POÇOS DE LUZ EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS ESTÃO APTOS A ILUMINAR AMBIENTES?

Karla Cristina de Freitas Jorge Abrahão (1); Janeth Vieira da Silva (2); Thais Lobo (3); Alice Oliveira (4); Roberta Vieira Gonçalves de Souza (5); Ana Carolina Oliveira Veloso (6)

(1) Doutora em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável pela Universidade Federal de Minas Gerais.
(2) Mestra em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável pela Universidade Federal de Minas Gerais.
(3) (4) Graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Minas Gerais.
(5) Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professora Associada na Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais.
(6) Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais.

RESUMO

O estudo parte de uma situação recorrente em assentamentos habitacionais e busca trazer contribuições para a revisão da norma e para os regulamentos municipais com impacto na admissão da luz natural. Foram feitas 280 análises do desempenho de iluminação natural para ambiente de sala com janela voltada para poço de luz, localizado no 1º e no 4º pavimento de uma edificação residencial multifamiliar, em Belo Horizonte - MG. A análise foi feita a partir da metodologia prescritiva da norma NBR15.575/2013 e por simulação computacional. As análises dos níveis de iluminância externa mostraram que no 1° pavimento há pouca disponibilidade de luz natural no poço, ocasionando reduzido desempenho luminoso no ambiente. O nível de 48 lux, nível mínimo da NBR 15.575/2013 para este pavimento, não foi alcançado. O alargamento do diâmetro do poço de 3 para 6 metros (D3 e D6) não melhora significativamente as condições da iluminação natural no ambiente interno, o que acontece apenas na elevação vertical do ambiente para os pavimentos superiores. No 4º pavimento foi alcançado o nível de 60 lux apenas com poço com diâmetro D6. A adoção de paredes internas e externas com refletância de 80% podem incrementar esse desempenho em aproximadamente 80%, em relação a refletâncias entre 50-60%, principalmente em condições em que não há contribuição da componente celeste, e há elevada contribuição da componente refletida interna e externa, como é o caso de ambientes voltados para poço de luz.

Palavras-chave: iluminação natural, poço de luz, iluminância.

ABSTRACT

The study starts from a recurring situation in housing settlements. It aims to bring contributions to the standard revision and to the municipal regulations with an impact on the daylight admission. The study developed 280 analysis of daylighting performance for a living room with a window facing a light well, located on the 1st and 4th floors of a multifamily housing unit, in Belo Horizonte - MG. The analysis used the prescriptive methodology of the NBR15.575/2013 standard and by computer simulation. The analysis of the external illuminance levels showed that on the 1st floor there is little availability of natural light in the well, causing reduced daylighting performance in the environment. The level of 48 lux, minimum level of NBR 15.575/2013, for the first floor was not reached. The widening of the diameter of the well from 3 to 6 meters (D3 and D6) does not significantly improve the daylighting conditions in the internal environment, which happens only in the vertical elevation of the environment to the upper floors. On the 4th floor the level of 60 lux was reached only with D6 diameter of the well. The adoption of internal and external walls with reflectance of 80% can increase this performance by approximately 80%, in relation to reflectance between 50-60%, especially in conditions in which there is no contribution of the sky component, and there is a high contribution of the internal and external reflected component, as is the case of environments facing the light well.

Keywords: daylighting, light well, illuminance.

1. INTRODUÇÃO

A luz natural é um recurso gratuito e disponível durante as horas do dia. A sua admissão em ambientes domésticos tem a capacidade de qualificá-los e de influenciar a saúde e o humor dos seus usuários (OSIBONA, SOLOMON E FECHT, 2021; MARDALJEVIC, 2021). Na fronteira entre os ambientes externo e interno, as aberturas atuam como o elemento de transição, de passagem da luz natural, servindo o interior com iluminação natural, que não deve ser insuficiente ou excessiva, mas controlada e de acordo com o contexto das atividades ali realizadas. O controle da admissão da luz natural em um espaço interno de edificações deve ser tomado como um recurso intencional de projeto de forma a atingir certo desempenho, que corresponde às condições mínimas de conforto para que os ocupantes desenvolvam suas atividades sem haver esforço visual excessivo e sem sofrer ofuscamento (REINHART, 2014; MARDALJEVIC, 2021). Situações externas à edificação, tais como as condições do entorno, as cores dos revestimentos, a volumetria da arborização viária, os afastamentos, a largura das vias, os elementos do relevo, dentre outros, de forma geral não estão suscetíveis ao controle pelos projetos, e devem ser considerados na análise uma vez que podem atuar como obstruções e influenciar o desempenho da iluminação natural no ambiente (GUIDI *et al.*, 2018). Adicionalmente, Mardaljevic (2021) aponta, para justificar as recorrentes falhas no desempenho luminoso, que a inadequação de métodos projetuais para o planejamento da disponibilidade da luz natural nas edificações é significativo, e argumenta a necessidade de uma nova abordagem.

No contexto legal de edificações no Brasil, as dimensões mínimas de aberturas para acesso da luz natural e ventilação geralmente estão presentes nas regulamentações e códigos de obras municipais. No contexto normativo, a iluminação natural em edificações é tratada nas normas brasileiras ABNT NBR 15.215/2005 e ABNT NBR15.575/2013, que atualmente se encontram em processo de revisão. A NBR 15.215/2005 apresenta os procedimentos para a análise prescritiva da iluminação natural em um ambiente. Já a NBR15.575/2013 (ABNT, 2013), estabelece, dentre outros, o desempenho da iluminação natural a ser atendido em projetos e em obras de edificações residenciais. A revisão desta norma na área de iluminação, iniciada em 2018 ainda não foi aprovada para consulta pública, tendo sido publicada até o momento apenas a emenda para a parte de desempenho térmico em março de 2021. Será usada neste trabalho, portanto, a versão atual da norma.

Para a análise da iluminação natural, a NBR15.575/2013 (ABNT, 2013) estabelece três níveis de desempenho: Mínimo (M), Intermediário (I), e Superior (S), e faz referência à metodologia da NBR 15.215/2005 partes 2 e 3 (ABNT, 2005a; ABNT, 2005b). O atendimento ao desempenho de nível M é obrigatório para os ambientes de sala de estar, dormitório, copa/cozinha e área de serviço, e se refere a um nível mínimo de iluminância em um ponto centralizado no ambiente a 0,75m de altura, sendo estabelecido em 48 lux para os ambientes situados em pavimentos térreos e 60 lux para os demais pavimentos. A Tabela 1 apresenta de forma resumida os parâmetros para os procedimentos de análise do desempenho da iluminação natural das normas NBR 15.215/2005 e NBR 15.575/2013.

