



ORIGINAL
ORIGINAL

Editor

Jonathas Magalhães e Renata Baesso

Apoio/Support

Universidade Federal de Juiz de Fora e
Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflito de interesses

Não há conflito de interesses.

Recebido

21 dez. 2021

Versão Final

20 set. 2023

Aprovado

25 set. 2023

Desempenho da iluminação natural em poços de luz de edifícios residenciais

Daylighting performance in light wells of residential buildings

Aline Gouvêa Leite¹ , João Pedro de Melo Souza¹ , Sabrina Andrade Barbosa² , Klaus Chaves Alberto¹ 

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído. Juiz de Fora, MG, Brasil. Correspondência para/Correspondence to: A. Leite. E-mail: alinegouvealeite@gmail.com

² Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Escola Superior de Desenho Industrial, Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Petrópolis, RJ, Brasil.

Como citar este artigo/How to cite this article: Leite, A. G. et al. Desempenho da iluminação natural em poços de luz de edifícios residenciais. *Oculum Ensaios*, v. 21, e245560, 2024. <https://doi.org/10.24220/2318-0919v21e2024a5560>

Resumo

O poço de luz é uma solução arquitetônica utilizada quando não há possibilidade de iluminar, naturalmente, um ambiente pelas faces externas da edificação. Diferentes cidades brasileiras permitem seu uso a partir de uma fórmula para o cálculo de sua geometria. Este trabalho tem como objetivo identificar se as dimensões mínimas, determinadas pela legislação urbana de Juiz de Fora (Minas Gerais) para o poço de luz, são suficientes para garantir a adequada iluminação natural nos ambientes por ele servido. Para isso, foram realizadas simulações computacionais de poços de luz de edificações de 2, 4, 6 e 8 pavimentos, por meio dos programas Grasshopper e ClimateStudio, plug-ins do software Rhinoceros. A métrica de avaliação da iluminação utilizada foi o *Daylight Autonomy*, que considera a média da porcentagem das horas de ocupação, ao longo do ano, em que os sensores registraram iluminância igual ou maior a 150 lux. Os resultados indicaram que as áreas mínimas atuais indicadas para o poço de luz na legislação não permitem que os ambientes tenham níveis adequados de iluminância. Percebeu-se, ainda, que os pavimentos superiores são beneficiados com o aumento do diâmetro do poço, porém, a ampliação do diâmetro não é suficiente para compensar a perda de luz, devido ao aumento da profundidade do poço. Resultados em diferentes horários nos solstícios e a distribuição da iluminação nos ambientes são discutidas. O trabalho indica, de forma clara, a necessidade de um reestudo da legislação urbana da cidade.

Palavras-chave: Edificação residencial. Legislação urbana. Simulação computacional.

Abstract

The light well is an architectural solution used when there is no possibility of lightening naturally an internal environment from the external sides of the building. Different Brazilian cities allow its use based on a formula to calculate its geometry. This work aims to identify whether the minimum dimensions determined by the urban legislation of Juiz de Fora (Minas Gerais) for the light well are sufficient to guarantee adequate natural lighting in the internal environments connected to it. To this end, computer simulations of light wells in buildings models with 2, 4, 6 and 8 floors were carried out, using the Grasshopper and ClimateStudio programs, plug-ins of the Rhinoceros

software. The lighting assessment metric used was Daylight Autonomy, which considers the mean percentage of occupancy hours throughout the year in which the sensors recorded illuminance equal to or greater than 150 lux. The results indicated that the current minimum areas indicated for satisfactory light in legislation do not allow environments to have adequate levels of illuminance. It can also be seen that the upper floors benefit from the increase in the diameter of the well; however, the increase in diameter is not enough to compensate for the loss of light due to the increase in the depth of the well. Results at different times of the solstices and the distribution of lighting in the environments are discussed. The study clearly indicates the need for a re-study of the city's urban legislation.

Keywords: Residential building. Urban legislation. Computational Simulation.

Introdução

Entre os desafios para o futuro do desenvolvimento sustentável no planeta, está a construção de edifícios que utilizem menos recursos para fornecer condições funcionais, saudáveis e confortáveis aos seus usuários. Nesse sentido, um importante fator que deve ser considerado no projeto de edificações é a adequada iluminação natural que, juntamente com o controle do brilho e de ganhos excessivos de radiação solar, oferece não só benefícios para a saúde e o bem-estar, mas tem também um potencial significativo de economia de energia (Chartered Institution of Building Services Engineers, 2020). Como consequência, a influência de diferentes estratégias de projeto, como tipos de vidros e aberturas, na iluminação natural que atinge o interior das edificações, tem sido amplamente investigada (Yu; Wennersten; Leng, 2020).

Em 1997, o Programa Nacional de Energia Elétrica (PROCEL), em parceria com o Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM), desenvolveu um Modelo para Elaboração de Código de Obras e Edificações, com o objetivo de garantir a eficiência energética nas edificações. O documento, atualizado em 2012, indica avaliar a “[...] necessidade de previsão e correta localização de prismas de ventilação e iluminação”, como fator condicionante para o conforto luminoso (Bahia; Guedes, 2012, p. 113), como uma estratégia de projeto arquitetônico para promover o conforto ambiental. Nesse sentido, o poço de luz tem sido um artifício amplamente utilizado e consiste em um “[...] espaço luminoso interno que conduz a luz natural para porções internas da edificação” (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005, p. 4). Essa é uma solução utilizada quando não há possibilidade de iluminação natural em um ambiente pelas faces externas da edificação ou quando a iluminação é promovida por uma área central atendendo a vários blocos. No Brasil, esse recurso tem sido permitido por legislações em diferentes cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte (Bolssoni; Laranja; Alvarez, 2018). Em cada caso, as dimensões da geometria do poço seguem fórmulas matemáticas que consideram sua altura e largura e distância à rua, por exemplo.

