foi demonstrado que o PAF adequado se encontrava na faixa de 35% a 45%, independentemente da orientação solar e com paredes internas com refletância de 0,70.

Com relação aos métodos usados nessas pesquisas, destacam-se as simulações computacionais estáticas ou dinâmicas (Wu et al., 2021; Zhen et al., 2019; Goia et al., 2013). Simulações estáticas avaliam a iluminação em dia e horário específicos, utilizando determinados tipos de céu, como nublado, por exemplo (Bellia et al., 2017). Já as simulações dinâmicas, chamadas de “*climate-based daylight modeling*” (CBDM), utilizam dados meteorológicos baseados no clima local para simular as condições de iluminação natural no ambiente ao longo de todo o ano (Mardaljevic, 2012). Esse tipo de abordagem considera as condições climáticas do local, com variação da iluminação natural ao longo do dia e uso do componente direto e difuso da luz natural (Sudan et al., 2017). Alguns *plugins* são reconhecidos pelos autores por sua capacidade e precisão, por exemplo, o *honeybee*, o *ladybug* (Goharian et al., 2022) e o *Diva* (Sun et al., 2020; Le-Thanh et al., 2021). Em 2020, o *Diva* foi descontinuado e o *ClimateStudio* foi anunciado como seu substituto, trazendo melhorias que o deixam mais rápido e igualmente preciso em relação ao seu antecessor (Solemma Inc, 2022).

METODOLOGIA

Esta pesquisa utilizou a simulação computacional para a avaliação da iluminação natural por meio da modelagem paramétrica de modelos de edifícios e do uso de métricas dinâmicas (CBDM). A construção dos modelos e as simulações foram realizadas através da combinação dos *softwares* Rhinoceros (versão 6.11.18348.17061), Grasshopper (versão 2019.01.00) e ClimateStudio (versão 1.5.7955.28487). Por meio do *software* Grasshopper, foi criado um modelo-base de edifício com seis pavimentos

que possui um poço de luz quadrado com dimensão de 5x5 metros e profundidade de 16,8 metros (Figura 1). Para as superfícies internas do poço foi fixada, inicialmente, um valor de refletância em 0,50 que se aproxima ao de uma superfície da cor areia (Castro et al., 2003). Em cada pavimento, quatro salas com dimensões de 3,0 x 4,5 x 2,8 metros (LxAxP) foram posicionadas conectadas ao poço de luz sob os pontos cardeais (Norte, Sul, Leste, Oeste), por serem as principais orientações solares.

Figura 1. Configurações dos modelos simulados



Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC.

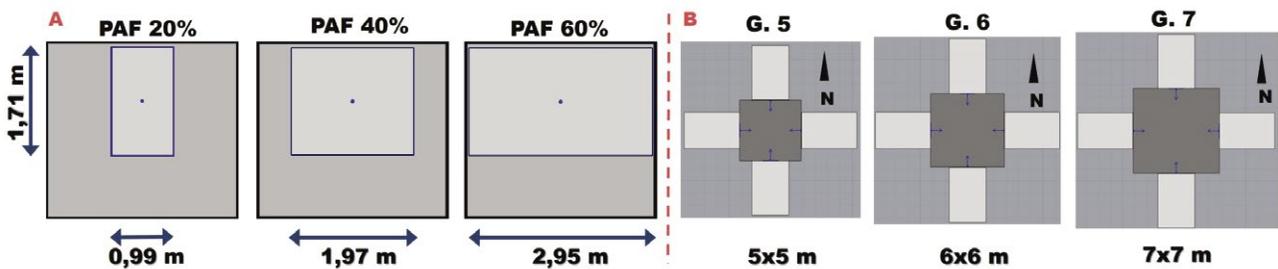
Cada sala possui uma abertura para o poço de luz com um PAF de 20%. O índice de refletância das superfícies das salas foi fixado em 0,70 para

o teto, 0,50 para as paredes internas e 0,20 para o piso, valores recomendados pela norma IES LM-83-12 (Illuminating Engineering Society

[IES], 2012) para esse tipo de simulação. O vidro utilizado nas janelas foi do tipo “clear” de folha única com índice de transmissividade de 0,88. Em cada sala, 126 sensores foram configurados a uma altura de 0,75m do piso e a uma distância de 0,30 metros das paredes e espaçados 0,32 metros entre eles. As iluminações em cada sala foram calculadas usando modelos dinâmicos de céu com base no arquivo climático da cidade de

São Paulo, Brasil (23° S). A partir do modelo-base, modelos alternativos foram simulados variando a configuração de uma das variáveis estudadas (dimensão geométrica do poço de luz, refletância e PAF) e fixando as demais. Foram simuladas dimensão geométrica quadradas de 6 metros e 7 metros, índices de refletância de 0,65 e 0,80, e aberturas de janelas correspondentes a 40% e 60% de PAF (Figura 2).

Figura 2. Variações nas dimensões do PAF (A) | Dimensão geométrica do poço de luz (B)



Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC.

As métricas dinâmicas utilizadas para avaliar o desempenho da iluminação foram *spatial daylight autonomy* (sDA, “autonomia espacial da luz do dia”) e *annual sunlight exposure* (ASE, “exposição anual à luz solar”). Ambas são conceituadas pela IES LM-83 (2012). A métrica sDA (sDA300, 50%) é definida como o percentual da área de piso que recebe a partir de 300 lux por pelo menos 50% das horas ocupadas do ano — entre 8 e 18 horas. É importante notar que o protocolo determina que valores acima de 55% já indicam uma boa condição de iluminação natural, mas a preferência são valores acima de 75%. A métrica ASE (ASE1000, 250 h) é definida como a porcentagem da área de piso que recebe luz solar direta acima de 1.000 lux em mais de 250 horas por ano. Nesse caso, a norma IES LM-83 determina que os valores desejáveis de ASE não estejam acima de 10%. Assim, através dos dados obtidos por meio da ASE, foi possível identificar se o ajuste das variáveis arquitetônicas promove um risco de desconforto visual por excesso de luz natural no ambiente, especialmente nos pavimentos superiores. Portanto, o uso combinado dessas métricas permitiu uma análise mais precisa da disponibilidade de luz natural ao longo do edifício. Os resultados obtidos a partir das alternativas simuladas foram organizados em tabela e comparados através de gráficos gerados no software Excel (versão 16.0.13127.20566).

