

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

João Pedro de Melo Souza

Iluminação Natural No Poço de luz: Investigando a influência das variáveis
arquitetônicas por meio da simulação computacional paramétrica

Juiz de Fora

2024

João Pedro de Melo Souza

Iluminação Natural No Poço de luz: Investigando a influência das variáveis arquitetônicas por meio da simulação computacional paramétrica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Orientadora: Prof^a Doutora Sabrina Andrade Barbosa

Coorientador: Prof^o Doutor Klaus Chaves Alberto

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Souza, João Pedro de Melo.

Iluminação Natural No Poço de luz: Investigando a influência das variáveis arquitetônicas por meio da simulação computacional paramétrica / João Pedro de Melo Souza. -- 2024.

92 p. : il.

Orientadora: Sabrina Andrade Barbosa

Coorientador: Klaus Chaves Alberto

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2024.

1. Luz Natural. 2. Métricas Dinâmicas. 3. Poço de Iluminação. 4. Simulação Computacional. 5. Conforto Ambiental. I. Barbosa, Sabrina Andrade, orient. II. Alberto, Klaus Chaves, coorient. III. Título.

João Pedro de Melo Souza

Iluminação Natural No Poço de luz: Investigando a influência das variáveis
arquitetônicas por meio da simulação computacional paramétrica

Dissertação apresentada ao PPG
Ambiente Construído, Programa da
Universidade Federal de Juiz de Fora
como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Ambiente Construído. Área
de concentração: Ambiente Construído.

Aprovada em 14 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a) Dr(a) Sabrina Andrade Barbosa
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof Dr Klaus Chaves Alberto
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof(a) Dr(a) Letícia Maria de Araújo Zambrano
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof(a) Dr(a) Giane de Campos Grigoletti
Universidade Federal de Santa Maria



Documento assinado eletronicamente por **Sabrina Andrade Barbosa, Usuário Externo**, em
14/11/2024, às 10:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do
[Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Giane de Campos Grigoletti, Usuário Externo**, em 18/11/2024, às 09:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Klaus Chaves Alberto, Coordenador(a)**, em 12/12/2024, às 19:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leticia Maria de Araújo Zambrano, Usuário Externo**, em 24/01/2025, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2068332** e o código CRC **8DB6C30E**.

Dedico este trabalho à memória de Fredrick G. Banting e John J. R. Macleod, que em 1923 ganharam o prêmio Nobel de medicina por isolar a insulina, o que resultou na possibilidade de continuação da vida de diversas crianças ao longo do século XX e XXI. Eu não teria a chance de produzir este trabalho se eles não tivessem alcançado este feito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Francisca e Pedro pela educação e caráter que me proporcionaram e pelo apoio nos momentos mais difíceis até aqui. Agradeço a minha avó Raimunda, que na sua simplicidade me ajudou com suas “rezas” e seus conselhos. Ao meu irmão, Lucas, eu agradeço o companheirismo. Aos cachorrinhos que tutelo, Sissy e Zigui, eu agradeço o carinho que só quem ama um animal consegue entender. Também agradeço aos meus amigos, especialmente aqueles que dividiram espaço comigo na Associação de Pós-graduandos. Aos meus orientadores, Dra. Sabrina Andrade Barbosa e Dr. Klaus Alberto Chaves, agradeço por tudo que aprendi nesta etapa da vida acadêmica. Além de contribuir com minha formação, meus orientadores também expandiram minha capacidade de pesquisa com incentivo em ser ótimo e não somente bom. Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa e também a empresa *SOLEMMA,inc*, por disponibilizar gratuitamente o software utilizado nesta pesquisa.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Visão Geral da atuação da iluminação natural, vias de atuação e principal influenciado.....	22
Figura 2 – Níveis de iluminância geral para iluminação natural, de acordo com a NBR 15575:2021	25
Figura 3 – Representação gráfica em planta baixa de tipos de poço de luz	28
Figura 4 – Fotografia de estrutura zenital legendada como “ <i>light well</i> ”	29
Figura 5 – Influência da proporção da abertura na entrada de luz do sol no poço....	32
Figura 6 – Diagrama com visão geral da metodologia	40
Figura 7 – Configurações do Modelo Base	41
Figura 8 Grid de sensores posicionados de acordo com a geometria do ambiente .	42
Figura 9 – Critérios de análise a partir das combinações das métricas	45
Figura 10 – Variação da Dimensão da Abertura Superior.....	46
Figura 11 – Variação do Índice de Refletância das Paredes do Poço de luz.....	46
Figura 12 – Variação da P.A.F. (Percentual de Abertura de Fachada).....	47
Figura 13 – Mapa do mundo com os principais eixos latitudinais.....	47
Figura 14 – Gráfico das médias das temperaturas mensais de São Paulo (23°S)....	48
Figura 15 – Radiação Média Mensal na Cidade de São Paulo (23°S)	49
Figura 16 – Carta solar da cidade de São Paulo, Brasil (23° Sul).....	49
Figura 17 – Principais Programas Utilizados na Pesquisa	50
Figura 18 – Fluxo de trabalho do Climate Studio parametrizado no Grasshopper para simulações dinâmicas de iluminação natural.	51
Figura 19 – Diagrama de Distribuição da Radiação Solar Direta Anual nas Paredes do Poço de luz.....	53
Figura 20 – Distribuição de luz natural nas paredes do poço no modelo base	55
Figura 21 – Distribuição do sDA ₃₀₀ nos ambientes com aberturas voltadas a Norte e a Leste do modelo base	57
Figura 22 – Distribuição do ASE 1000 nos ambientes com aberturas voltadas ao Norte, Leste e Sul e Oeste do modelo base.....	59
Figura 23 – Valores de sDA ₃₀₀ em diferentes dimensões geométricas, PAF 20% e refletância 0,50.....	62
Figura 24 – Valores de sDA em diferentes refletâncias. PAF 20% e dimensão geométrica 5m.....	65