Em Juiz de Fora (MG) – latitude: 21° 45’ 51” S; longitude: 43° 20’ 59” O –, cidade de aproximadamente 541 mil habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022), o Código de Obras elaborado em 1986, atualizado em 2019 (Juiz de Fora, 2019, *online*), define as seguintes condições para o projeto do poço de luz:

I – o afastamento de qualquer vão à face da parede ou da divisa que lhe fique oposta deve permitir a inscrição de um círculo com diâmetro mínimo de 2,00m (dois metros); II – possibilitar, acima do segundo pavimento servido pela área, ao nível de cada piso, a inscrição de um círculo cujo diâmetro mínimo seja dado pela fórmula $D = 2,00 + h/b$, na qual ‘h’ representa a distância do piso considerado ao piso do 2º (segundo) pavimento servido pela área e ‘b’ corresponde a uma constante explicitada em cada caso.

Dessa forma, a área do poço é alterada de acordo com o número de faces fechadas, a altura do edifício e a tipologia e o uso da edificação, tendo ampla aplicação na cidade. Contudo, considerando que esse tipo de solução resulta em um céu mais obstruído e, por consequência, uma maior dificuldade de acesso à luz natural, torna-se necessário verificar se as dimensões determinadas na legislação são suficientes para permitir um nível adequado de iluminação nos ambientes internos das edificações. Assim, este trabalho tem como objetivo identificar se as dimensões mínimas, determinadas pela legislação urbana de Juiz de Fora (MG) para o poço de luz, são suficientes para garantir a adequada iluminação natural nos ambientes por ele servido.

A partir do levantamento e da análise de normativas e estudos que avaliaram a iluminação sob os aspectos de conforto visual e eficiência energética, Moraes, Alcojor e Bittencourt (2018) concluíram que, no Brasil, normas e orientações evoluíram expressivamente para tipologias não residenciais. Como consequência, os autores indicam a necessidade de desenvolvimento de diretrizes para a iluminação de edificações residenciais. Assim, de forma a suprir a carência de estudos nessa tipologia, este trabalho trata da análise de uma edificação multifamiliar residencial. Embora este estudo aborde as dimensões determinadas pela legislação local, os resultados obtidos podem ser úteis a cidades em latitudes próximas.

Fundamentação teórica

Os poços de luz possuem características particulares para cada caso e local, mas, muitas vezes, é adotado um modelo genérico normalmente sugerido pelos Códigos de Obras. O Quadro 1 mostra as diretrizes definidas para as capitais dos estados da Região Sudeste e para a cidade de Juiz de Fora (objeto deste estudo). Como é possível observar, as legislações possuem uma determinação

Quadro 1 – Dimensões mínimas exigidas de códigos de obra brasileiros para poços de luz para ambientes de permanência prolongada.

Cidade	Dimensionamento	Legenda
Belo Horizonte	$D \geq 1,5m + (H - 5,30m) / 4$	D = Diâmetro L = Largura do Poço P = Profundidade do Poço H = distância em metros entre a laje de cobertura do pavimento considerado e o piso do primeiro pavimento iluminado através do poço
São Paulo	$A = 4 + 0,40 (H2-9)$, $A \geq 4,0m^2$ Relação Mínima entre os lados do poço = $2/3$ $L e P \geq 1,5m + (H1 - 5,30m) / 10$	A = Área do Poço H2 = Distância da laje do piso do compartimento a iluminar até a laje de piso do último pavimento L = Largura do Poço P = Profundidade do Poço H1 = Altura total do Poço
Rio de Janeiro	Prisma de iluminação: $L e P \geq 1/4H1$ $L e P \geq 3,00m$ Reentrâncias: • Quando servirem a compartimentos cujas aberturas se situem perpendiculares ao plano da fachada, devem ser calculadas como prisma de iluminação. • Quando servirem a compartimentos cujas aberturas se situem paralelamente ao plano da fachada: $L e P \geq 1,50m$	L = Largura do Poço P = Profundidade do Poço H1 = Altura total do Poço
Vitória	Área Principal, quando for fechada: $D \geq 2,0m + H2 / 6$ Permanência Principal, quando for aberta ($DR \geq 1,0m$): $D \geq 1,5m + H2/6$	D = Diâmetro do Poço H2 = Distância da laje do piso do compartimento a iluminar até a laje de piso do último pavimento DR = distância à rua
Juiz de Fora	$D = 2,00 + h/b$ Nesse caso, $b = 4$. Diâmetro mínimo = 1,50 m	D = Diâmetro do Poço h = representa a distância do piso considerado ao piso do 2º pavimento servido pela área b = Constante que varia de acordo com o uso

Fonte: Elaborado pelos autores (ano), com base em Bolsson, Laranja e Alvarez (2018).

geral que considera apenas a geometria do poço (dimensões da abertura e profundidade). Contudo, outros fatores, como refletividade das paredes do poço, dimensões do ambiente interno e até mesmo o espaçamento entre poços, são também importantes na iluminância resultante (Acosta; Navarro; Sendra, 2013). Além disso, outras especificações de projeto, como área da janela, acabamentos, orientação solar e localização geográfica, são fundamentais para determinar o bom desempenho do poço de luz (Ahmed; Nassar; Asr, 2014).