A fonte do arquivo climático com os dados meteorológicos da cidade de São Paulo, Brasil, no formato epw., é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e foi disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações,

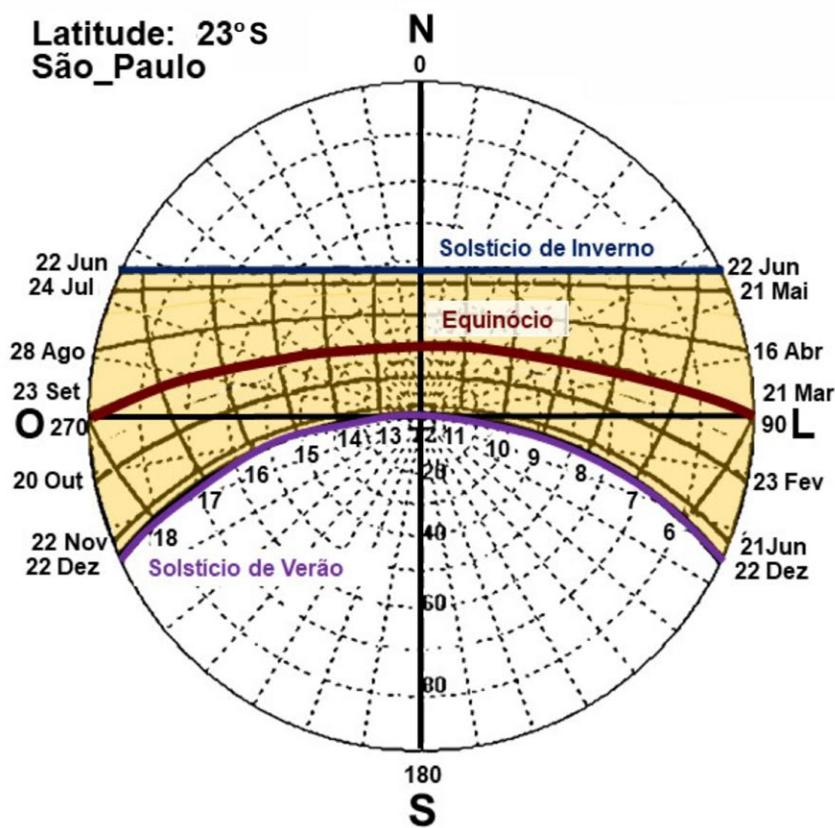
vinculado ao Núcleo de Pesquisa em Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina¹.

Características do clima da cidade de São Paulo, Brasil

O clima de São Paulo, Brasil (latitude: 23° 32' S, longitude 46° 38' W), é classificado como Cwa, subtropical úmido de inverno seco (Koeppen, 1948). Esse clima é caracterizado por ser predominantemente úmido, porém com um inverno seco e verão quente, em que a precipitação média no mês mais seco é inferior a 60 milímetros e o mês mais quente atinge temperatura superior a 22° C (Júnior, 2009). Em São Paulo, a umidade relativa do ar varia de 74% a 83%, e a média da precipitação acumulada anual é de 1.658,3 milímetros, sendo agosto o mês mais seco com 32,3 milímetros e janeiro o mês mais chuvoso com 292,1 milímetros, com variação da temperatura anual de 16,4° C a 26,1° C, tendo julho com o mês mais frio com média de 12,8° C e fevereiro o mais quente com média de 29° C (INMET, 2022). A nebulosidade é maior entre outubro e março, com valor máximo em janeiro, e menor de abril a setembro, coincidindo com o período de inverno e de menor precipitação (Moura et al., 2016). A Figura 3 apresenta a carta solar com a trajetória aparente do Sol na cidade. A maior parte dos raios solares incide na fachada voltada ao Norte durante o dia todo. Na fachada ao Leste, essa incidência ocorre no período da manhã e, ao Oeste, no período da tarde. A fachada ao Sul é a que está menos exposta ao Sol, com incidência dos raios solares no verão durante o período da manhã e tarde.

¹ O arquivo pode ser obtido no link: <http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>

Figura 3. Carta solar da cidade de São Paulo, Brasil (23° S)



Fonte: elaborado pelos autores, 2023 CC BY-NC

RESULTADOS

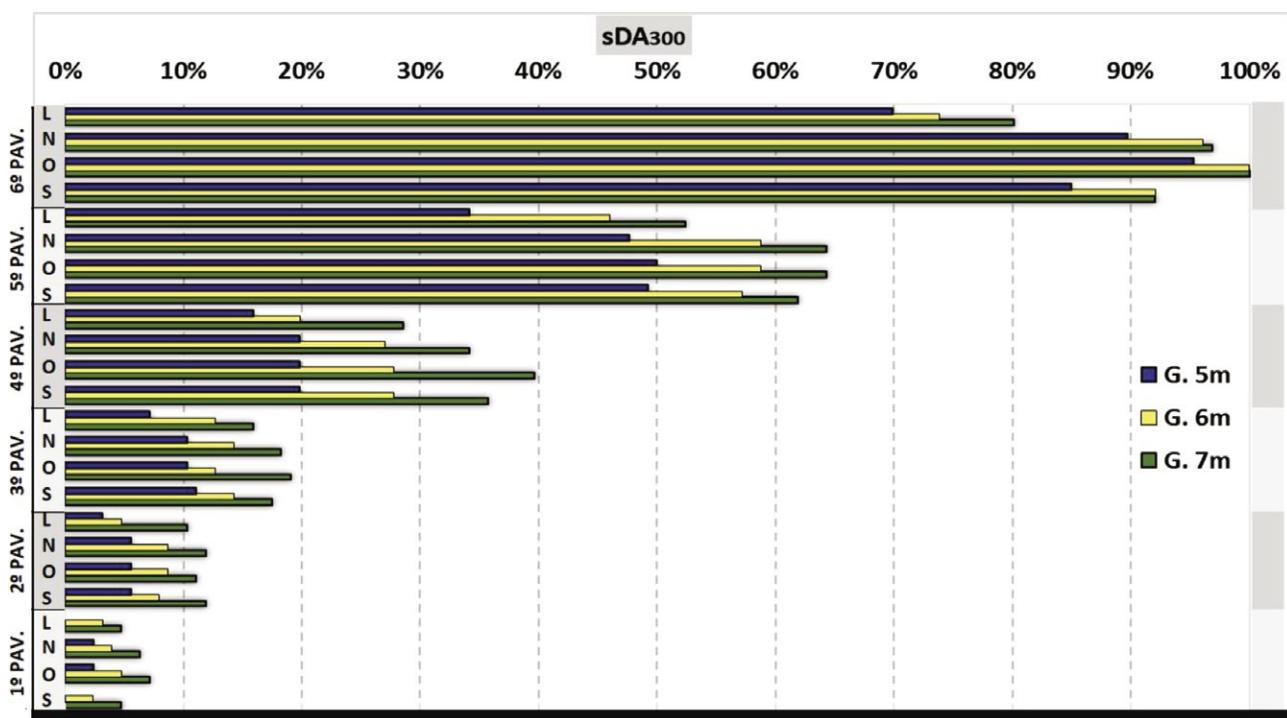
Enluminção natural sob comparação de diferentes dimensões geométricas do poço de luz