Tabela 1 – Parâmetros e diretrizes para os procedimentos de análise prescritiva do desempenho da iluminação natural, segundo as normas NBR 15.215/2005 e NBR 15.575/2013.

Parâmetros	**NBR 15.215/20005 (ABNT, 2005a)**	**NBR 15.575/2013 (ABNT, 2013a)**
Dias	Não é determinado um dia especifico, mas a norma apresenta o método para a realização da análise em qualquer dia	23 de abril (equinócio de outono) e 23 de outubro (equinócio de verão)
Horários	Não é determinado um horário especifico, mas a norma apresenta o método para a realização da análise em qualquer horário	9:30h e 15:30h
Localização	Latitude e longitude do local da edificação	latitude e longitude do local da edificação
Condições do céu	Céu claro: condições de céu com nebulosidade entre 0-35% (sem nuvens e baixa nebulosidade) com porções mais escuras à 90° (zênite) e tendência de maior brilho nas regiões próximas à linha do horizonte	Nebulosidade média (índice de nuvens 50%)
	Céu parcialmente encoberto ou intermediário: condição de céu padronizada entre o céu claro e o totalmente encoberto com	
	Céu encoberto: condição de céu com nebulosidade entre 75-100% (com nuvens em toda a superfície da abóbada celeste)	
Considerar		Iluminação artificial desativada As obstruções por elementos externos tais como edificações vizinhas, taludes e outros
Desconsiderar	As obstruções opacas internas	

Fonte: Elaboração própria a partir de ABNT (2005a; 2013a).

Os procedimentos metodológicos da NBR 15.215-3/2005, compatíveis com a época de sua publicação, foram desenvolvidos por método prescritivo, a partir da construção de máscaras e do cálculo da disponibilidade da luz natural pontual, captado por um ângulo sólido, resultantes de três componentes de contribuição: componente celeste (parcela visível do céu), componentes refletidas interna e externa. Devido aos procedimentos metodológicos, não há contribuição da iluminação natural derivada das interreflexões contínuas das superfícies internas e externas. Dessa forma, a análise conforme a NBR 15.575/2013 configura-se como uma análise ponto-no-tempo, composta por 4 observações anuais (2 datas e 2 horários), e que não estabelece parâmetros para orientar os procedimentos de análises por meio de simulação computacional. As análises por meio de simulação computacional podem ser do tipo ponto-no-tempo, definidos dias e horários específicos, ou baseada no clima, com resultados do desempenho anual. Essas últimas vêm sendo amplamente utilizadas por meio de programas computacionais e *plug-ins* e apresentam um avanço metodológico uma vez que seus algoritmos consideram a interreflexão da luz das superfícies internas e externas, tornando as análises mais próximas da realidade (MARDALJEVIC, 2013; REINHART, 2018; BUGEAT *et al.*, 2020). Guidi *et al*. (2018) utilizaram os dois procedimentos, prescritivo e de simulação computacional, e encontraram resultados diferenciados do nível de iluminância no centro dos ambientes em um mesmo modelo de unidade habitacional multifamiliar. Além da questão da interreflexão das superfícies e das condições do entorno, as diferenças entre os resultados podem ter sido ocasionadas pelos níveis de iluminância externa, que na simulação computacional dependem de dados medidos apresentados no arquivo climático adotado e de acordo com a NBR 15.215-2: 2005 são obtidos por meio de equações matemáticas.

Análises de desempenho da iluminação natural de modelos de edificações habitacionais sob condições com obstruções por elementos de entorno urbano e adensado foram analisados por diversos estudos. Leder, Pereira e Claro (2008) propuseram, por meio de simulação computacional, um parâmetro para caracterizar uma zona angular no céu preferível para a disponibilidade de luz natural em uma edificação em ambiente urbano. Scalco e Pereira (2016) desenvolveram um método para avaliar o impacto de edificações em relação ao acesso à iluminação natural em entorno urbanizado. O estudo concluiu que edificações altas em áreas com taxa de ocupação reduzida produzem melhores condições de acesso à iluminação natural, no entanto, enfatizam que a verticalização acompanhada de elevadas taxas de ocupação, como ocorre nas grandes cidades brasileiras, resulta em menor visão do céu. Leal e Leder (2018) analisaram a obstrução do céu e seu impacto na iluminação natural e no ofuscamento, e observaram que as unidades localizadas nos pavimentos inferiores apresentaram redução do nível de a iluminação em relação a pavimentos mais altos, de 15% em entorno denso com refletância média, e de 40% em entorno muito denso (ocupação máxima) e refletância de 90%.

No contexto residencial, Abrahão e Souza (2021) apontaram que o incremento de 5,6 milhões de novas unidades residenciais no período 2009-2018 derivadas do Programa Minha Casa Minha Vida - PMCMV, programa habitacional do Governo Federal com objetivo de redução do déficit habitacional, junto a outros fatores, colaboraram para o crescimento do consumo de energia elétrica do setor.

Nos assentamentos residenciais verticalizados e densos, é observada a ampla recorrência da implantação de poços de luz no núcleo dos edifícios, espaço interno e descoberto para o qual se voltam as janelas de alguns ambientes, como exemplificam as Figuras de 1 a 4. As condições mínimas de dimensões internas do poço de luz e de área janelas são determinadas pelos códigos de obras municipais. Em Belo Horizonte – MG, o código determina para o poço de luz uma largura mínima entre as paredes opostas internas em relação à altura da edificação[1], e que a área da janela nos ambientes de permanência prolongada corresponda ou exceda o equivalente a 1/6 da área do piso do ambiente.