Bolssoni, Laranja e Alvarez (2018) avaliaram, por meio de simulação computacional, o desempenho luminoso de ambientes de permanência prolongada voltadas para o poço de luz em um edifício de seis pavimentos, dimensionado de acordo com a legislação de Vitória (ES) – Lat. 20.3° S, Longit. 40.3° O. Eles verificaram que, para a orientação norte, a porcentagem de horas em que a iluminância no plano de trabalho atingiu níveis aceitáveis (entre 500 e 2000 lux), chegou ao máximo de 47,5% do tempo, no mês de outubro. Os autores concluíram que a variação da iluminância não se deu de forma proporcional à variação do diâmetro do poço. Além disso, os autores defendem que, como cada orientação possui características particulares, não é possível adotar um modelo de “área principal” genérico independente da orientação, como sugerem os códigos de obras.

Alguns estudos avaliaram o desempenho de diferentes configurações geométricas dos poços de luz, conforme descrito a seguir. Em uma análise que utilizou simulações computacionais, Freewan, Gharaibeh e Jamhawi (2014) testaram, entre outros fatores, a influência da altura (2, 3 e 4 pavimentos) e área de seção quadrada transversal (1, 2 e 3m) de um poço de luz na iluminação natural de um edifício de quatro pavimentos, na Jordânia (lat. 31.9° N, longit. 35.9° L). Eles identificaram que poços com área de seção 1m ou 2m não forneceram aos espaços inferiores níveis de iluminância necessários; o poço deve atingir 3m para proporcionar níveis de iluminância adequados ao longo do ano. Em relação à altura do poço, o estudo mostrou que essa dimensão tem um efeito direto no desempenho da iluminação natural. Considerando um poço com área de seção transversal quadrada de 3m, os resultados indicaram uma iluminância variando de mais de pouco mais de 500 lux a 2000 lux a 1,75m da janela para edifícios de 4 e 2 pavimentos, respectivamente em junho.

Ahadi, Saghafi e Tahbaz (2018) também avaliaram a geometria de poço de luz, de forma a determinar a altura ideal para diferentes áreas de seção. Os casos, simulados nas condições climáticas do Teerã (Lat. 35.7° N, Longit. 51.3° L), indicaram que para áreas de 1m e 2m, a altura máxima dos edifícios deve ser de um e dois pavimentos, respectivamente; e para um edifício de quatro pavimentos, a área do poço de luz necessária para que a iluminação seja considerada adequada é de 4m x 4m. Em relação aos casos de seção retangulares, os resultados indicaram que os ambientes têm melhor desempenho luminoso quando suas janelas são voltadas para o comprimento do poço de luz.

Ahadi, Saghafi e Tahbaz (2017) compararam, entre outros casos, modelos de edifícios com 7 pavimentos e poços de luz com formatos quadrado e cilíndricos no Teerã (Lat. 35.7° N, Longit. 51.3° E) e os resultados mostraram que, com a mesma área de poço, os cilíndricos têm melhor desempenho de iluminação natural. Para ambientes no pavimento superior orientados a norte, os valores de DA300 subiram de 76% para 84% para os casos de poço quadrado e cilíndrico, respectivamente.

Em um estudo com edificações reais em Penang, Malásia (Lat. 5.2° N, Longit. 100.4° L), e com altura variando de 12 a 31 pavimentos, Fadzil e Al-Absi (2016) avaliaram casos com poços de luz com área que variaram de 8m² a 84,5m². Eles identificaram um padrão nos valores de fator de luz diurna (proporção entre o nível de luz no centro do poço em relação ao nível de luz no exterior) dos casos analisados: alta iluminação nos 3 pavimentos superiores (até 44%); muita luz para os próximos 4 a

5 andares (cerca de 0,1%), enquanto abaixo dessas, a distribuição de luz foi considerada bastante baixa, exigindo iluminação artificial.

A geometria é um dos fatores mais importantes no desempenho do poço de luz, mas no intuito de melhorar o desempenho da iluminação nessa tipologia, alguns estudos têm analisado outras alternativas arquitetônicas, além da geometria, para melhorar o desempenho luminoso de ambientes internos. Como exemplo, Goharian, Daneshjoo e Yeganeh (2022) testaram diferentes inclinações das paredes do poço e indicaram que, para esse tipo de modelo, é importante considerar a inclinação solar local. Bugeat, Beckers e Fernández (2020) testaram a alteração das propriedades ópticas das superfícies do poço e a instalação de espelhos para redirecionar os raios solares. Os resultados indicaram que, variações de 10% na refletância das paredes, podem produzir diferenças na iluminação anual média de até duas vezes nos pavimentos térreos. O estudo indicou ainda que alternar paredes escuras por brancas difusas aumenta em 5 vezes o nível médio de iluminância dos ambientes internos. Em relação aos espelhos redirecionadores implementados, durante o período de inverno, a adição do dispositivo aumenta consideravelmente a quantidade de luz nas áreas inferiores do edifício, resultando em uma mudança de 40 min a 3 h 30 min por dia do ambiente com uma iluminância superior a 100 lux.

Dessas referências apresentadas, percebe-se que há ainda poucos estudos que avaliaram o desempenho do poço de luz a partir dos critérios das legislações locais, especialmente no Brasil. Os resultados indicam que a variação da iluminância nem sempre acompanha a variação de suas dimensões. A orientação solar também é um fator que pode afetar seu desempenho. É possível perceber que poços estreitos de seção quadrada, com 1m ou 2m de largura, são indicados apenas para edificações baixas, de um ou dois pavimentos; e para edificações mais altas poços mais largos devem ser considerados. O uso do formato cilíndrico, embora pareça promissor para melhorar a iluminação natural nos ambientes servidos pelo poço, pode ser um complicador no projeto arquitetônico. Além disso, embora o uso de estratégias mais sofisticadas, como implementação de dispositivos redirecionadores de luz ou superfícies altamente refletoras, possam contribuir na qualidade luminosa dessa tipologia, não devem ser mandatórias para um desempenho satisfatório. A legislação deve prever casos simples, considerando paredes com refletâncias usuais e preferencialmente a orientação mais desfavorável.