Comparando os resultados das três dimensões geométricas simuladas (Figura 4), verificou-se que, em todos os modelos, há uma expressiva queda de iluminação natural a partir do sexto pavimento, com valores de sDA insuficientes a partir do quarto e atingindo percentuais próximos de 0% no primeiro pavimento. No topo do edifício, devido à trajetória aparente do Sol no Hemisfério Sul, a sala que mais recebe iluminação natural tem abertura voltada ao Norte, em seguida Oeste, Leste e Sul. Porém, a partir do quinto pavimento, a diferença de iluminação natural entre as fachadas diminui, pois a luz que entra nas salas é preponderantemente proveniente da reflexão das paredes. Quando a luz solar direta não é a principal fonte de iluminação das salas, a orientação solar das fachadas não é um fator determinante para a qualidade dessa iluminação, conforme também verificado por Bugeat et al. (2020).

Assim, na medida em que se amplia a dimensão geométrica, aumentam-se os valores de sDA300. Ao aumentar a dimensão geométrica

de 5 para 7 metros, é possível observar que, no sexto pavimento, as salas que recebem luz solar direta (fachadas Leste, Norte e Oeste) têm um ganho de sDA300 menor em relação à fachada Sul, que não recebe luz solar direta na maior parte do ano. Esse aumento é de 70% para 80% na sala Sul e de 95% para 100% na sala Norte. Já no quinto pavimento, o sDA300 aumenta em 18% na sala com abertura voltada ao Sul e em 14% na sala ao Norte. O quarto pavimento apresenta os maiores ganhos com o aumento da dimensão geométrica de 5 metros para 7 metros, pois passa a receber luz solar direta. Nele, os valores de sDA300 dobram na fachada Norte, que eleva de 20% para 40% e na fachada Sul, de 16% para 29%. A partir da metade do edifício para baixo, que continua sem receber luz solar direta, os valores de sDA300 são similares entre os ambientes internos, independentemente da orientação solar. Nessa região do poço, o aumento da dimensão geométrica de 5 metros para 7 metros resulta em um aumento considerável do sDA300, que chega a dobrar, mas o máximo alcançado é insuficiente para uma iluminação natural adequada, segundo a IES LM-83 (2012). Os valores de sDA300 não ultrapassam 19% no terceiro pavimento e 7% no primeiro pavimento.

Figura 4. Valores de sDA em diferentes dimensões geométricas, PAF 20% e refletância 0,50

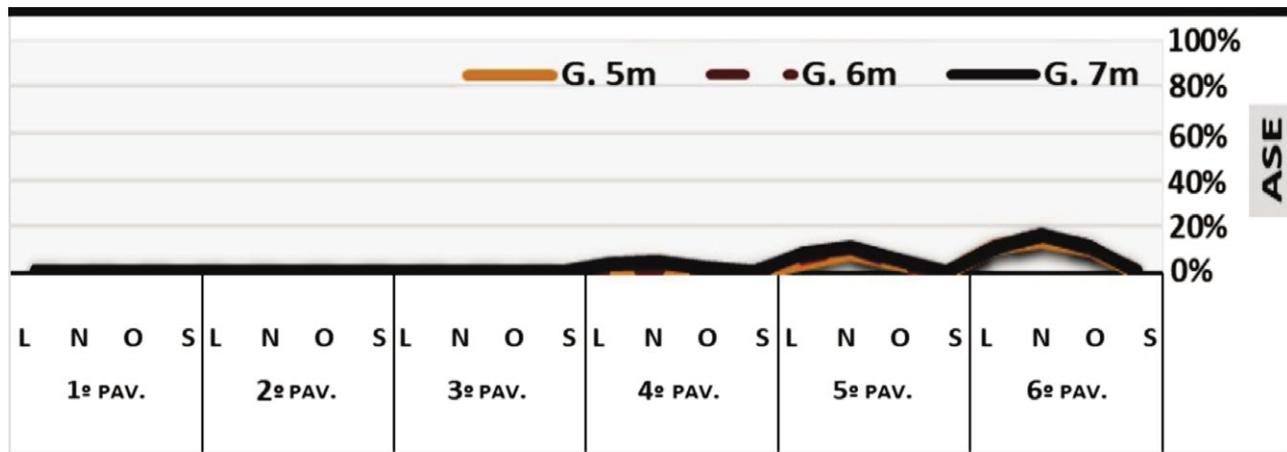


Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC.

Por meio da análise dos resultados de ASE (Figura 5), percebe-se que as salas do sexto e do quinto pavimentos recebem luz solar direta excessiva, pois os raios solares alcançam uma profundidade maior dentro dessas salas. Nas fachadas Leste, Oeste e Norte, os valores de ASE ultrapassam os 10% recomendados pela IES LM-83-12, o que pode acarretar desconforto visual. Como a fachada Sul não recebe luz solar direta na maior parte do ano, em todos os pavimentos, o ASE nas salas com abertura voltada ao Sul permanece em 0%. No quinto pavimento, a luz solar direta só é excessiva na sala com

abertura voltada ao Norte, com ASE em 11%. No terceiro piso, até o térreo, devido à ausência de luz solar direta, o valor do ASE é 0% em todas as salas. Apesar de a luz direta do sol ser excessiva no sexto pavimento, o aumento da dimensão geométrica de 5 metros para 7 metros resulta em um pequeno aumento dessa luz somente na abertura ao Norte. No quinto e quarto pavimentos, na maior parte das salas, os valores de ASE não ultrapassam 10%, portanto a luz solar direta nesses ambientes não é elevada a um nível acima do recomendado pela IES LM-83-12, minimizando o risco de desconforto visual.

Figura 5. Valores de ASE em diferentes dimensões geométricas (G), PAF 20% e refletância 0,50



Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC.