Bugeat *et al.* (2020) apontam que os poços de luz representam um contexto especial para a análise do desempenho de iluminação natural, que os ambientes localizados no nível térreo do poço de luz são os menos servidos por luz natural, e enfatizam que esses deveriam ser mais investigados. No entanto, observou-se ser

[1] "Art.63 - No caso de compartimentos de permanência prolongada iluminados através de poço, o mesmo deverá medir, no mínimo, 10,00m² (dez metros quadrados) e permitir a inscrição de um círculo com diâmetro mínimo de 2,00m (dois metros).
§ 1º - A partir do segundo pavimento, o poço deverá permitir, ao nível de cada pavimento, a inscrição de um círculo de diâmetro mínimo D dado pela fórmula D = 2,00m + [(A - 5,30m)/4], onde A representa a distância em metros entre a laje de cobertura do pavimento considerado e o piso do primeiro pavimento iluminado através do poço.
§ 2º - Em edificação com altura máxima de 6,00m (seis metros), será admitido poço com diâmetro mínimo de 1,50m (um metro e cinquenta centímetros), desde que a área do poço tenha mais de 20,00m² (vinte metros quadrados).
Art.64 - O poço de iluminação e ventilação poderá ter área mínima de 6,00m² (seis metros quadrados) e permitir a inscrição de um círculo de diâmetro mínimo de 1,50m (um metro e cinquenta centímetros), no caso de atender, exclusivamente, compartimentos de permanência transitória.
Parágrafo Único. A partir do segundo pavimento, ao nível de cada pavimento, o poço deverá permitir a inscrição de um círculo de diâmetro mínimo D dado pela fórmula D = 1,50m + [(A - 5,30m) /10], onde A representa a distância em metros entre a laje de cobertura do pavimento considerado e o piso do primeiro pavimento iluminado através da área." (PBH, 2009).

restrita a literatura brasileira nesse contexto. Bolssoni, Laranja e Alvarez (2018) analisaram por meio de simulação computacional os percentuais de iluminação interna em ambiente de quarto, voltados para poço de luz, em edifício residencial com 6 pavimentos localizado em Vitória - ES. Os resultados mostraram que a iluminância do ambiente, nas condições analisadas, não aumenta proporcionalmente ao aumento do diâmetro interno do poço de luz, sendo relevante a contribuição da iluminação pela reflexão das superfícies externas. Os autores apontam que poço de luz quando mal dimensionado passa a ser um recurso ineficiente para o qual foi projetado, servindo os ambientes adjacentes com pouca iluminação natural, e com pouca ou nenhuma visão de céu nas unidades dos pavimentos mais baixos.



Figura 1 – Assentamento de unidades residenciais em Monte-Mor, SP (PORTAL RMC, 2016)



Figura 2 – Assentamento de unidades residenciais em Manaus (BRASIL ECONÔMICO, 2011)

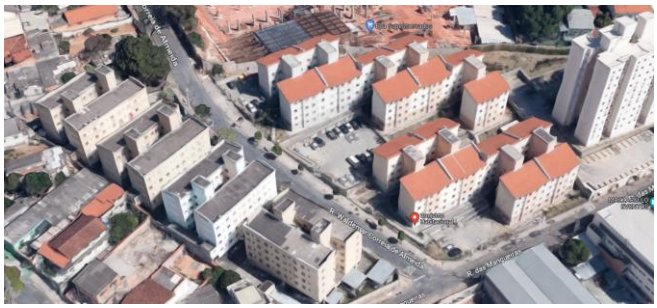


Figura 3 – Conjunto Habitacional Residencial Mangabeiras em Belo Horizonte, MG (GOOGLE MAPS, 2023b)

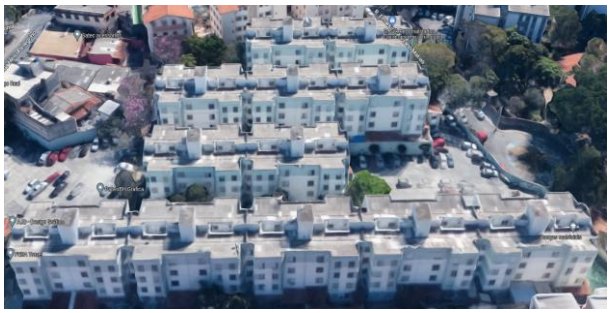


Figura 4 – Conjunto Habitacional Bolivar de Freitas em Belo Horizonte, MG (GOOGLE MAPS, 2023a)

2. OBJETIVO

O presente trabalho propõe analisar o desempenho de iluminação natural de um ambiente residencial com janela voltada o para poço de luz, e trazer contribuições para a revisão da norma NBR15.575/2013.

3. MÉTODO

3.1. Determinação do modelo e parâmetros para as análises

O presente estudo desenvolveu um projeto de unidade residencial com 38,70 m², buscando exemplificar uma tipologia de unidade residencial do PMCMV, para a cidade de Belo Horizonte (MG), em conformidade com os parâmetros da legislação municipal para o dimensionamento de poços de luz (Figura 5).

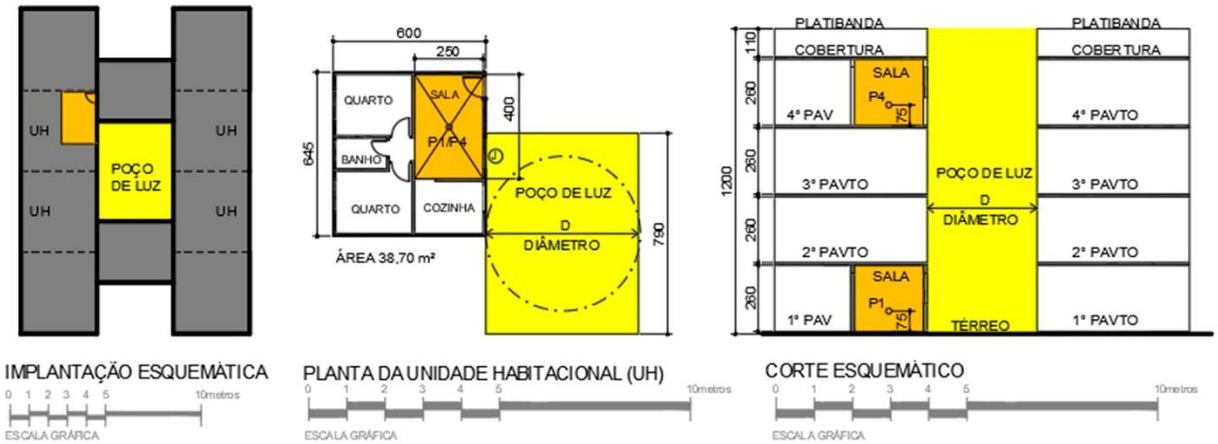


Figura 5- Modelo de análise: Implantação esquemática, planta da unidade habitacional (UH) e corte esquemático.