Em relação às métricas usadas para prever o desempenho luminoso de ambientes, o nível de iluminância, como usado por Freewan, Gharaibeh e Jamhawi (2014), e o fator de luz diurna (relação entre a iluminância interna e a iluminância externa), usada por Fadzil e Al-Absi (2016), são as métricas estáticas mais comuns usadas para testar projetos de iluminação natural. Mais recentemente, uma das métricas dinâmicas criadas que considera a quantidade e o caráter das variações diárias e sazonais da luz natural para um determinado local é a *Daylight Autonomy* (DA). Ela é entendida como a porcentagem dos períodos ocupados do ano, quando o requisito mínimo de iluminância no sensor é atendido apenas pela luz do dia. De acordo com Reinhart, Mardaljevic e Rogers (2013), o poder preditivo das métricas dinâmicas como o DA para comparações de projetos é maior do que as métricas estáticas, como o fator de luz diurna.

Procedimentos Metodológicos

Para este estudo, foram utilizadas simulações computacionais, por meio dos programas Grasshopper (versão 1.0.0007), um *plug-in* do software Rhinoceros, usado para modelagem paramétrica, e o ClimateStudio (versão 1.2.7796.19900). Lançado em 2020, pela Solemma (Inc.),

o ClimateStudio é um *plug-in* do Rhinoceros, que substituiu o *plug-in* DIVA, mantendo o mesmo mecanismo de análise, porém, com melhorias que o tornam igualmente preciso, mas mais rápido que seu antecessor. No Grasshopper, foram modeladas edificações de 2, 4, 6 e 8 pavimentos, com poços de iluminação seguindo as medidas determinadas pela legislação de Juiz de Fora. A cidade tem uma temperatura média de 19°C e médias mensais de radiação global que variam de 120 a 210 Wh/m². As seções a seguir apresentam os modelos testados, os parâmetros utilizados para as simulações e a forma de análise dos dados.

Caracterização dos modelos avaliados

A geometria dos poços de iluminação dos casos desenvolvidos foi determinada a partir da equação definida pela legislação apresentada no Quadro 1. O pé direito da edificação foi considerado como 2,70m – medida geralmente adotada nas construtoras da cidade com lajes de 15cm de espessura. A Tabela 1 apresenta as dimensões definidas para os poços de iluminação para cada modelo simulado³. Em todos os casos foi considerado o uso residencial.

Tabela 1 – Diâmetro dos poços de iluminação de acordo com as alturas das edificações.

Pavimentos	H (metros) – distância de piso a piso	Dimensões mínimas (metros)	Área do poço de luz
2	2,85	2,71 x 2,71	7,34m ²
4	8,55	4,13 x 4,13	17,05m ²
6	14,25	5,56 x 5,56	30,91m ²
8	19,95	6,98 x 6,98	48,72m ²

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

O ambiente definido para as simulações consiste em uma sala de estar (ambiente de uso prolongado), medindo 2,0 x 4,5m, totalizando 9m², respeitando assim tanto a área mínima, quanto a largura mínima exigida pela legislação local (Figura 1). O ambiente possui uma abertura de 1,50 x 1,00m – 1/6 da área do ambiente –, conforme mínimo estabelecido pelo Código de Obras, elaborado em 1986 e atualizado em 2019 (Juiz de Fora, 2019), e vidro com transmitância igual a 87,7%. A abertura foi centralizada na parede que se abre para o poço de luz com peitoril de 80cm. A Figura 1 mostra, ainda, a composição dos ambientes simulados, considerando as quatro principais orientações solares.

Para o ambiente interno, foram considerados os maiores padrões de refletância estabelecidos pela norma NBR ISO/CIE 8995 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013), sendo: teto = 90%; parede = 80 %; piso = 50%. Esses valores foram os mesmos para todas as simulações. O revestimento definido para os poços de iluminação foi a pintura na cor branca (refletância = 80%), com o objetivo de proporcionar maior reflexão da luz para o interior da edificação.

³ A fórmula para o cálculo do poço de luz tem como resultado a medida de um diâmetro mínimo que deve ser inscrito em seu vão livre. Como não há uma forma pré-definida para o vão, neste estudo, foi adotada a forma quadrada, por ser usualmente utilizada nas edificações da cidade.