Figura 25 – Valores de sDA em diferentes PAF's. Refletância 0,5 e dimensão geométrica 5m.....	67
Figura 26 – Elevação do Poço de Luz Otimizado.....	71
Figura 27 – Digrama de comparação da distribuição do sDA entre o modelo otimizado e modelo base	73
Figura 28 – Diagrama de comparação da distribuição do ASE entre o modelo otimizado e modelo base	74
Figura 29 – Diagrama em corte da distribuição da luz no poço otimizado	79
Figura 30 – Diagrama de comparação entre o modelo base e o modelo otimizado..	80

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores de iluminância por autonomia da iluminação natural.....	24
Tabela 2 – Índice de refletâncias para diferentes cores	41
Tabela 3 – Valores de ASE em diferentes dimensões geométricas (G), PAF 20% e refletância 0,50	63
Tabela 4 – Valores de ASE em diferentes refletâncias. PAF 20% e dimensão geométrica 5m.....	66
Tabela 5 – Valores de ASE1000 em diferentes PAF's. Refletância 0,5 e dimensão geométrica 5m.....	68
Tabela 6 – Valores de sDA ₃₀₀ e ASE1000 no Modelo Otimizado	76
Tabela 7 – Modelo não otimizado com PAF de 20% ao topo.....	78

Lista de Quadros

Quadro 1 – Valores de iluminância por ambiente segundo CIBSE	23
Quadro 2 – Métricas utilizadas nas pesquisas com simulação em iluminação natural	27
Quadro 3 – Dimensões mínimas exigidas de códigos de obra brasileiros para poços de iluminação para ambientes de permanência prolongada	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
sDA	<i>Spatial Daylight Autonomy</i>
ASE	<i>Annual Sunlight Exposure</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
G	Geometria ou Dimensão Geométrica
PAF	Percentual de Abertura de Fachada
MM	Milímetro
M	Metro
KWh/m ²	Kilowatt-hora por Metro Quadrado
Lx	Lux
°C	Celsius
Inc.	<i>Incorporation</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 ILUMINAÇÃO NATURAL: NORMAS E RECOMENDAÇÕES.....	22
2.2 EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	25
2.4 O POÇO DE LUZ COMO ESTRATÉGIA PROJETUAL	27
2.6 O DESEMPENHO DA ILUMINAÇÃO DO POÇO DE LUZ EM FUNÇÃO DAS SUAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS	31
2.6.1 Abertura Superior	31
2.6.2 Refletância das paredes.....	34
2.6.3 P.A.F.- Percentual de Abertura da Fachada.....	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 SÍNTESE DA METODOLOGIA APLICADA NO ESTUDO.....	39
3.2 CONFIGURAÇÕES DO MODELO	40
3.3 CONFIGURAÇÕES DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	42
3.4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS REALIZADAS NO ESTUDO.....	43
3.4.1 Iluminância e Mapa de Radiação Global.....	43
3.4.2 Métricas sDA300 e ASE 1000	43
3.5 CONFIGURAÇÕES DAS VARIÁVEIS ARQUITETÔNICAS.....	45
3.6 CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES.....	47
3.7 SOFTWARES E PLUGIN'S UTILIZADOS	50
3.7.1 Validação do Plugin Climate Studio	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 ILUMINAÇÃO NATURAL NO MODELO BASE	52
4.1.1 Incidência de radiação solar anual nas paredes do poço.....	52
4.1.2 Distribuição da iluminação natural nas paredes do poço	54
4.1.3 Desempenho da iluminação natural no ambiente interno do modelo base	56

4.2 VARÁVEIS ARQUITETÔNICAS E O DESEMPENHO DA ILUMINAÇÃO NATURAL DO AMBIENTE CONECTADO AO POÇO DE LUZ	60
4.2.1 Dimensões geométricas do poço de luz.....	60
4.2.2 Refletâncias das paredes do poço de luz.....	63
4.2.3 Porcentagens de Abertura da Fachada (PAF)	66
4.2.4 Discutindo a iluminação natural nos casos simulados	69
4.3 MODELO OTIMIZADO DO POÇO DE LUZ.....	70
5 CONCLUSÃO	82
5.1 SÍNTESE DO TRABALHO.....	82
5.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	84
5.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
REFERÊNCIAS.....	86