Determinou-se um edifício com 04 pavimentos, altura bastante praticada pelo Programa por excluir a necessidade da instalação de elevador. Foram consideradas dois diâmetros para o poço de luz: 3 e 6 metros. Foi analisado o ambiente de sala, de permanência prolongada, localizado no 1º e no 4º pavimento. As análises de desempenho luminoso foram desenvolvidas para as quatro orientações, Norte (N), Sul (S), Leste (L) e Oeste (O), com parâmetros apresentados no Tabela 2. Os dias analisados atendem ao disposto na NBR 15.575/2013 (ver tabela 3).

Tabela 2 – Parâmetros adotados para o modelo de análise

Modelo	**Parâmetros**
Dimensões do ambiente de Sala [(a)]	L 400 cm x C 250 cm x PD 260 cm; área de 16,0 m²
Dimensões da janela [(a, c)]	L 120 cm x A 140 cm x P 110 cm (equivalente à 16,6 % da área do piso [(c)])
Vedação da janela	Vedação em vidro incolor 4 mm com transmitância de 85,0% [(b)]
Localização do ambiente	1º e 4 º pavimentos
Refletância das paredes internas e teto (Análise I)	tinta PVA fosca cor branco gelo (60,1%)
Refletância das paredes internas e teto (Análise II)	tinta PVA fosca cor branco gelo (80,0%)
Parâmetros da edificação	
Dimensões do poço com diâmetro 3,0 m [(a)]	L 300 cm x C 850 (área de 25,5 m²)
Dimensões do poço com diâmetro 6,0 m [(a)]	L 600 cm x C 850 (área de 51,0 m²)
Total de pavimentos	4
Refletância das paredes externas (Análise I)	tinta PVA fosca cor areia (58,9%)
Refletância das paredes externas (Análise II)	tinta PVA fosca cor branco neve (80,0%)
Parâmetros da análise	
Orientações analisadas	Norte, Sul, Leste e Oeste
Cidade / Zona Bioclimática	Belo Horizonte / ZB3
(Latitude; graus) / (Longitude; graus) / (Altitude, m)	(-19) / (-43) / (857)

Notas:

(a) A – altura, D – diâmetro, C – comprimento, L – largura, P – peitoril, PD – pé-direito;
(b) Índice de transmitância conforme ABNT (2005b);
(c) O código de obras dos municípios de Belo Horizonte, MG, estabelece para edifícios residenciais uma área mínima para vão de ventilação e iluminação de compartimentos de permanência prolongada, abertos diretamente para o exterior, correspondente a 1/6 da área do piso (PBH, 2009).

3.2 Convenção para a nomenclatura dos modelos

Foi elaborada uma nomenclatura para os modelos simulados de forma facilitar a compreensão na apresentação dos resultados, seguindo a seguinte lógica: J (janela), seguido da inicial da orientação (N para Norte; L para Leste; O para Oeste; S para Sul), seguido de D3 ou D6, onde D representa o diâmetro interno do poço de luz, definido com 3 e 6 metros, seguido da data da simulação (2304 para 23/04 e 2310 para 23/10), seguido da hora da simulação 930 e 1530, representando 9:30 e 15:30, respectivamente. Exemplificando, o modelo JN_D6_2310_1530 refere-se ao modelo com janela com orientação Norte, voltada para o poço com distância de 6 metros, analisado para o dia 23/10 no horário de 15:30h.

3.3 Análise do desempenho de iluminação natural

As análises de desempenho da iluminação natural foram desenvolvidas pelos métodos prescritivo segundo a NBR15.575/2013 (ABNT, 2013a) e por simulação computacional.

3.3.1 *Análise prescritiva segundo a NBR 15.575/2013 (ABNT, 2013a)*

As análises foram feitas de forma a obter a iluminância (lux) no ponto central do ambiente (ponto P), para os dias e horários estabelecidos pela NBR 15.575/2013. O cálculo da disponibilidade de iluminância externa e interna seguiram os procedimentos da NBR15.215/2005 – partes 2 e 3 (ABNT, 2005a; 2005b). Para compreender os limites do desempenho luminoso do ambiente iluminado por poço de luz as análises foram desenvolvidas para céu com nebulosidade média (intermediário), que foi interpretado como sendo correspondente a um céu com índice de nuvens de 50%, e para céu claro. Definidos os ângulos de declinação, altura e azimutes solares, determinou-se a iluminância externa em um plano horizontal para os tipos de céu claro e céu intermediário, através das Equações 1 e 2, respectivamente (ABNT, 2005a):

$$Echi = 0{,}30 + 21 \times sen\, y_s \quad \text{(Equação 1)}$$

$$Echi = 0{,}30 + 45 \times sen\, y_s \quad \text{(Equação 2)}$$

onde, *Echi* refere-se à iluminância externa horizontal, em quilolux [klx]; y_s refere-se à altura solar, em graus.

O céu claro foi calculado para fins de comparação com o método de simulação computacional ponto-no-tempo feita no *ReluxDesktop* que não permite a avaliação de um céu intermediário.

A máscara do ambiente interno foi elaborada para a sala localizada no 1º e no 4° pavimento para diâmetro interno do poço de luz, de 3 e de 6 metros. Determinaram-se os valores das componentes celeste (CC), refletida externa (CRE) e refletida interna (CRI), e da contribuição de iluminação natural (CIN) a partir da Equação 3 (ABNT, 2005a).

$$CIN = (CC + CRE + CRI) \times K_T + K_M + K_C \quad \text{(Equação 3)}$$

onde, K_T refere-se à transmissividade do vidro; K_M refere-se ao fator de manutenção , K_C refere-se ao fator de caixilho. Nesse trabalho determinou-se os valores de 0,85 para K_T ; 0,90 para K_M ; 1,00 para K_C .