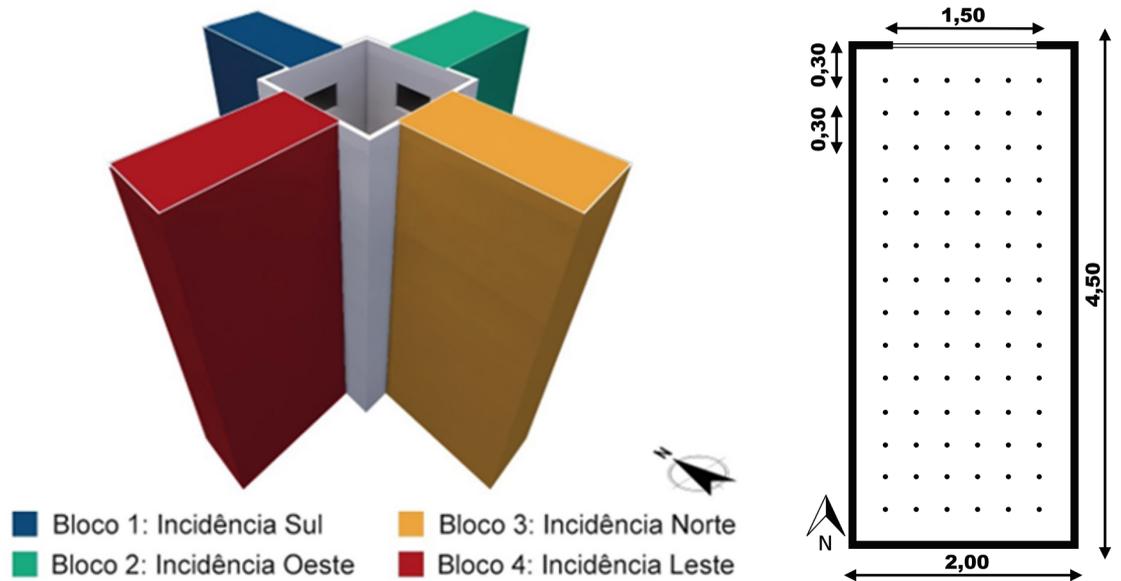


Figura 1 – Modelo tridimensional e planta baixa com pontos de sensores propostos para simulação
 Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Parâmetros para a simulação computacional e métrica considerada

Foram avaliados todos os pavimentos nas quatro principais orientações solares de cada um dos quatro modelos, totalizando 80 casos. As simulações dinâmicas utilizaram o arquivo climático da cidade de Juiz de Fora, elaborado de acordo com o INMET. Esse tipo de simulação resulta em séries anuais de iluminâncias que possibilitam uma análise do comportamento dinâmico do desempenho da luz natural de hora em hora (Didoné; Pereira, 2010). Foi definido como período de ocupação o horário entre 8 e 18 horas.

Sensores virtuais foram configurados no interior dos ambientes para a medição das iluminâncias, conforme Figura 1. Os pontos distam 30cm tanto entre eles quanto das paredes laterais. Os sensores foram colocados a 75cm de altura, conforme indicado pela NBR ISO/CIE 8995-1 (2013) como plano de trabalho. A métrica de avaliação da iluminação utilizada neste estudo é o DA (Daylight Autonomy), que considera a média da porcentagem das horas de ocupação, ao longo do ano, em que os sensores registraram iluminância igual ou maior a 150 lux, de acordo com a NBR ISO/CIE 8995 (2013). Além disso, foram verificadas as iluminâncias nos ambientes às 9h, 12h e 15h dos solstícios de verão e inverno, considerando as condições luminosas e climáticas, nesses momentos, de Juiz de Fora. Essa análise mais detalhada foi necessária para verificar a influência da altura solar de forma pontual no tempo na iluminação natural em cada orientação, de forma a evitar o mascaramento pelo cálculo do DA considerando todo o ano.

Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta os resultados na iluminação natural atingida nos quatro edifícios analisados em cada orientação solar. Nenhum pavimento apresentou 100% do tempo em autonomia de luz, considerando as larguras do poço de luz calculadas de acordo com a legislação. O valor máximo de DA150 chegou a 94%, no modelo de oito pavimentos, com abertura voltada a oeste. Isso pode ser explicado pela baixa altura solar nessa orientação em relação aos casos com janelas à norte e sul. A inadequada iluminação natural em ambientes servidos por poços de luz