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, que considera sua dimensão de acordo com a altura do edifício sem levar em consideração a influência de cada uma das variáveis arquitetônicas nos ganhos de iluminação natural. Assim, este estudo tem como objetivo principal identificar e comparar a influência de 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 na cidade de São Paulo, Brasil, variando, em casos alternativos, sua dimensão geométrica, a refletância das suas paredes e abertura da janela dos ambientes conectados a ele. Para a avaliação da iluminação natural, foram utilizadas, por meio do software *Climate Studio*, as métricas Iluminância, *Annual Sunlight Exposure (ASE₁₀₀₀)* e *Spatial Daylight Autonomy (sDA_{300/50%})*. O estudo foi conduzido em quatro etapas: i) investigação do percurso da luz pelas paredes do poço; II) verificação da incidência da iluminação natural nos ambientes internos do modelo base; III) investigação da como a variação das configurações arquitetônicas do poço afeta a iluminação dos ambientes e IV) proposição de um modelo otimizado simulado a partir das melhores configurações encontradas no estudo. Como resultados, 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. O modelo otimizado considerou o poço de luz em duas metades, uma superior e outra inferior, admitindo aberturas menores no topo e maiores no fundo. Além disso, foi aplicado uma superfície de alta refletância nas paredes e uma abertura superior de 7m. Este modelo resultou em uma melhor distribuição da iluminação pelo poço. Espera-se que os métodos e resultados deste trabalho possam contribuir com a investigação da iluminação natural em edificações.

Palavras-chave: Luz Natural; Métricas Dinâmicas; Poço de Iluminação; Simulação Computacional. Conforto Ambiental.

ABSTRACT

The light well is an architectural resource used to promote daylighting from the core of the building. It is often designed according to an index that considers its size according to the height of the building without taking into account the influence of each of the architectural variables on the gains in daylighting. Thus, the main objective of this study is to identify and compare the influence of architectural variables on the natural lighting performance of a light well in a residential building. To this end, a base model of a light well in the city of São Paulo, Brazil, was parametrically simulated, varying, in alternative cases, its geometric size, the reflectance of its walls and the window opening of the rooms connected to it. To evaluate natural lighting, the metrics Illuminance, Annual Sunlight Exposure (ASE1000) and Spatial Daylight Autonomy (sDA300/50%) were used through the Climate Studio software. The study was conducted in four stages: i) investigation of the path of light through the walls of the well; ii) verification of the incidence of natural lighting in the internal environments of the base model; iii) investigation of how the variation in the architectural configurations of the well affects the lighting of the environments and iv) proposal of an optimized model simulated from the best configurations found in the study. As a result, it was found that this negatively affects the lighting in the internal environments, since those at the top remain excessively illuminated, while those at the bottom do not receive adequate natural light. It was also found that increasing reflectance is a solution that improves the distribution of natural lighting without increasing the levels of direct sunlight, while increasing the geometric dimension results in greater direct sunlight reaching the well, not exceeding the fourth floor. To minimize the risk of visual discomfort in the environments, the windows should have a smaller opening in the upper half and a larger one in the lower half of the light well. The optimized model considered the light well in two halves, one upper and one lower, allowing for smaller openings at the top and larger ones at the bottom. In addition, a high-reflectance surface was applied to the walls and a 7m upper opening. This model resulted in a better distribution of lighting through the shaft. It is expected that the methods and results of this work can contribute to the investigation of daylighting in buildings.

Keywords: Daylight; Dynamic Metrics; Light Well; Computer Simulation.
Environmental Comfort.

1 INTRODUÇÃO

Esta seção introduz o tema apresentando a justificativa, objetivos e estrutura da dissertação.

1.1 Justificativa do tema

A iluminação natural é extremamente importante para a vida humana, uma vez que a luz solar é responsável por estimular o corpo a produzir vitamina D, regular o ritmo circadiano e promover a esterilização do ambiente por meio da radiação ultravioleta (Wirz-Justice *et al.*, 2020; Duffy *et al.*, 2009). Outro benefício é sua capacidade de proporcionar economia de energia no edifício ao substituir a iluminação artificial (Balabel *et al.*, 2022; Wong, 2017). Em edificações residenciais, a quantidade mínima de iluminação natural deve estar entre 100 e 300lux (CIBSE, 2002). Esses valores são considerados suficientes para a realização de atividades como leitura. No entanto, é possível que o espaço ainda necessite da complementação da iluminação artificial, dependendo da necessidade do usuário NBR 15575 (ABNT, 2021).