A partir dos valores de CIN e de *Echi* para cada dia e horário determinou-se a iluminância no ponto P (E_P) a partir da equação 4 (ABNT, 2005a).

$$E_P = \frac{CIN \times Echi}{100} \quad \text{(Equação 4)}$$

3.3.2 Análise por meio de simulação computacional

As análises de simulação computacional foram desenvolvidas por meio do programa gratuito *ReluxDesktop* (RELUX, 2018). Determinou-se a iluminância para o ponto P centralizado no ambiente, convencionando-se P1 e P4 para a localização do ambiente ao 1º e 4º pavimento, respectivamente. Adicionalmente, determinou-se a medição da iluminância externa no poço de luz em um ponto localizado acima da platibanda. O céu considerado foi variado e sua influência analisada, já que o programa não permite seleção do tipo de céu da forma como foi estabelecido pela norma. O programa apresenta 2 tipos de céu: claro e encoberto e 3 tipos de turvamento de céu para seleção: baixo, médio e alto. Sabe-se que diversas consultorias que fazem simulações ponto-no-tempo para o atendimento à norma consideram o céu encoberto para suas análises. Considera-se, no entanto, que um céu com 50% de nuvens apresenta distribuição de luminâncias mais semelhante ao de um céu claro do que aquela de um céu encoberto. E que a nebulosidade de 50%, conforme indica a norma, poderia ser representada pelo turvamento intermediário do céu.

3.3.3 Comparação das iluminâncias externas obtidas no ponto central do piso do poço de luz

Para que se pudesse avaliar a influência do tipo de céu considerado nas simulações computacionais iluminâncias no ponto central do piso do poço de luz foram calculadas pelo método prescritivo e obtidas pelo método de simulação computacional.

3.3.4 Resumo dos parâmetros e análises desenvolvidas

Nesse trabalho foram desenvolvidas 136 análises prescritivas e 144 análises por meio de simulação computacional, totalizando 280 análises (Tabela 3).

Tabela 3 – Resumo das análises de desempenho de iluminação natural

Critério	**Análise prescritiva ABNT 15.575/2013** (Céu com 50% de nuvens)	**Análise prescritiva**	**Simulação computacional**		
Tipo de céu	Céu Intermediário	Céu Claro	I - Céu Claro com Sol CIE	II - Céu claro CIE	III - Céu Encoberto CIE
Turvamento	-	-	Turvamento médio	Turvamento médio	Turvamento médio
Dias analisados	23/04 e 23/10				
Horários	9:30 h e 15:30 h				
Orientações	Norte, Sul, Leste e Oeste				
Diâmetro do poço de luz	D3 (300 cm) e D6 (600 cm)				
Refletância das superfícies	Análise I e Análise II		Análise I		
Total de análises de iluminância no ambiente	64	64	32	32	32
Total de análises de iluminância externa	4	4	16	16	16
Total de análises	136		144		

4. RESULTADOS

4.1 Máscara

Na análise do desempenho da iluminação natural do ambiente localizado no 1º pavimento, observa-se a restrição da visão direta do céu nas duas condições de diâmetro interno do poço de luz (3 e 6 metros), colocando em relevância o papel da reflexão da luz pelas superfícies. Dessa forma, a máscara resultante foi única para essas duas situações de diâmetro do poço (Figura 6). No 1º pavimento, o desempenho da iluminação natural foi resultante da soma das contribuições das componentes refletida externa (CRE) e refletida interna (CRI), o que pode ser observado por meio dos cortes esquemáticos. Dessa forma, ressalta-se o quanto o método do cálculo prescritivo através do ângulo sólido é restritivo na situação de um ambiente voltado para o poço de luz. Nas condições do modelo desse estudo, a componente celeste (CC) contribui apenas para iluminação da unidade localizada no 4° pavimento.

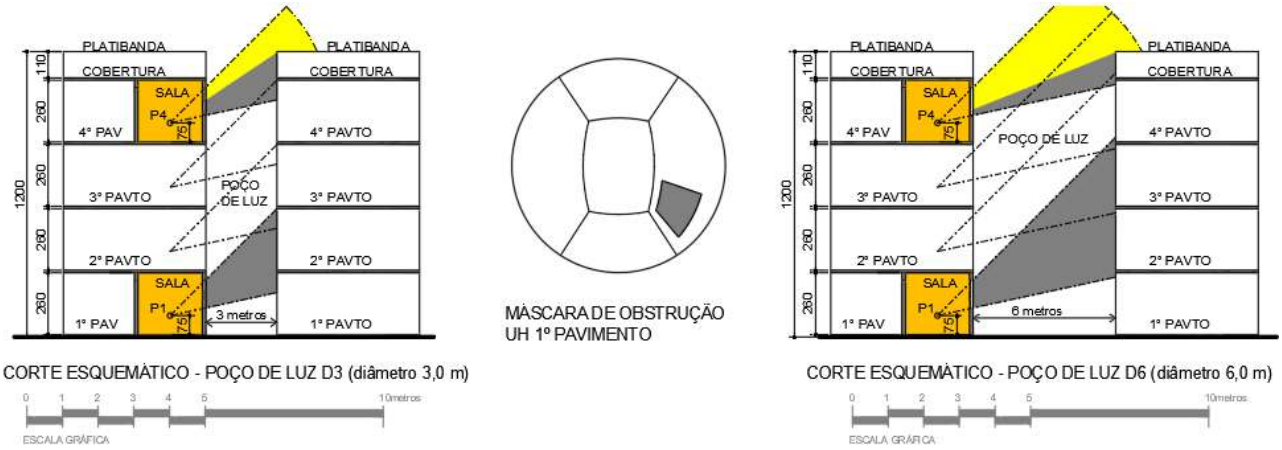


Figura 6- Máscara de obstrução do 1º pavimento e cortes esquemáticos para o ambiente (sala) voltado para o poço de luz com diâmetros (D) de 3 e 6 metros.

4.2 Resultados de iluminância externa

As iluminâncias externas foram determinadas pelo método da NBR 15.215-2/2005, e na simulação computacional sendo considerando um ponto acima do plano da cobertura, sendo obtidos resultados diversos entre os métodos utilizados. Observa-se que os resultados levantados pelo método prescritivo foram superiores aos da simulação computacional tanto para céu Claro quanto para céu Encoberto (Tabela 4), com exceção do Céu Claro com Sol CIE (simulação I) que apresentou valores muito superiores aos demais. Nesse sentido, entende-se que, de forma a uniformizar os resultados, a revisão da norma NBR 15.575, caso mantenha uma análise ponto-no-tempo, deve considerar incluir uma especificação precisa do tipo e das condições de céu a ser usado de forma a orientar os procedimentos para a simulação computacional.