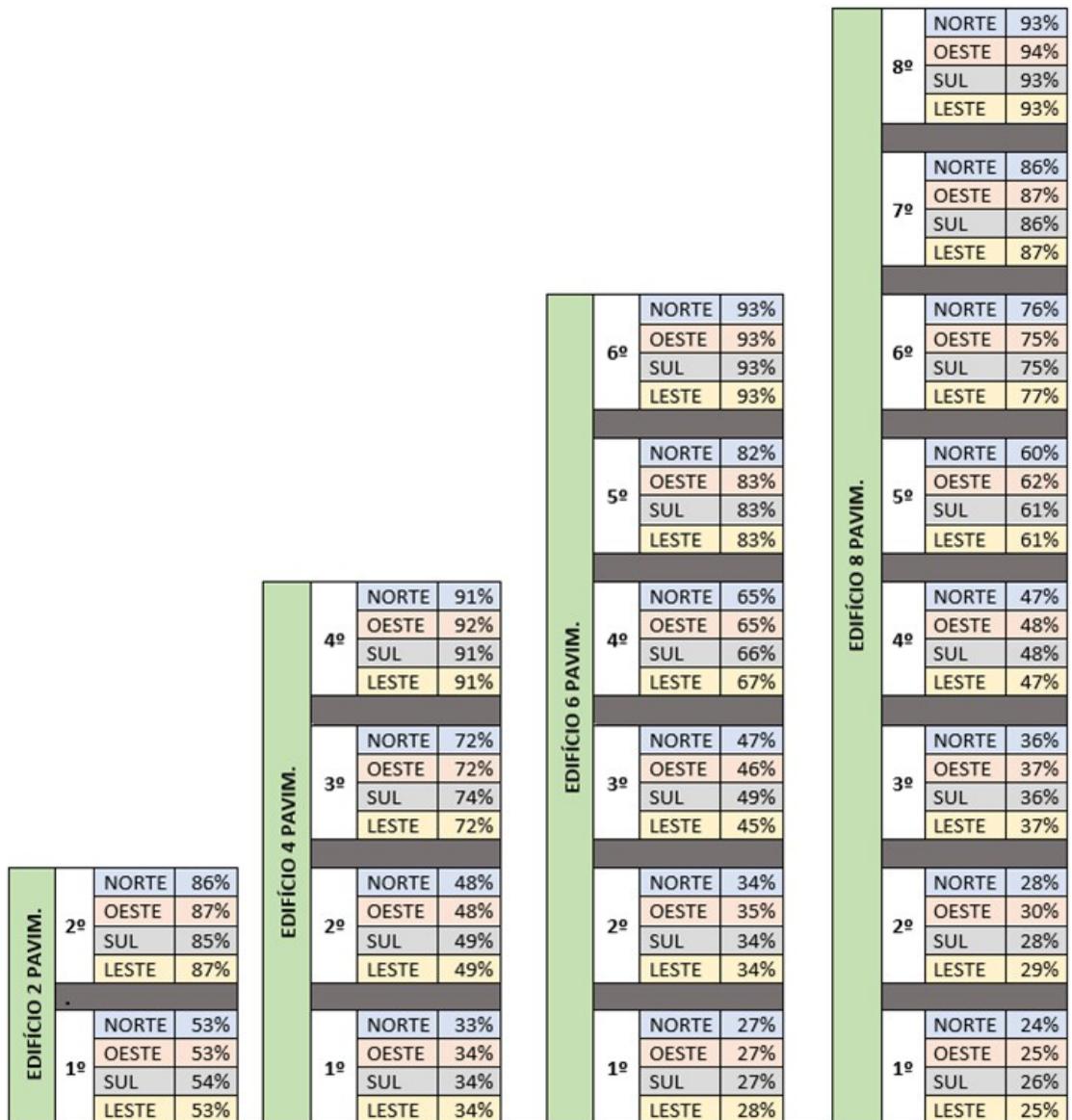


Figura 2 – Comparação entre os níveis de iluminância dos edifícios.

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

também foi observada em Vitória, ES, por Bolssoni, Laranja e Alvarez (2018), embora naquele estudo os valores de iluminância considerados suficientes foram definidos entre 500 e 2000 lux.

Assim, como observado por outros autores Fadzil, Al-Absi (2016), a iluminação diminui gradativamente nos pavimentos inferiores servidos pelo poço de luz, tanto nos casos dos edifícios mais baixos, quanto nos mais altos. No edifício de oito pavimentos, o valor de DA atingiu o mínimo de 24% no ambiente do primeiro pavimento do caso voltado a norte.

Foi possível perceber ainda que, embora os edifícios mais altos tenham melhores resultados nos pavimentos do topo, os mais baixos resultaram em melhores níveis de iluminação natural na base da edificação. Assim, quanto mais alto o edifício, menor será o desempenho da iluminação natural dos ambientes no térreo conectados ao poço de luz, o que também foi observado por Acosta, Navarro e Sendra (2013). Assim, percebe-se que, em todos os modelos simulados, os pavimentos superiores são beneficiados com o aumento do diâmetro do poço. Porém, o aumento do diâmetro não é suficiente para compensar a perda de luz, devido ao aumento da profundidade do poço.

Em todos os casos simulados não foram observadas diferenças expressivas nos resultados referentes ao aproveitamento da luz natural entre as diferentes orientações solares. A variação percentual encontrada entre uma face que recebe, por exemplo, a incidência solar norte, em relação as faces que recebem a incidência das outras orientações, chegou no máximo a 3%. Isso pode ser explicado pela métrica usada que considera a média dos valores de iluminância ao longo do ano.

A Tabela 2 apresenta os ambientes que atingiram 150 lux em toda sua extensão nos solstícios de inverno e verão. Foi possível observar que somente os edifícios de 4 e 2 pavimentos atingiram as iluminâncias mínimas de 150lux em todo pavimentos em alguns momentos do ano. Isso ocorreu especialmente no horário de 12h, o que pode ser explicado pelo posicionamento mais alto do sol, uma vez que nesse momento, o raio solar tende a adentrar o poço de luz mais profundamente e as reflexões no piso e nas paredes geram mais iluminação difusa para dentro do ambiente. Já os edifícios mais altos tiveram, em geral, um menor aproveitamento da luz. Apenas os pavimentos do topo atingiram o mínimo de 150 lux, em todo o ambiente, nos casos de 8 e 6 pavimentos. É preciso observar, contudo, que a orientação solar também influencia na iluminação natural. No edifício mais baixo, por exemplo, os ambientes com abertura voltadas a norte e a sul não atingiram o mínimo de 150 lux, no inverno, às 9h e às 15h, quando o sol está mais baixo na abóbada celeste.

Em relação aos dois momentos do ano testados, mais ambientes atingiram 150 lux no verão do que no inverno; por exemplo, para o edifício de 8 pavimentos, com abertura voltada para a fachada norte, o poço de luz especificado foi suficiente para iluminar o edifício a partir do

Tabela 2 – Pavimentos com ambientes que atingiram o mínimo de 150 lux em toda sua extensão.