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. O entendimento sobre as variáveis arquitetônicas que influenciam o desempenho da luz natural no ambiente construído não é suficiente para satisfazer as lacunas deixadas pelas normas e códigos de obras (Albuquerque e Amorim, 2012). Neste contexto, são necessárias mais pesquisas para enriquecer e ampliar as evidências empíricas sobre o tema. Essas devem ser realizadas em diferentes localidades, sobretudo no hemisfério sul, onde existem poucos estudos que abordam a otimização de elementos que influenciam a iluminação natural (Mangkuto *et al.*, 2016). Entre as estratégias de projeto que são comumente utilizadas para promover a entrada da iluminação natural dentro das edificações está o poço de luz.

Diversas nomenclaturas têm sido usadas para se referir ao Poço de Luz, que dependendo da norma ou da localidade do código de obra, pode ser chamado de: “Fosso de Iluminação”, “Poço de Iluminação” “Prisma de Iluminação e Reentrâncias”, “Vão de aeração”, “Área principal” (Bolssoni *et al.*, 2018). Para esta pesquisa, será adotado o termo Poço de Luz, que é uma das traduções do termo em inglês

“LightWell”. Em termos construtivos, o poço de luz pode ser definido como um vazio verticalizado no núcleo do edifício, com paredes revestidas em acabamento de alta refletância, servindo para iluminação, ventilação e resfriamento dos ambientes conectados a ele (ABNT, 2003; CIBSE, 2002; Farea *et al.*, 2014; Lamberts *et al.*, 2014). Desde que devidamente projetado, seu uso se justifica como uma alternativa sustentável para a obtenção de iluminação natural em edifícios de planta profunda com reduzida área de fachada voltada para rua, que o torna um importante recurso arquitetônico em uma realidade urbana de adensamento demográfico e verticalização das construções (Freewan, 2014; Kristl e Krainer, 1999).

O poço de luz tem sido investigado com o objetivo de melhorar o seu desempenho no conforto térmico e lumínico das edificações. Alguns dos estudos têm concentrado a investigação sob um ou mais objetivos, como por exemplo na verificação do desempenho térmico e da capacidade de renovação do ar de edifício servidos por ele (Nada e Said, 2018; Chow *et al.*, 2001); no desempenho da ventilação e da iluminação natural ou somente da iluminação natural (Ahadi *et al.*, 2017).

De acordo com a ABNT (2021), a necessidade de iluminação natural pode ser adequadamente atendida desde que o projeto da edificação leve em consideração a correta inserção de poços de ventilação e iluminação. Dessa forma, o projeto do poço deve ser realizado cuidadosamente a fim de garantir o conforto dos usuários dentro da edificação. A relação entre a altura do edifício e a largura do poço é calculada em uma proporção que permite uma maior entrada de luz à medida que o poço se torna mais profundo. Essas dimensões são dadas por uma fórmula matemática, chamada de índice, geralmente definida pelos códigos de obra, que variam conforme a localidade (Bolssoni *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2022).

Neste sentido, esta pesquisa se justifica pela necessidade de otimizar a captação da luz natural por meio do poço de luz verificando os impactos de suas variáveis arquitetônicas, uma vez que seu funcionamento ainda não está totalmente esclarecido e seu desempenho ainda não é satisfatório, o que resulta em uma iluminação natural insuficiente na porção inferior e excessiva na porção superior do edifício (Goharian *et al.*, 2022; Bugeat *et al.*, 2020; Ahadi *et al.*, 2018).

1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é analisar a influência de variáveis arquitetônicas, como dimensão geométrica, refletância e PAF (Percentual de Abertura de Fachada), no desempenho da iluminação natural de um poço de luz de uma edificação, propondo melhorias por meio de simulações computacionais paramétricas.

Para alcançar o objetivo geral, se faz necessário os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar com se dá a distribuição da luz natural nas paredes de um poço de luz.
2. Avaliar diferentes combinações de variáveis arquitetônicas (dimensões, refletâncias de parede e áreas de abertura das janelas) na iluminação natural no poço de luz.
3. Propor um modelo otimizado de poço de luz a partir dos resultados encontrados por meio das simulações nos passos anteriores.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação divide-se em 5 capítulos: introdução, fundamentação teórica, matérias e métodos, resultados e discussão e conclusão. O primeiro capítulo é a introdução e apresenta o contexto geral dos temas iluminação natural e poço de luz, além da justificativa e objetivos da pesquisa.

O tema iluminação natural é bastante amplo e a função do poço de luz vai além do nome que lhe é dado. Assim, a análise do desempenho do poço é indissociável do conhecimento em iluminação natural. Portanto, o segundo capítulo, que trata da fundamentação teórica, aborda a importância, os valores recomendados e a evolução da análise da iluminação no ambiente construído. Posteriormente, o capítulo se aprofunda nos estudos do desempenho do poço de luz de acordo com suas características arquitetônicas.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia do estudo. São detalhados os procedimentos utilizados na simulação computacional paramétrica. Ainda são demonstradas as configurações no software utilizado, bem como a geometria do modelo base, além das métricas e valores de referência da iluminação utilizados para análise. Também são apresentadas as variáveis arquitetônicas que serão testadas para obtenção dos resultados e o contexto geográfico em será realizada a simulação.