Iluminação natural sob comparação de diferentes refletâncias das paredes do poço de luz

A Figura 6 apresenta os valores de sDA300 e ASE nas salas a partir da variação da refletância

das paredes do poço de luz, fixando o PAF em 20% e dimensão geométrica em 5 metros. É possível notar que os ganhos de SDA300 são mais evidentes nas salas que não recebem luz solar direta. Ao aumentar a refletância de 0,50 para 0,80 na parede do poço, a fachada Sul

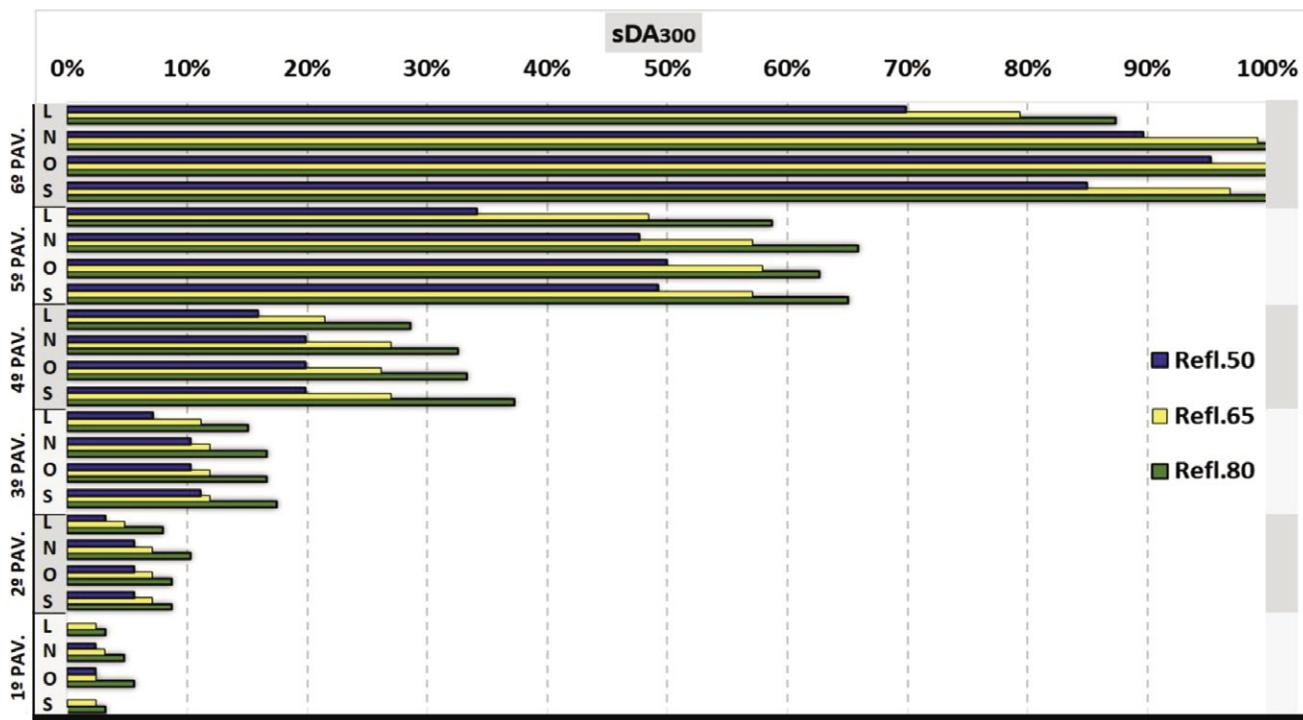
no quinto pavimento apresenta uma variação de iluminação superior à variação na fachada Norte; o sDA300 foi de 34% para 59% na sala Sul e de 50% para 63% na sala Norte, aproximando o valor final de sDA300 das duas salas. A distribuição dos raios luminosos se torna mais uniforme quando mais luz solar direta é refletida entre as fachadas. Se a parede da fachada Norte, que recebe luz direta do Sol, reflete 80% dessa luz para a fachada Sul, as salas com abertura ao Sul terão iluminação semelhante às salas com abertura ao Norte. Esse fato não é observado na metade inferior do poço de luz, pois a luz solar direta não alcança essa região. No terceiro pavimento, os valores variam de 10% para 17% na sala com abertura voltada para o Leste, de 11% para 17%, para o Norte e o Oeste, e de 7% para 15%, para o Sul.

Assim, percebe-se que o aumento da refletância das superfícies pode beneficiar a qualidade da iluminação natural ao permitir que menos raios luminosos sejam absorvidos pelas

paredes do poço de luz. Contudo, é preciso considerar que os benefícios em utilizar superfícies altamente reflexivas são minimizados quando há reduzida disponibilidade de luz solar direta. Isso se verifica no primeiro pavimento. O aumento da refletância de 0,50 para 0,80 elevou apenas em 3% o sDA300, que atingiu o valor máximo de 6% dentro das salas.

Variando a refletância do poço de luz de 0,50 para 0,65, existe um ganho evidente de sDA300 na metade superior do poço, mas esse ganho é pequeno na metade inferior do poço, pois a disponibilidade de luz natural é menor. Contudo, o oposto ocorre ao aumentar a refletância do poço de 0,65 para 0,80. Nesse caso, na metade inferior do poço, o ganho de sDA300 se torna evidente. No contexto do estudo realizado, isso demonstra que, nas regiões do poço com baixa oferta de luz natural, é necessária uma refletância igual ou superior à 0,80 para promover uma melhoria na iluminação natural dentro das salas.

Figura 6. Valores de sDA em diferentes refletâncias. PAF 20% e dimensão geométrica 5 m

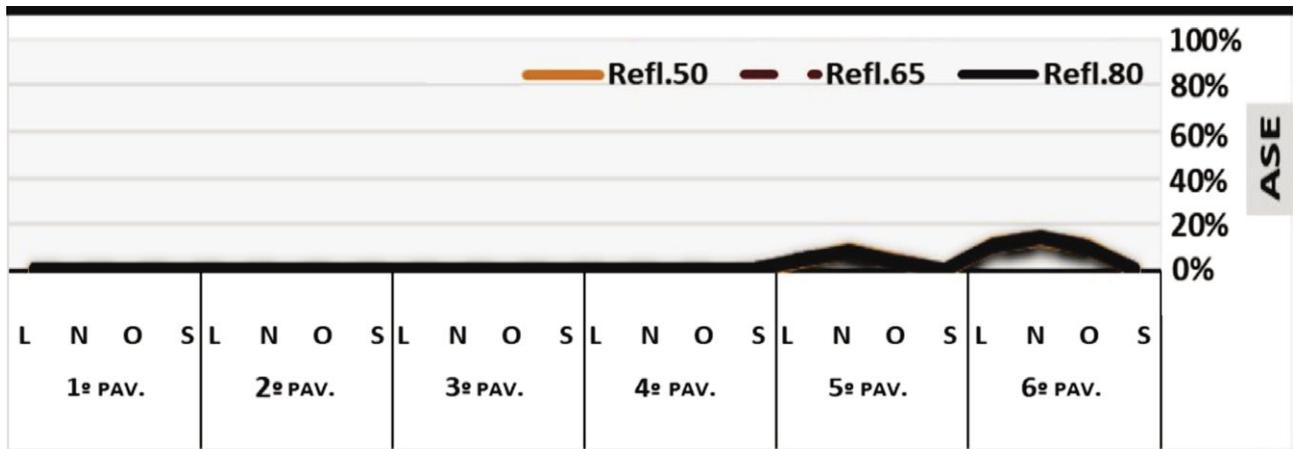


Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC.