Solstício de verão			Solstício de inverno				
Edifício de 8 pavimentos							
	9h	12h	15h		9h	12h	15h
Norte	6°, 7°, 8°	5°, 6°, 7°, 8°	7°, 8°	Norte	7°, 8°	6°, 7°, 8°	8°
Oeste	7°, 8°	6°, 7°, 8°	6°, 7°, 8°	Oeste	7°, 8°	6°, 7°, 8°	8°
Sul	6°, 7°, 8°	6°, 7°, 8°	7°, 8°	Sul	7°, 8°	6°, 7°, 8°	-
Leste	7°, 8°	5°, 6°, 7°, 8°	6°, 7°, 8°	Leste	7°, 8°	6°, 7°, 8°	8°
Edifício de 6 pavimentos							
	9h	12h	15h		9h	12h	15h
Norte	5°, 6°	4°, 5°, 6°	5°, 6°	Norte	5°, 6°	5°, 6°	6°
Oeste	5°, 6°	5°, 6°	5°, 6°	Oeste	5°, 6°	5°, 6°	6°
Sul	5°, 6°	5°, 6°	5°, 6°	Sul	-	4°, 5°, 6°	-
Leste	5°, 6°	5°, 6°	5°, 6°	Leste	5°, 6°	5°, 6°	-
Edifício de 4 pavimentos							
	9h	12h	15h		9h	12h	15h
Norte	2°, 3°, 4°	1°, 2°, 3°, 4°	2°, 3°, 4°	Norte	3°, 4°	2°, 3°, 4°	2°, 3°, 4°
Oeste	1°, 2°, 4°	1°, 2°, 3°, 4°	1°, 2°, 4°	Oeste	1°, 2°	1°, 2°, 3°, 4°	2°
Sul	2°, 3°, 4°	1°, 2°, 3°, 4°	3°, 4°	Sul	2°	1°, 2°, 3°, 4°	4°
Leste	1°, 2°, 3°, 4°	1°, 2°, 3°, 4°	2°, 3°, 4°	Leste	3°, 4°	1°, 2°, 3°, 4°	4°
Edifício de 2 pavimentos							
	9h	12h	15h		9h	12h	15h
Norte	2°	1°, 2°	-	Norte	-	2°	-
Oeste	1°, 2°	1°, 2°	1°, 2°	Oeste	1°, 2°	1°, 2°	2°
Sul	2°	1°, 2°	2°	Sul	-	1°, 2°	-
Leste	1°, 2°	1°, 2°	1°, 2°	Leste	1°, 2°	1°, 2°	2°

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

quinto pavimento em dezembro às 12h, mas somente a partir do sexto em junho. Isso também está relacionado à posição do sol, que é mais baixa no inverno, em que o raio solar atinge as superfícies mais baixas do poço em junho.

Em relação à distribuição da luz nos ambientes, foi observado que as iluminâncias são expressivamente maiores nas áreas próximas à abertura do que no restante dos ambientes. A Figura 3 apresenta a distribuição das iluminâncias no edifício de 8 pavimentos nos solstícios. Esta concentração da iluminação ocorre devido à posição transversal da abertura do ambiente em relação à abertura do poço. Assim, a maior parte dos raios de luz vindos do poço atingem primeiramente essa porção do piso do ambiente e depois são distribuídos no espaço. Fica claro ainda que, no inverno, o baixo posicionamento solar contribui para maiores níveis de iluminância se espalhando na extensão do ambiente com abertura voltada a norte nos pavimentos superiores. É importante ressaltar que os elevados níveis de iluminância nas áreas próximas às aberturas podem gerar ofuscamento, comprometendo a qualidade visual do ambiente.

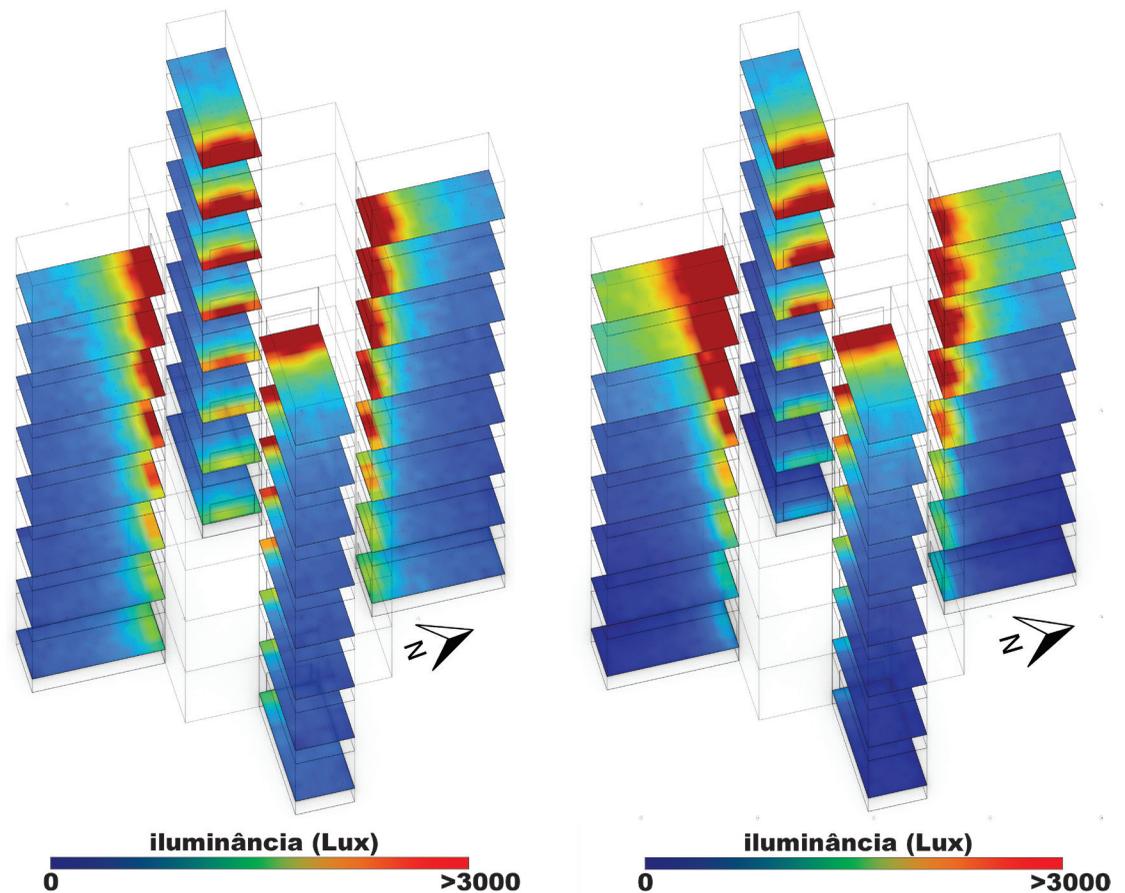


Figura 3 - Distribuição das iluminâncias nos ambientes internos do edifício de 8 pavimentos nos solstícios de (a) verão e (b) inverno.