O quarto capítulo apresenta os resultados das simulações de cada variável arquitetônica testada e os discute, relacionando com os achados da literatura estudada. O quinto capítulo apresenta a conclusão, limitações do estudo e proposta para futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os conceitos fundamentais a respeito do tema, estado da arte e discussão teórica entre a bibliografia utilizada na pesquisa

2.1 Iluminação natural: normas e recomendações

A iluminação natural desempenha um papel importante na arquitetura ao exercer múltiplos benefícios nos ambientes internos e na saúde humana. Para Wirz-Justice *et al.* (2020), a luz do sol pode atuar de diversas maneiras na saúde humana, como agente regulador do ritmo circadiano, agente redutor do risco de miopia, na produção de vitamina D e liberação de neurotransmissor “GABA”, um importante antidepressivo (Figura 1).

Figura 1 – Visão Geral da atuação da iluminação natural, vias de atuação e principal influenciado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024) - Adaptado de Wirz-Justice *et al.* (2020).

O trabalho de Heschong (2002) demonstra que o projeto arquitetônico que prioriza a captação de luz natural para dentro do ambiente interno resulta em economia de energia ao minimizar a dependência da luz artificial no edifício. Esta economia pode chegar a 20% dos custos energia elétrica. Adicionalmente, Dubois (2001) sugere que a iluminação natural pode ser otimizada utilizando sistema de controle de acionamento da iluminação artificial, o que garante um ambiente visualmente confortável sem perder em eficiência energética.

Segundo Boyce (2003), a luz natural é indispensável para regulação dos ritmos circadianos dos seres humanos, influenciando o sono e o humor. O autor considera

que o conforto visual é relativo e surge da percepção do espaço pelo usuário a partir da ausência de desconforto visual. Uma pessoa pode experimentar desconforto visual quando o ambiente não fornece luz adequada, ou quando a luz em determinada área é insuficiente para realização de alguma atividade. Nessa última, se fundamenta o conceito de desempenho lumínico a partir da superfície de trabalho (Boyce, 2003). Os autores Edwards e Torcellini, (2002) complementam o estudo de Boyce (2003) ao ratificar que no ambiente corporativo iluminados pelo sol, o nível de estresse e fadiga dos ocupantes é menor, o que resulta no aumento da concentração e produtividade nas atividades laborais. A luz natural é capaz de produzir um efeito positivo no humor e na saúde fisiológica das pessoas (Madan *et al.*, 2024).

A intensidade de luz natural que incide em um ambiente depende da localização desse. Em ambientes abertos, em dias ensolarados, os valores de iluminação natural alcançam de 20.000 até 100.000 lux, e reduzem para valores muito inferiores nos ambientes internos, ainda mais se distantes das janelas (Wirz-Justice *et al.*, 2020). Apesar da importância da luz natural para a vida humana, é necessário um equilíbrio da intensidade da iluminação para que seja eficiente, mas que não ocasione desconforto no usuário do edifício (Figueiredo e Cavalcanti, 2022). De acordo com CIBSE (2002), os valores ideais de iluminação dependem do tipo e uso atribuído ao ambiente interno (Quadro 1).

Quadro 1 – Valores de iluminância por ambiente segundo CIBSE

Iluminância (lux)	Ambiente	Descrição
> 500 lux	Áreas de Trabalho e Escritórios	Ideal para áreas de trabalho geral, garantindo que os funcionários tenham luz suficiente para realizar tarefas detalhadas e administrativas
300-500 lux	Salas de Aula	Recomenda-se essa faixa para garantir que os alunos tenham luz suficiente para ler e escrever, promovendo um ambiente de aprendizado eficaz
300-500 lux	Salas de Reunião e Conferência	Para garantir visibilidade adequada durante as apresentações e discussões
100-300 lux	Áreas de Recepção e Lobbies	Proporciona um ambiente acolhedor e seguro para visitantes e funcionários
100-300 lux	Ambiente Residencial	Variável dependendo de se é uma área de estar comum ou um espaço para leitura e outras atividades
100-200 lux	Áreas de Circulação	Suficiente para corredores, escadarias e outras áreas de circulação onde a quantidade de detalhes finos que precisa ser vista é menor

Fonte: CIBSE (2002).

No entanto, Mardaljevic *et al.* (2012) analisam a capacidade de autonomia da luz natural, ou seja, de atender a maior parte das necessidades do usuário sem a necessidade de acionar luz artificial. Para os autores, a iluminação natural ideal no ambiente residencial acontece a partir de 300 até 3000 lux¹ e acima desse valor, pode gerar desconforto visual e aquecimento indesejado do ambiente. Com isso, os autores propõem faixas de iluminância para avaliar a autonomia da iluminação natural (Tabela 1).