Tabela 4 –Iluminâncias externas (lux)

	Método prescritivo segundo NBR 15.575/2013			**Simulação Computacional** (Condição de céu com turvamento médio)		
Dia e horário	**Altura solar (º0)**	**Céu Claro**	**Céu Intermediário**	**I - Céu Claro com Sol CIE**	**II - Céu claro CIE**	**III - Céu Encoberto CIE**
23/04 9:30h	41	13 778	29 523	56 700	9 710	14 600
23/04 15:3h	30	10 500	22 500	36 000	7 970	9 880
23/10 9:30h	42	14 052	30 111	71 400	10 400	18 000
23/10 15:30h	51	16 320	34 972	44 200	8 790	11 700

4.3 Análises prescritivas

A Figura 7 apresenta os resultados de 64 análises realizadas pelo método prescritivo para o ambiente localizado no 1º pavimento, comparando as condições de refletâncias I e II para céu Claro. Nela verifica-se que, apesar de haver aumento do nível de iluminação quando refletâncias maiores são adotadas, este aumento não é suficiente para que se atinja o valor mínimo de 48 lux. Como esperado, os resultados de iluminância interna para o céu Intermediário (Figura 8) foram superiores aos resultados para céu Claro, devido à maior disponibilidade de luz difusa externa neste tipo de céu. Apesar de haver melhoria do desempenho luminoso no modelo de poço com D6 em relação a D3, essa melhoria não implicou no atendimento global do ambiente

considerando o nível mínimo de 48 lux para o 1º pavimento, exigido pela NBR 15.575/2013. Esse resultado é condizente com Bolssoni, Laranja e Alvarez (2018) e leva a uma crítica de que as condições de geometria estabelecidas para os poços de luz pelos códigos de obra, baseadas em diâmetro mínimo (m) e/ou área (m²), não estão aptas a habilitar um poço de luz a iluminar ambientes residenciais localizados no nível térreo. O nível de 48 lux foi alcançado apenas para 2 de 64 observações para céu Intermediário. A alteração da refletância das superfícies (análises I e II) resultou em um incremento da iluminância média de 79% para as condições de céu Claro e de 81% para céu Intermediário, com maior incremento relativo ocorrido na orientação Leste. Essa análise é relevante principalmente para os edifícios consolidados, que podem utilizar-se de modificação nas cores de revestimentos das superfícies internas do poço, onde não é mais possível a modificação da geometria do poço de luz ou do tamanho da janela. Adicionalmente, verificou-se a ineficiência do atendimento ao critério da geometria da janela, correspondente à 1/6 da área do piso conforme exigido pelo Código de Obras municipal, para atender ao nível mínimo de desempenho de iluminação natural da NBR 15.575/2013 para as condições do modelo analisado.

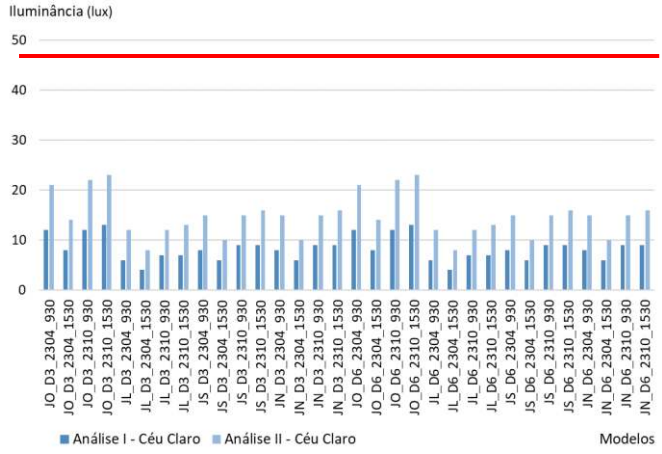


Figura 7 – Método prescritivo - resultados de iluminância no ponto P1 para as análises I e II para Céu Claro

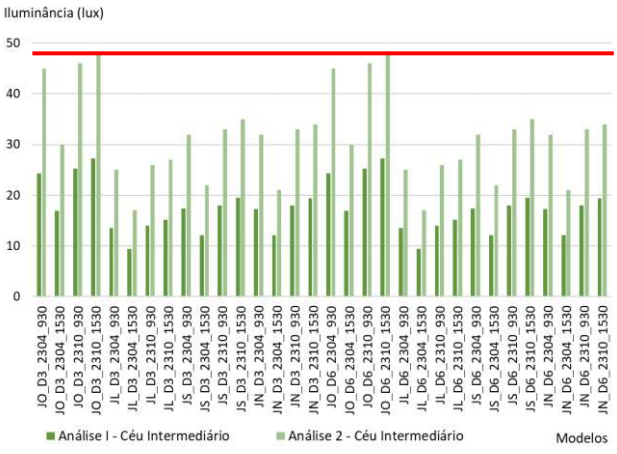


Figura 8 - Método prescritivo - resultados de iluminância no ponto P1 para as análises I e II para Céu Intermediário

4.4 Análise Simulação Computacional

Os resultados de iluminância no ponto P alcançados por meio de simulação computacional, apresentados nas Figuras 9 e 10, mostraram-se diferentes dos resultados obtidos pelo método prescritivo, tal como relatado por Guidi *et al.* (2018).