Ao comparar os valores de ASE sob diferentes refletâncias do poço de luz (Figura 7), é possível perceber uma linha única, com valores coincidentes. Isso indica que aumentar a refletância do poço não resulta em variação de ASE. Os valores permanecem abaixo de 14% no sexto pavimento e abaixo de 9% no quinto pavimento. O ASE permanece em 0% nas salas com abertura ao Sul e em todas as salas do quarto pavimento até

o térreo. Dessa forma, o uso de superfícies altamente reflexivas no poço de luz não eleva os níveis de luz direta do Sol dentro das salas. No entanto, apenas o sexto pavimento atingiu valores ideais de sDA (>75%), o que demonstra que é preciso combinar outras soluções, juntamente com o uso de superfícies altamente reflexivas, para melhorar os níveis de iluminação em um edifício de seis pavimentos na latitude considerada.

Figura 7. Valores de ASE em diferentes refletâncias. PAF 20% e dimensão geométrica 5 m



Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC

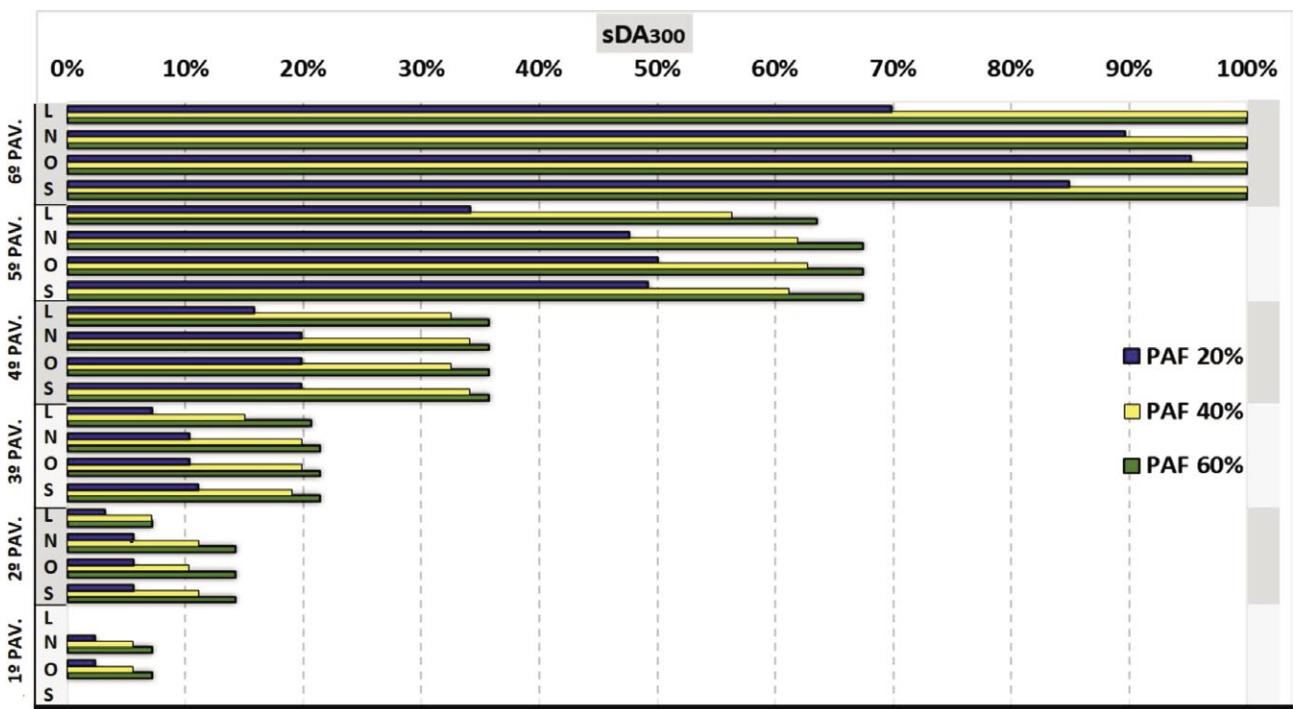
Iluminação natural sob comparação de diferentes porcentagens de abertura da fachada

A Figura 8 apresenta os valores de sDA e a Figura 9, os de ASE nas salas a partir da variação do PAF. Nota-se que, quanto maior a abertura da janela, melhor a distribuição de luz no ambiente e mais similar é a iluminação natural entre as salas. No modelo simulado com janelas em 60% (PAF), as salas atingem valores muito semelhantes de sDA300 independentemente da orientação solar, exceto no segundo e primeiro pavimentos. No sexto pavimento, o sDA300 é de 100%; no quarto pavimento, é de 36% e, no terceiro pavimento, 21%. No segundo e primeiro pavimentos, ocorre

pouca ou nenhuma variação de iluminância nas fachadas Sul e Leste, pois a disponibilidade de luz é pequena nessa região do poço. Já nas fachadas Norte e Oeste, o discreto aumento de iluminação ocorre devido aos breves momentos em que uma pequena quantidade de luz natural alcança a sala nos períodos do ano de posição mais alta na trajetória aparente do Sol.

No modelo com janelas com PAF igual a 20%, os valores reduzem significativamente, sobretudo nas salas com abertura ao Sul. No sexto pavimento, a sala Sul atinge 70% de sDA300 e a sala Norte 95%; no quarto pavimento, esses valores são de 16% e 20%, e no terceiro pavimento, de 7% e 10%, respectivamente.