A definição de um valor máximo para a autonomia da luz natural gera discordâncias no tema. Shen e Tzempelikos (2012) consideram que o valor máximo 1000 lux no ambiente é suficiente para atender ao conforto visual e térmico. A *Illuminating Engineering Society*, através da norma LM-83-12, também consideram que valores acima de 1000 lux de luz natural podem elevar os riscos de desconforto do usuário no espaço interno (IES, 2012).

Tabela 1 – Valores de iluminância por autonomia da iluminação natural

Iluminância (lux)	Descrição
300 < 3000	Autonomia da luz natural para todas as atividades
> 3000	Risco de desconforto visual e térmico
100 < 300	Autonomia parcial da iluminação natural
< 100	Necessidade de suplementação com luz artificial

Fonte: Mardaljevic *et al.* (2012).

No Brasil, a recomendação para iluminação natural nos edifícios é dada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. A NBR 15575:2021, que trata do desempenho das edificações habitacionais é uma das normas que regulamenta o tema. Essa norma tem força de lei e apresenta como proposta promover a eficiência energética e conforto dos ocupantes do edifício construído. No entanto, os valores sugeridos são inferiores aos normatizados por CIBSE (2002), IES (2012) e Mardaljevic *et al.* (2012), conforme Figura 2. A norma estipula o mínimo de iluminação natural que pode ser complementada pela luz artificial. Além disso, é uma norma que atualiza a NBR 15575:2013 (ABNT, 2013) mas avançou pouco nas definições da qualidade da iluminação natural. Os valores apresentados na Figura 2 devem ocorrer no ambiente construído, independentemente do método usado para cálculo.

¹ O estudo de Mardaljevic *et al.* (2012) atualiza seu estudo anterior, de 2005, realizado em coautoria com Nabil A, cuja definição do valor máximo de luz natural no ambiente era recomendada em 2000 lux (Nabil A, e Mardaljevic J., 2005).

Outras normas também regulamentam a iluminação, como a NBR 15215:2024, que trata dos procedimentos para cálculo da iluminação natural no ambiente (ABNT, 2024). Porém, está última, pela sua jurisdição local, e não internacional, é menos abrangente.

Figura 2 – Níveis de iluminância geral para iluminação natural, de acordo com a NBR 15575:2021

Dependência	Iluminância geral (lux) para o nível mínimo de desempenho M
Sala de estar Dormitório Copa/cozinha Área de serviço	≥ 60
Banheiro Corredor ou escada interna à unidade Corredor de uso comum (prédios) Escadaria de uso comum (prédios) Garagens/estacionamentos (demais ambientes)	Não requerido
* Valores mínimos obrigatórios, conforme método de avaliação de 13.2.2.	
NOTA 1 Para os edifícios multipiso, são permitidos, para as dependências situadas no pavimento térreo ou em pavimentos abaixo da cota da rua, níveis de iluminância ligeiramente inferiores aos valores especificados na tabela acima (diferença máxima de 20 % em qualquer dependência).	
NOTA 2 Os critérios desta tabela não se aplicam às áreas confinadas ou que não tenham iluminação natural.	
NOTA 3 Deve-se verificar e atender às condições mínimas requeridas pela legislação local.	

Fonte: Retirado de NBR 15575:2021 (ABNT, 2021).

2.2 Evolução dos Métodos de Análise da Iluminação Natural

Nas primeiras fases desta área de investigação, os estudos focavam-se principalmente em modelos físicos e medições empíricas. Esses modelos em escala eram submetidos a céus artificiais para examinar e quantificar a luz no espaço. Alguns trabalhos pioneiros, como o de Hopkinson *et al.* (1966), foram fundamentais na definição dos princípios essenciais da iluminação natural. Uma das principais contribuições desse estudo foi o embasamento para a criação da métrica 'Daylight Factor' (DF). Essa métrica quantifica a proporção de luz natural que penetra no interior de um edifício em comparação com a luz externa. O DF tornou-se uma métrica-padrão

para a avaliação da iluminação natural, sendo amplamente utilizada em análises e projetos arquitetônicos para garantir a eficiência e o conforto visual dos espaços internos.

Posteriormente, com o avanço tecnológico, surgiram métricas mais eficazes, mas que dependiam de simulações computacionais para que fossem aplicadas. Destaca-se na utilização de simulações computacionais as métricas estáticas e 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 (Bellia *et al.*, 2017). Já as simulações dinâmicas, chamadas de “*climate-based daylight modelling*” (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).