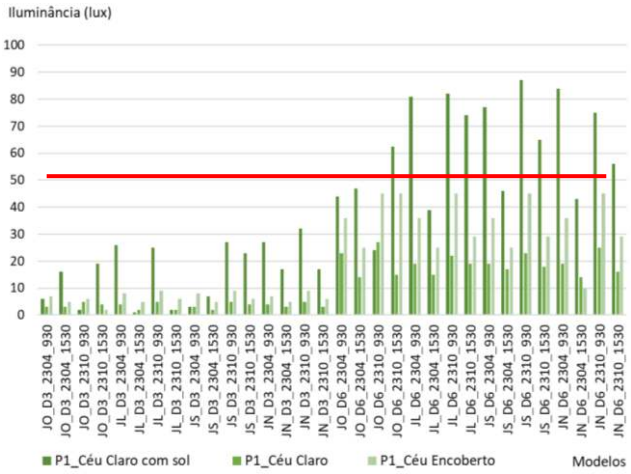


Figura 9 –Simulação computacional - resultados de iluminância no ponto P1 (1º pavimento) para a análise I para Céu Claro com Sol, Céu Claro e Céu Encoberto

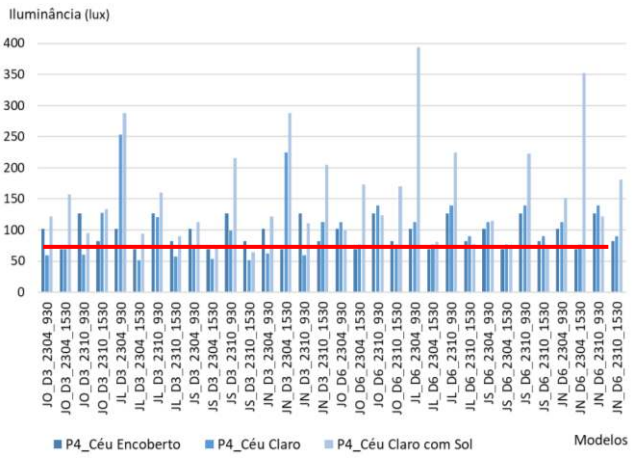


Figura 10 – Simulação Computacional - resultados de iluminância no ponto P4 (4º pavimento) para a análise I para Céu Claro com Sol, Céu Claro e Céu Encoberto

A observação de resultados de iluminância do ponto P muito inferiores no ambiente do 1º em relação ao do 4º pavimento confirmaram os resultados de Leal e Leder (2018). Diferentemente dos resultados pelo método prescritivo, os resultados da simulação computacional para o 1º pavimento apresentaram que o alargamento do poço de D3 para D6 melhoram significativamente o desempenho da iluminação natural, no entanto, não

foram suficientes para o atendimento ao nível mínimo de iluminância de 48 lux, exigido pela NBR 15.575/2013.O nível de 48 lux foi alcançado no 1º pavimento em apenas 9 das 96 observações em condições de poço de luz com D6 e apenas para céu Claro com Sol, o que reforça a ineficiência do poço de luz para o desempenho luminoso em ambientes no 1º pavimento em edifício com 4 ou mais pavimentos (Figura 9). Tem-se ainda que o método prescritivo da norma não estabelece se a avaliação deve levar em consideração a presença de sol, indicando apenas o uso da NBR 15.215. A consideração da presença de sol implicaria em cálculos mais complexos para o método prescritivo. No 4º pavimento, o desempenho de 60 lux foi alcançado em 93 de 96 observações, incluindo as análises para céu Encoberto, resultado que configura como factível o atendimento aos requisitos da NBR 15.575/2013. Ainda assim quando o céu Claro sem a presença de sol é considerado, houve situações nas quais não se atendeu aos parâmetros normativos. Nessa situação considera-se que houve a correspondência do dimensionamento da janela proposto pelo Código de Obras (1/6 da área do piso) com a ocorrência de um desempenho luminoso mínimo (Figura 10). Verificou-se ainda que as condições de céu impactaram mais os resultados do que a alteração de orientação da janela.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo partiu de uma situação recorrente em assentamentos habitacionais onde ambientes de permanência prolongada são dispostos com janela voltada para poço de luz. Analisou-se então o desempenho de iluminação natural de ambiente de sala inserido em um edifício com 4 pavimentos, compatível com uma tipologia do PMCMV, localizado em Belo Horizonte - MG. Foram desenvolvidas análises para ambientes com janela voltada para o poço de luz localizados no 1º e no 4º pavimento a partir da metodologia prescritiva e por simulação computacional através do programa *ReluxDesktop*. Nesse estudo foram desenvolvidas 136 análises pelo método prescritivo e 144 análises por simulação computacional, totalizando 280 análises. Os resultados de iluminância foram comparados com o nível de desempenho luminoso mínimo estabelecido pela norma NBR15.575/2013. Adicionalmente, aponta-se a clara necessidade de revisão dos parâmetros de iluminação pelo Código de Obras municipal.

Espera-se que os resultados contribuam com a revisão da norma NBR15.575/2013, indicando que os ambientes localizados no 1º pavimento e voltados para poço de luz apresentam, como esperado, baixo desempenho luminoso. As análises comparativas dos níveis de iluminância externa mostraram que no 1° pavimento há sempre pouca disponibilidade de luz natural no poço, ocasionando reduzido desempenho luminoso no ambiente. O alargamento do diâmetro do poço de 3 para 6 metros não apresentou melhoria significativa das condições da iluminação natural no ambiente interno, o que acontece apenas na elevação vertical do ambiente para os pavimentos superiores.

A norma NBR15.575/2013 apresenta tipo e condições de céu diferentes daqueles apresentados na norma de referência metodológica, NBR 15.215-parte 2/2005, levando a necessidade de reinterpretações para o desenvolvimento das análises de desempenho. Ademais, acredita-se que a NBR 15.575/2013 deveria contemplar em sua revisão as condições metodológicas para a realização de simulação computacional (e não apenas método prescritivo) para a análise do desempenho de iluminação natural, visto o avanço metodológico uma vez que seus algoritmos consideram a interreflexão da luz das superfícies internas e externa, bem como o crescimento de aplicações desse método pela literatura e pelo mercado, dada a disponibilidade de programas para esse fim.

Verificou-se ainda que a definição da cor das superfícies no projeto arquitetônico apresenta impacto significativo nos resultados de desempenho luminoso. A adoção de superfícies internas e externas com refletância de 80% (branco neve) pode incrementar esse desempenho em aproximadamente 80%, em relação a refletâncias entre 50-60%, principalmente em condições em que não há contribuição da componente celeste e há elevada contribuição da componente refletida interna e externa, como é o caso de ambientes voltados para poço de luz.