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Considerações Finais

Este estudo teve como objetivo identificar se as dimensões mínimas, determinadas pela legislação urbana de Juiz de Fora, para o poço de luz são suficientes para garantir a adequada iluminação natural nos ambientes por ele servido. Os resultados indicaram que as áreas mínimas atuais indicadas para o poço de luz na legislação não permitem que os ambientes tenham níveis

adequados de iluminância durante todo o ano. Considerando que os edifícios, atualmente construídos com poços de luz, são geralmente mais altos, tem-se uma tendência de que os ambientes mais abaixo no edifício tenham iluminação comprometida. Os resultados também demonstraram que, independentemente da altura da edificação, os pavimentos superiores são privilegiados e os inferiores ficam cada mais prejudicados em relação à iluminação natural.

Na análise estática de iluminação em 3 horários (9h, 12h e 15h) nos dois solstícios, foi possível perceber que a altura da edificação impacta os resultados. Somente os edifícios mais baixos (4 e 2 pavimentos) atingiram ao menos 150 lux, em toda a extensão dos ambientes. Em relação à distribuição da iluminação nestes ambientes percebe-se uma maior concentração na porção próxima à janela. No entanto, no solstício de inverno, percebeu-se que os ambientes com faces voltadas para norte nos pavimentos superiores tendem a ter uma iluminação mais distribuída devido à inclinação solar.

Dessa forma, notou-se a necessidade de um reestudo da legislação urbana da cidade, visando o atendimento dos critérios definidos nas normas vigentes e a melhoria da qualidade dos ambientes construídos na cidade. Ressalta-se que o estudo se limita a uma análise quantitativa e não qualitativa, uma vez que fatores como boa distribuição da luz no espaço e ausência de ofuscamento não foram analisados. Para os estudos futuros, sugere-se também, que seja considerada a influência dos edifícios do entorno nos resultados.

Referências

- Acosta, I.; Navarro, J.; Sendra, J.J. Towards an analysis of the performance of lightwell skylights under overcast sky conditions. *Energy and Building*, v. 64, p. 10-16, 2013.
- Ahadi, A. A.; Saghafi, M. R.; Tahbaz, M. 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*, v. 18, p. 220-224, 2018.
- Ahadi, A. A.; Saghafi, M. R.; Tahbaz, M. The study of effective factors in daylight performance of light-wells with dynamic daylight metrics in residential buildings. *Solar Energy*, v. 155, p. 679-697, 2017.
- Ahmed, B. M. A.; Nassar, K. M.; Asr, A. Parametric Study of Light-Well Design for Day-Lighting Analysis under Clear Skies. *International Journal of Engineering and Technology*, v. 6, n. 1, p. 81-85, 2014.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15215-1: iluminação natural – Parte 1: conceitos básicos e definições*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- Bahia, S. R.; Guedes, P. A. *Elaboração e atualização do código de obras e edificações*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBAM-DUMA; Eletrobrás-PROCEL, 2012.
- Bolssoni, G. C.; Laranja, A. C.; Alvarez, C. E. Disponibilidade de iluminação natural em ambiente interno orientado para poço de iluminação. *Cadernos PROARQ*, v. 31, p. 101-117, 2018.
- Bugeat, A.; Beckers, B.; Fernández, E. Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. *Solar Energy*, v. 207, p. 1434-1444, 2020.
- Chartered Institution of Building Services Engineers. *Guide L Sustainability*. Londres: CIBSE, 2020.
- Didoné, E. L.; Pereira, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. *Ambiente Construído*, v. 10, p. 139-154, 2010.
- Fadzil, S. F. S.; Al-Absi, Z. A. Daylight distribution patterns in light wells in residential buildings in Penang, Malaysia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 210, p. 77-86, 2016.
- Freewan, A. A. Y.; Gharaibeh, A. A.; Jamhawi, M. M. Improving daylight performance of light wells in residential buildings: Nourishing compact sustainable urban form. *Sustainable Cities and Society*, v. 13, p. 32-40, 2014.

Goharian, A.; Daneshjoo, K.; Yeganeh, M. Standardization of methodology for optimizing the well aperture as device (reflector) for light-wells; A novel approach using Honeybee & Ladybug plugins. *Energy Reports*, v. 8, p. 3096-3114, 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Brasileiro de 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

Juiz de Fora. *Compilação da Legislação Urbana: Atualização*. 3. ed. Juiz de Fora: Prefeitura de Juiz de Fora, Secretaria de atividades urbanas, 2019.

Moraes, J. S.; Alcojor, A. M.; Bittencourt, L. S. Análise de indicadores de desempenho da iluminação artificial em ambientes residenciais. *Pesquisa em Arquitetura e Construção*, v. 9, p. 35-46, 2018.

Reinhart, C. F.; Mardaljevic, J.; Rogers, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *The Journal of the Illuminating Engineering Society*, v. 3, p. 7-31, 2013.

Yu, F.; Wennersten, R.; Leng, J. A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching 'thermal-daylighting balance'. *Building and Environment*, v. 186, 2020.

Colaboradores

A. G. Leite colaborou com o desenho da pesquisa, escrita e revisão; J. P. Melo-Souza colaborou com a modelagem, simulação, escrita e confecção gráfica; S. A. Barbosa colaborou com o desenho da pesquisa, escrita e interpretação dos dados; K. C. Alberto colaborou com a concepção, revisão e aprovação da versão final do artigo.