As métricas dinâmicas podem ser mais eficazes do que métricas estáticas na avaliação da luz natural no ambiente construído. Estudos que utilizam *CBDM* (“*Climate-Based Daylight Modelling*”) permitem que os projetistas considerem variáveis climáticas, como nebulosidade do céu real baseado em dados meteorológicos locais, resultando em análises mais precisas (Rasteghari *et al.*, 2023). Assim, as métricas baseadas no CBDM foram aprimoradas ao longo dos anos 2000 à medida que se tornava necessário tornar a simulação da iluminação natural mais realista, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Métricas utilizadas nas pesquisas com simulação em iluminação natural

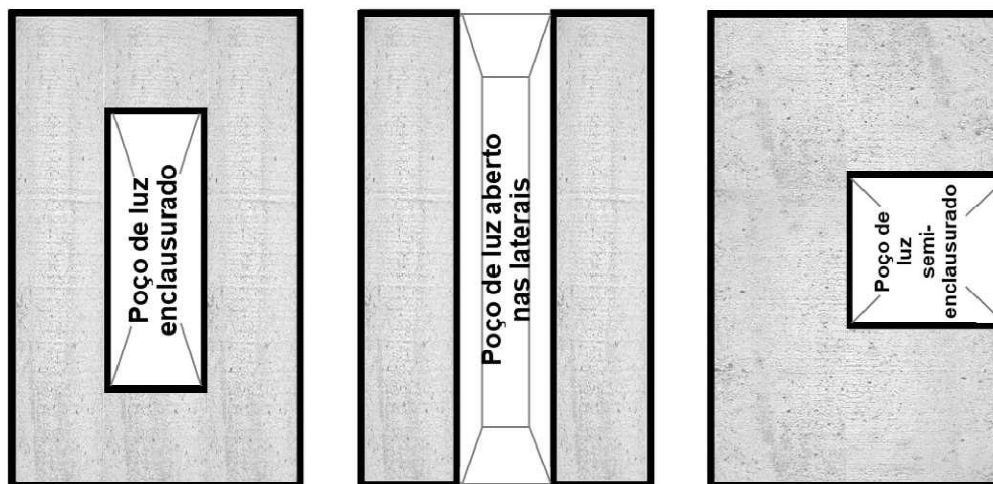
Métrica	Conceito	Vantagens	Desvantagens
<i>Daylight Factor (DF)</i>	Estabelece uma proporção da quantidade de luz interna comparada à externa sob determinado céu.	Método mais simples e fácil para calcular a iluminância.	Condições estáticas que não levam em consideração as variáveis climáticas. Pontual no tempo, como uma fotografia.
<i>Daylight Autonomy (DA)</i>	Mede a porcentagem de horas em que a iluminação natural é suficiente para atender aos requisitos de iluminação interna sem a necessidade de iluminação artificial.	Alinhada com os princípios de design sustentável, promovendo o uso de recursos naturais e ajudando a cumprir os requisitos de certificações ambientais, como <i>LEED</i> e <i>BREEAM</i> .	Considera um conjunto fixo de condições climáticas, o que pode não refletir adequadamente as variações reais ao longo do ano.
<i>Continuous Daylight Autonomy (CDA):</i>	Semelhante ao DA, mas leva em consideração a variação da luz natural ao longo do dia, e não somente quantidade de luz no horário de ocupação.	Maior fidelidade dos resultados em relação a métrica DA.	Cálculo mais complexo que DA, O que pode tornar a simulação computacional mais lenta
<i>Useful Daylight Illuminância (UDI):</i>	Define faixas de níveis de iluminância para determinar a quantidade de tempo que um espaço atende a esses requisitos com iluminação natural.	Avalia a utilidade da luz natural. Considera variações climáticas ao longo do ano.	Subestima alguns valores que podem ser úteis para determinadas atividade.
<i>Spatial Daylight Autonomy (sDA)</i>	Porcentagem de uma área que recebe um nível mínimo de iluminação natural por pelo menos 50% do horário de ocupação definido.	Usa de dados climáticos reais e considera a variação meteorológica ao longo do ano	Os resultados dependem da precisão das condições meteorológicas reais
<i>Annual Sunlight Exposure (ASE)</i>	Mede a porcentagem de uma área que recebe mais de 1000 lux durante mais de 250 horas por ano. Avalia o risco de desconforto devido à exposição excessiva ao sol.	Avalia o conforto visual, considerando a variação do clima ao longo do ano.	Pode subestimar a necessidade de luz em climas predominantemente nublados por considerar apenas a luz direta do sol.
<i>Daylight Glare Probability (DGP)</i>	Mede a chance de ofuscamento em um ambiente, considerando a posição do observador.	Método simples e fácil	Os resultados requerem precisão nas medições e simulações.

2.4 O Poço de Luz como Estratégia Projetual

O poço de luz é um elemento arquitetônico projetado em diversos locais, em ambos os hemisférios, para promover a iluminação e a ventilação dos ambientes localizados no núcleo ou mesmo nas laterais dos edifícios com uma das faces abertas para um lote vizinho (Figura 3). Usualmente, sua forma geométrica é de um prisma de base quadrangular ou retangular, delimitado por paredes e janelas, resultando em um espaço vazio na planta, com abertura ao topo, por onde acontece a entrada de luz,

troca de ar e carga térmica (Lamberts, 2014). Em alguns casos, também possui abertura no piso, que favorece a ventilação do edifício (Ahadi *et al.*, 2018).