O estudo traz uma contribuição relevante ao Código de Obras municipal de Belo Horizonte. Por meio de método reconhecido por normas brasileiras, o estudo apresentou que os poços de luz com diâmetro de 6 metros, localizados em edifícios de 4 pavimentos em Belo Horizonte, não fornecem quantidade de luz natural, equivalente ao nível mínimo de desempenho estabelecido pela NBR 15.575/2013, para o interior de ambientes de permanência prolongada, situados no 1º pavimento, providos de janelas com geometria correspondente a 1/6 da área do piso. O poço de luz com diâmetro de 3 metros permitiu apenas ao ambiente localizado ao 4º pavimento, e com as mesmas condições da geometria da janela, atender ao desempenho mínimo de iluminação natural conforme estabelecido pela NBR 15.575/2013. Dessa forma, considera-se necessário que o regulamento municipal de Belo Horizonte desenvolva análises para reavaliar os parâmetros dos códigos de obras com impacto potencial sobre a admissão da luz natural, para que os ambientes residenciais de

permanência prolongada, sob qualquer condição, possam ser servidos por iluminação natural em quantidade mínima. Diante do exposto, é importante clarificar que não há analogia entre os resultados oriundos de "*atender as dimensões mínimas de abertura em um ambiente*" e de "*atender ao desempenho de iluminação natural*", uma vez que se referem a grandezas diferentes. As dimensões mínimas de aberturas resultam em uma grandeza correspondente à área (*e.g.*, m²), enquanto atender ao desempenho de iluminação natural está relacionado à grandeza da iluminância *(e.g.*, lux) bem como de outras grandezas derivadas ou métricas (*e.g.*, lux/m²; lux/hora/ano).

Por fim, propõe-se que futuros estudos investiguem as condições do desempenho luminoso de ambientes de permanência prolongada localizados em edifícios multipavimentos, com janelas voltadas para o poço de luz considerando as dimensões mínimas de janela estabelecidas pelos códigos de obras municipais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15215-2**: Iluminação natural - Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 15215-3**: Iluminação natural - Parte 3: Procedimentos de cálculo para determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. 4 ed. Rio de Janeiro, 2013b.

ARAÚJO, I.A.L.; BITTENCOURT, L.S. Relação entre dimensões de janela e piso para iluminação natural e eficiência energética em edificações no trópico úmido. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.22, n.4, p. 121-135, out./dez. 2018.

BOLSSONI, G.C.; LARANJA, A.C.; ALVAREZ, C.E. Disponibilidade de iluminação natural em ambiente interno orientado para poço de iluminação. **Cadernos POARQ,** Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.

BRASIL ECONÔMICO. Atraso na aprovação do Minha Casa, Minha Vida 2 e rentabilidade maior em projetos de alto padrão motivou recuo no segmento popular São Paulo, mai.2022. Disponível em: Economia - iG @ https://economia.ig.com.br/empresas/comercioservicos/construtoras-se-voltam-para-media-e-alta-renda-no-1-trimestre/n1300120126360.html. Acesso em: 13 mai. 2019.

BUGEAT, A.; BECKERS, B.; FERNÁNDEZ, E. Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting an redirecting approaches. **Solar Energy**, 207, p.1434-1444, 2020.

GOOGLE MAPS. Conjunto Habitacional Bolivar de Freitas em Belo Horizonte. Disponível em: https://www.google.com/maps/search/belo+horizonte+e+conjunto+habitacional/@-19.8232076,-43.958547,92a,35y,339.47h,51.09t/data=!3m1!1e3. Acesso em: 23 mar. 2023.2023a.

_____. Conjunto Habitacional Residencial Mangueiras em Belo Horizonte. Disponível em: https://www.google.com/maps/search/belo+horizonte+e+conjunto+habitacional/@-19.959182,-43.9846613,144a,35y,257.16h,44.99t/data=!3m1!1e3. Acesso em: 23 mar. 2023. 2023b.

GUIDI, C. R.; ABRAHÃO, K. C. DE F. J.; VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G. DE. Influência dos parâmetros urbanísticos e da topografia na admissão da luz natural em edifícios residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 49-66, jul./set. 2018.

LEAL, L.Q.; LEDER, S.M., Iluminação natural e ofuscamento: estudo de caso em edifícios residenciais multipavimentos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.18, n.4, p. 97-117, out./dez.2018.

LEDER, M.S.; PEREIRA, F.O.R.; CLARO, A. Janela de céu preferível: proposição de um parâmetro para controle da disponibilidade de luz natural no meio urbano. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.8, n.1, p. 89-104, jan./mar.2008.

MARDALJEVIC, J. Rethinking daylighting and compliance. **Journal of Sustainable Design and Applied Research**, v. 1, n.3, p. 1-11, 2013.

_____. The implementation of natural lighting for human health from a planning perspective. **Lighting Research and Technology**, 2021; 53:p. 489-513.

OSIBONA, O.; SOLOMON, B.D.; FETCH, D. Lighting in the home and health: a systematic review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2021, 18(2):609. doi: 10.3390/ijerph18020609. PMID: 33445763; PMCID: PMC7828303.

PBH. PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Lei nº 9.725**, de 15 de julho de 2009, que institui o Código de Edificações do Município de Belo Horizonte e dá outras providências, Anexo III. **Diário Oficial do Município**, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-belo-horizonte-mg. Acesso em: 23 mar.2019.

PORTAL DA RMC. Programa Minha Casa Minha Vida em Monte-Mor atinge 70% de obras concluídas. Campinas, 02/2016. Disponível em: http://www.portaldarmc.com.br/noticias-da-regiao/2016/02/programa-minha-casa-minha-vida-em-monte-mor-atinge-70-de-obras-concluidas/. Acesso em: 13 mai. 2019.

REINHART, C. Daylighting Handbook I: Fundamentals designing with the sun – Volume I. Ed. Rian Stein. 2014.

_____. Daylighting Handbook II: Daylighting Simulations Dynamic Façades – Volume II. Ed. Rian Stein. 2018.

RELUX. Programa de simulação computacional ReluxDesktop. (2018). Disponível em: https://reluxnet.relux.com/en/relux-desktop.html. Acesso em 03/03/2019.

SCALCO, V. A.; PEREIRA, F. O. R. Método para a avaliação do impacto de edificações no acesso à iluminação natural em vizinhanças urbanas aplicado em cenários virtuais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 169-187, abr./jun. 2016.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi parcialmente realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.