Figura 8. Valores de sDA em diferentes PAFs. Refletância 0,5 e dimensão geométrica 5 m



Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC

É preciso considerar que o aumento do vão da janela diminui a área de parede que conduz

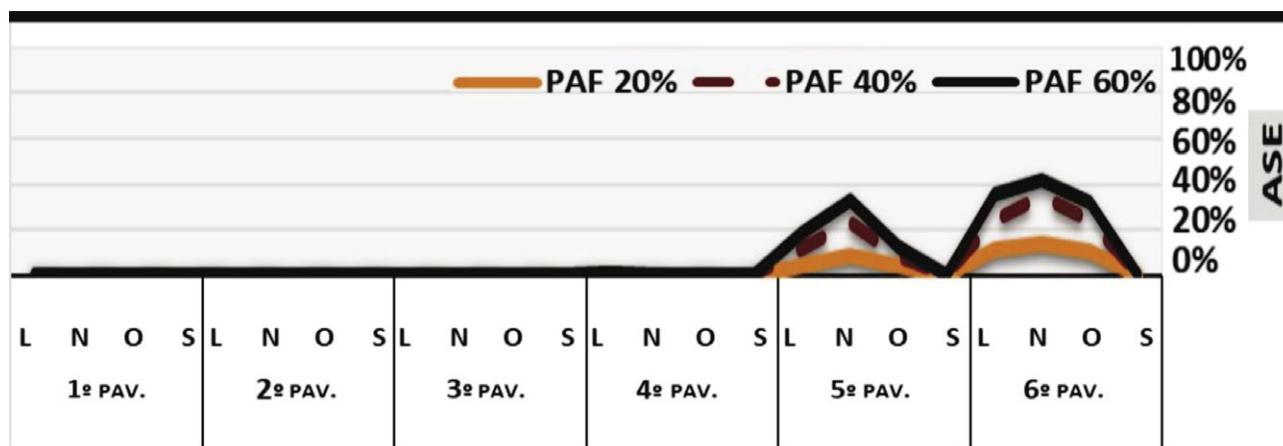
a luz pelo poço através da reflexão. Nota-se que, entre as proporções 40% e 60%, a sala com

abertura ao Sul obtém um aumento do sDA300 de no máximo 7% no quinto pavimento, 3% no quarto pavimento e 0% no segundo pavimento. Entre a proporção de 20% e 40%, os ganhos do sDA300 na sala Sul são mais evidentes, com um aumento de 22% no quinto pavimento, 17% no quarto pavimento e 4% no segundo pavimento. Assim, verifica-se que uma proporção de PAF acima de 40% não promove uma melhoria da iluminação natural mais relevante dentro do poço de luz, podendo, além disso, gerar um excesso de luz solar direta dentro do ambiente.

Com relação aos valores de ASE (Figura 9), aumentar a proporção da janela é uma solução viável na região mais profunda do poço, mas prejudicial no topo do edifício, exceto na

fachada Sul. Nas salas em que há incidência de luz solar direta, os valores de ASE quadruplicam, elevando de 14% para 42% no sexto pavimento e de 9% para 33% no quinto pavimento nas salas voltadas ao Norte. Isso pode prejudicar o conforto visual nesses ambientes. Contudo, não foi observado um aumento da luz excessiva na sala Sul, que permanece em 0%, nem abaixo do quinto pavimento, onde a luz direta do Sol não alcança o ambiente interno. Assim, reduzir a abertura do vão da janela nas paredes que recebem luz direta do Sol pode contribuir para a redução do desconforto visual, além de melhorar a distribuição de luz dentro do poço, pois aumenta a superfície de reflexão da luz, melhorando a condução da iluminação natural.

Figura 9. Valores de ASE em diferentes PAFs. Refletância 0,5 e dimensão geométrica 5 m



Fonte: elaborado pelos autores, 2022 CC BY-NC.

DISCUSSÃO

A disponibilidade de iluminação natural está diretamente relacionada com a dimensão geométrica do poço (Freewan et al., 2014). Se a dimensão geométrica considerada permite a entrada de luz solar direta na porção mais profunda do poço, ocorre uma melhoria na iluminação natural, pois diminui o número de vezes que a luz é absorvida a cada reflexão. Esse fato também foi observado em outras localidades com diferentes alturas do poço de luz (Bugeat et al., 2020; Goharian et al., 2022). Assim, o aumento da dimensão geométrica de 5 metros para 7 metros beneficia as salas que inicialmente não recebem luz solar direta. No entanto, na configuração de edifício simulado, uma dimensão geométrica de 7 metros não é suficiente para levar luz solar direta além do quarto pavimento. Dessa forma, mesmo com os ganhos de sDA300, o térreo continuou com uma baixa iluminação natural. Segundo Bugeat et al. (2020), isso pode ser explicado devido à posição do Sol durante sua trajetória aparente no céu. Em latitudes medianas, como é o caso de São Paulo, com uma trajetória aparente do Sol mais baixa que regiões equatorianas, os raios solares entram no poço de luz em uma posição mais horizontal, o que dificulta o seu

acesso até a porção mais profunda. Portanto, somente o aumento da dimensão geométrica não garante uma boa condição de iluminação em todo o poço, conforme observado por Kristl & Krainer (1999).

Mangkut et al. (2016) constata que a refletância entre 0,7 e 0,8 produz um efeito de distribuição mais uniforme da luz no ambiente. Dessa forma, a variação da refletância de 0,5 para 0,8 produz resultados positivos na iluminação de todas as salas do modelo estudado com PAF fixado em 20% e dimensão geométrica em 5 metros. Apesar disso, a iluminação natural é reduzida à medida que o poço aprofunda, devido à ausência da luz solar direta que contribui com os raios luminosos refletidos pelas superfícies. Ainda assim, o aumento da refletância é viável, pois não resulta em elevação do risco de desconforto visual e térmico em todo o poço de luz (Bugeat et al., 2020).

Em contrapartida, o aumento da dimensão geométrica de 5 metros para 7 metros pode resultar em valores preocupantes de exposição da luz direta do Sol nos pavimentos superiores. Contudo, esse risco diminui consideravelmente a partir do quinto pavimento, exceto na fachada

Norte. A luz solar direta não incide durante todo o dia nas demais fachadas, conforme se verifica na Figura 3, o que justifica os valores de ASE abaixo de 10% a partir do quinto pavimento, atendendo ao recomendado pela IES LM-83. Na fachada Sul, o aumento da dimensão geométrica não resulta na elevação do risco de desconforto visual e térmico dentro das salas em toda a extensão do poço, pois a exposição aos raios solares diretos é mínima e os valores de ASE permanecem em 0%. Portanto, essa é a fachada que melhor se beneficia com o aumento da dimensão geométrica. As demais fachadas requerem uma atenção maior no controle do ofuscamento devido ao aumento da iluminação natural.

CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, analisou-se, por meio de simulação paramétrica computacional, a influência da dimensão geométrica, da refletância das paredes e do PAF no desempenho da iluminação natural de um poço de luz de uma edificação com seis pavimentos. No edifício simulado, o aumento da dimensão geométrica do poço, da refletância e do PAF promoveram uma melhoria global da iluminação, principalmente na metade do poço, mas não garantiram iluminação adequada nos pavimentos inferiores.

Conforme aumenta-se a dimensão geométrica, uma maior quantidade de luz direta do Sol entra no poço e é distribuída pela reflexão das paredes até o térreo. Ao aumentar a dimensão geométrica de 5 metros para 7 metros, a luz solar direta alcança até o quarto pavimento, melhorando a qualidade da iluminação natural nessa região do poço e elevando o sDA300 na fachada Norte de 20% para 40%. A metade inferior do edifício também se beneficia, pois, quanto mais profundo é o alcance da luz solar direta, menor é a perda da iluminação no seu trajeto de reflexão pelas paredes até o térreo. Mas, apesar disso, a iluminação ainda é insuficiente e o sDA300 atinge no máximo 18% no terceiro pavimento e 7% no térreo.

Aumentar a refletância das paredes do poço de luz também promove melhorias na iluminação natural das salas. O ganho em iluminação é maior nas salas que não recebem luz solar direta. Isso acontece, pois, ao utilizar superfícies altamente reflexivas no poço, a distribuição dos raios luminosos se torna mais uniforme entre as fachadas, o que promove uma melhoria da iluminação natural dentro das salas, sem elevar o risco de desconforto visual. No entanto, esse ganho com a refletância é limitado. Na metade inferior do edifício, onde

Dentre as soluções testadas, o aumento do PAF é a que exige uma maior atenção, pois resulta na melhoria da iluminação natural acompanhada do aumento dos valores de luz solar direta em níveis muito superiores ao recomendado pela IES LM-83-12 (2012). No entanto, esse fato se verifica apenas nos pavimentos superiores. Acosta et al. (2013) avaliam que o aumento da área de reflexão no poço de luz potencializa o desempenho da iluminação natural. Assim, torna-se viável a adoção de diferentes PAFs em um mesmo poço de luz, assumindo uma menor proporção nos pavimentos superiores e aumentando o vão na região mais profunda.

não foi registrada luz solar direta, os ganhos em iluminação são minimizados e a orientação solar influencia pouco a iluminação nas salas.

O aumento do PAF é uma solução que promove o bom desempenho da iluminação natural. Nesse caso, o aumento do risco de desconforto visual no edifício é relativo e depende da região do poço de luz. No sexto e quinto pavimentos, ao aumentar o PAF de 20% para 60%, o sDA300 atinge 100%, mas os valores de ASE quadruplicam, o que significa uma elevação considerável no risco de desconforto visual dentro das salas. Porém, nas salas com abertura ao Sul e todas a partir do quarto pavimento, o ASE permanece em 0%, o que representa uma vantagem em poder aumentar a abertura da parede para a entrada de luz sem que resulte em um aumento dos níveis de luz solar direta dentro dos ambientes nessa região do poço de luz.

Recomenda-se uma variação do PAF ao longo do edifício, assumindo uma proporção menor na metade superior do edifício e maior na metade inferior do mesmo, com a finalidade de evitar o aumento do risco de desconforto visual nos primeiros pavimentos que recebem maior incidência solar direta e, ao mesmo tempo, aumentar a superfície de reflexão da luz solar que é direcionada para os pavimentos inferiores.

Em estudos futuros, torna-se necessário analisar outras latitudes e climas a fim de comparar os resultados em diferentes regiões. Além disso, é relevante considerar os ganhos térmicos decorrentes do aumento de iluminação natural dentro do poço de luz.

Por último, espera-se que este estudo possa auxiliar pesquisadores e projetistas no planejamento e desenvolvimento de diretrizes para uma arquitetura sustentável.

CONTRIBUIÇÕES E AGRADECIMENTOS

Este artigo é resultado de pesquisas realizadas no Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo núcleo de pesquisa Virts.Lab, no âmbito da linha de pesquisa “Projeto do Ambiente Construído”. Esse projeto foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (mais conhecida por Capes).

Os autores deste trabalho fizeram as seguintes contribuições: João Pedro de Melo Souza, com

a concepção do estudo, o delineamento experimental, a simulação, a análise de dados e a redação do artigo; Klaus Chaves Alberto, com a concepção do estudo, o delineamento experimental, a análise de dados e a redação do artigo; Sabrina Andrade Barbosa, com a concepção do estudo, o delineamento experimental, a análise de dados e a redação do artigo.

Os autores declaram não ter conflitos de interesse relevantes quanto à pesquisa apresentada.



REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *Edificações Habitacionais Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais* (ABNT NBR 15575-1). https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5660736/mod_folder/content/0/NBR%2015575/NBR15575-1.pdf?forcedownload=1ad=1
- Acosta, I., Navarro, J. & Sendra, J. J. (2013). Towards an analysis of the performance of lightwell skylights under overcast sky conditions. *Energy and Buildings*, 64, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.009>
- Ahadi, A. A., Saghafi, M. R. & Tahbaz, M. (2018). The optimization of light-wells with integrating daylight and stack natural ventilation systems in deep-plan residential buildings: A case study of Tehran. *Journal of Building Engineering*, 18, 220-244. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.03.016>
- Albuquerque, M. S. C & Amorim, C. N. D. (2012). Iluminação natural: indicações de profundidade-limite de ambientes para iluminação natural no regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios residenciais. *Ambiente Construído*, 12(2), 37-57. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000200004>
- Balabel, A., Alwetaishi, M., Abdelhafiz, A., Issa, U., Sharaky, I. A., Shamseldin, A. K., Al-Surf, M. & Al-Harthi, M. (2022). Potential of solatube technology as passive daylight systems for sustainable buildings in Saudi Arabia. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 339-353. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.001>
- Bellia, L., Fragliasso, F. & Stefanizzi, E. (2017). Daylit offices: A comparison between measured parameters assessing light quality and users' opinions. *Building and Environment*, 113, 92-106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.014>
- Bolssoni, G. C., Laranja, A. C. & Alvarez, C. (2018). Disponibilidade de iluminação natural em ambiente interno orientado para poço de iluminação. *Caderno PROARQ*, 31, 101-117. <https://cadernos.proarq.fau.ufrj.br/public/docs/Proarq31%20ART%2005.pdf>
- Bugeat, A., Bernoit, B. & Fernandez, E. (2020). Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. *Solar Energy*, 207, 1434-1444. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.099>
- Castro, A. P. A. S., Labaki, L. C., Caram, R. M., Basso, A. & Fernandes, M. R. (2003). Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. *Ambiente Construído*, 3(2), 69-76. <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3452/1871>
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2009). *The SLL Lighting Handbook*. The Society of Light and Lighting.
- Duffy, J. F. & Czeisler, C. A. (2009). Effect of Light on Human Circadian Physiology. *Sleep Medicine Clinics*, 4(2), 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2009.01.004>
- Farea, T. F., Ossen, D. R., Alkaff, S. & Kotani, H. (2014). CFD modeling for natural ventilation in a lightwell connected to outdoor through horizontal voids. *Energy and Buildings*, 86, 502-513. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.030>
- Freewan, A. A. Y., Gharaibeh, A. A. & Jamhwi, M. M. (2014). Improving daylight performance of light wells in residential buildings: Nourishing compact sustainable urban form. *Sustainable Cities and Society*, 13, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.001>
- Goharian, A., Daneshjoo, K. & Yeganeh, M. (2022). Standardization of methodology for optimizing the well aperture as device (reflector) for light-wells; A novel approach using Honeybee & Ladybug plugins. *Energy Reports*, 8, 3096-3114. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.176>
- Goia, F., Haase, M. & Perino, M. (2013). Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective. *Applied Energy*, 108, 515-527. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.063>
- Hee, W. J., Alghoul, M. A., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M. A., Alrubaih, M. S. & Sopian, K. (2014). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 323-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.020>

- Illuminating Engineering Society. (2012). IES LM-83-12 Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). Illuminating Engineering Society of North America.
- Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). Normais Climatológicas do Brasil, período: 1991-2020. <https://portal.inmet.gov.br/normais>
- Jakubiec, J. A. (2016, 11-13 jul.). *Building a database of opaque materials for lighting simulation*. [Conference session]. 36th International Conference on Passive and Low Energy, Los Angeles, CA, Estados Unidos. <https://www.researchgate.net/publication/305703082>
- Joudi, A., Svedung, H., Cehlin, M. & Ronnelid, M. (2013). Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance, *Applied Energy*, 103, 562-570. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.019>
- Júnior, A. de S. (2009). *Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais*. [dissertação de mestrado]. Universidade Federal de Lavras. <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3076?mode=full>
- Knoop, M., Stefani, O., Bueno, B., Matusiak, B., Hobday, R., Wirz-Justice, A., Martiny, K., Kantermann, T., Aarts, M. P. J. & Zemmouri, N. (2020). Daylight: What makes the difference? *Lighting Research & Technology*, 52(3), 423-442. <https://doi.org/10.1177/1477153519869758>
- Koepfen, W. (1948). Las zonas de clima. Em: W. Koepfen (Ed.), *Climatología: Con un estudio de los climas de la Tierra* (pp. 145-227). Fondo de Cultura Económica.
- Kristl, Z. & Krainer, A. (1999). Light wells in residential building as a complementary daylight source. *Solar Energy*, 65(3), 197-206. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00127-3)
- Lei 16.642/2017. Lei que aprova o código de obras e edificações do município de São Paulo; introduz alterações nas Leis 15.150, de 6 de maio de 2010, e 15.764, de 27 de maio de 2013. (9 de maio de 2017). <http://documentacao.saopaulo.sp.leg.br/iah/fulltext/leis/L16642.pdf>
- Le-Thanh, L., Le-Duc, T., Ngo-Minh, H., Nguyen, Q. H. & Nhuyen-Xuan, H. (2021). Optimal design of an Origami-inspired kinetic façade by balancing composite motion optimization for improving daylight performance and energy efficiency. *Energy*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119557>
- Martins, L. de O. (2011). O poço de luz como estratégia de iluminação natural na cidade de maceió-AL. [dissertação de mestrado]. Universidade Federal do Alagoas. <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/722>
- Mangkuto, R. A., Rohmah, M. & Asri, A. D. (2016). Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. *Applied Energy*, 164, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.046>
- Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N. & Christoffersen, J. (2012, 10-11 set.). *Daylighting Metrics: Is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability*. [Conference Paper]. First Building Simulation and Optimization Conference, Loughborough, Reino Unido. <https://www.researchgate.net/publication/267556994>
- Moura, L. M., Martins, F. R. & Assireu, A. T. (2016). Variabilidade da cobertura de nuvens na cidade de São Paulo. *Ambient. Água*, 11(4), 903-914. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1845>
- Santana, K. V. S., Oliver, S. L., Mendes, M. M., Lanham-New, S., Charlton, K. & Ribeiro, H. (2022). Association between vitamin D status and lifestyle factors in Brazilian women: Implications of sun exposure levels, diet, and health. *eClinical Medicine*, 47, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2022.101400>
- Solemnia inc. (2022). DIVA users: Try ClimateStudio today! ClimateStudio is the Successor to DIVA-for-Rhino. <https://www.solemnia.com/blog/diva-users-start-climatestudio-today>
- Sudan, M., Mistrick, R. G. & Tiwari, G. N. (2017). Climate-Based Daylight Modeling (CBDM) for an atrium: An experimentally validated novel daylight performance. *Solar Energy*, 158, 559-571. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.067>

- Sun, Y., Liu, X., Qu, W., Cao, G. & Zou, N. (2020). Analysis of daylight glare and optimal lighting design for comfortable office lighting. *Optik*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164291>
- Xue, P., Mark, C. M. & Cheung, H. D. (2014). The effects of daylighting and human behavior on luminous comfort in residential buildings: A questionnaire survey. *Building and Environment*, 81, 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.011>
- Wiehe, A., O'Brien, J. M. & Senge, M. O. (2019). Trends and targets in antiviral phototherapy. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 18(11), 2565-2612. <https://doi.org/10.1039/C9PP00211A>
- Wirz-Justice, A., Skene, D. J. & Munch, M. (2020). The relevance of daylight for humans. *Biochemical Pharmacology*, 191, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.114304>
- Wong, I. L. (2017). A review of daylighting design and implementation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 959-968. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.061>
- Wu, P., Zhou, J. & Li, N. (2021). Influences of atrium geometry on the lighting and thermal environments in summer: CFD simulation based on-site measurements for validation. *Building and Environment*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107853>
- Zhen, M., Du, Y., Honh, F. & Bian, G. (2019). Simulation analysis of natural lighting of residential buildings in Xi'an, China. *Science of the Total Environment*, 690, 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.353>