Figura 3 – Representação gráfica em planta baixa de tipos de poço de luz



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nesse sentido, o poço de luz se torna um recurso extremamente importante, especialmente em cidades onde a urbanização resulta na verticalização das construções e na pouca disponibilidade de luz natural do edifício. (Freewan *et al.*, 2014). O poço de luz também reúne características de outros elementos usados para iluminação zenital. Martins (2011) afirma que o poço de luz se assemelha ao duto de luz, um dispositivo tubular com abertura zenital, por onde a luz entra e é direcionada para dentro do edifício por meio dos materiais reflexivos que compõem sua superfície interna. Nesse sentido, suas limitações também são similares.

Adicionalmente, o poço de luz pode ser comparado com o átrio ao possuir forma e funções semelhantes. O átrio também é definido como um espaço envolvido por paredes, com uma abertura zenital, cuja função é iluminar e ventilar os ambientes internos da edificação (Goulding *et al.*, 1992). A quantidade de luz que entra no espaço do átrio dependerá da geometria definida pela sua relação largura x profundidade (Mohsenin e Hu, 2015). O mesmo fato ocorre com o poço de luz (Goharian *et al.*, 2022). De acordo com Lamberts *et al.* (2014) e Goharian *et al.* (2022) o poço de luz é um átrio de proporções menores, diferenciado desse por não possuir uma ocupação do seu espaço. Em contrapartida, Kotani *et al.* (2003) consideram no seu estudo que o poço de luz também pode se constituir de um espaço útil com corredores no seu perímetro interno. Philips (2004), no seu livro “*Daylighting. Natural Light In*

Architecture”, também associa o poço de luz a um espaço tubular. Conforme a Figura 4, a legenda indica que a estrutura zenital circular é um poço de luz, ainda que suas laterais sejam completamente abertas e integradas a um espaço de ocupação transitória. Assim, na literatura, os conceitos de poço de luz e átrio podem convergir entre si, pois os dois elementos arquitetônicos compartilham características que os tornam estruturas quase idênticas. Portanto, é possível obter uma análise similar do desempenho do poço de luz e do átrio (Goharian et. al, 2022).

Figura 4 – Fotografia de estrutura zenital legendada como “*light well*”



Entrance lobby with circular light well
 Fonte: Retirado de Phillips, D. (2004).

As características do poço de luz normalmente são definidas de acordo com normas ou códigos (Quadro 3). No Brasil, os códigos de obra locais determinam características como a geometria, dimensões e proporções de maneira geral utilizando um índice (Bolsoni, 2018). Este modo de projetar o poço tenta compensar a profundidade pelo aumento da abertura por meio de uma equação matemática. Dessa forma, à medida que o poço de luz se torna mais profundo ele se torna mais largo e assim, espera-se que a luz consiga penetrar na porção mais profunda. A depender da legislação local, o critério de proporção para o poço de luz fixará um valor mínimo para um dos lados, a fim de evitar um estreitamento que o tornaria inútil.

A fórmula possui poucas variações de cidade para cidade. Em São Paulo, Brasil, uma das exigências do código de obra é que o poço de luz tenha dimensão mínima de 1,5 m e relação mínima entre os seus lados igual a dois terços (Lei

1.6642/2017, São Paulo, Brasil, 2017). Em Belo horizonte, Juiz de Fora, Rio de Janeiro a dimensão mínima também é de 1,5 m. Nestes casos, o que varia é o restante da fórmula matemática para calcular as dimensões do poço de luz.

Ainda assim, alguns estudos brasileiros apontam a ineficácia destas fórmulas para compensar a iluminação natural perdida ao longo da profundidade do poço de luz (Bolssoni *et al.*, 2018; Leite *et al.*, 2024). Outros estudos, internacionais, reconhecem as falhas dos códigos de obras locais em prever uma única fórmula para o poço de luz, e propõem melhorias que vão além de um índice (Ahadi *et al.*; 2017 Ahadi *et al.*; 2018; Bugeat *et al.*, 2020; Goharian *et al.*, 2022).

Quadro 3 – Dimensões mínimas exigidas de códigos de obra brasileiros para poços de iluminação 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: <ul style="list-style-type: none"> 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: Adaptado de Leite *et al.* (2024) e Bolssoni *et al.* (2018).

Quanto a sua forma, o poço de luz pode assumir dois tipos de geometria, uma que permite a inserção de um retângulo e outra quadrada. Existe ainda outras formas pouco usuais de projetar o poço de luz, como por exemplo, com forma geométrica cilíndrica. Ahadi *et al.* (2017) afirmam que a forma geométrica cilíndrica aplicada ao poço é eficaz ao permitir que uma maior quantidade de feixes de luz ocupe o espaço interno do poço. No entanto, os autores destacam que este tipo de modelo apresenta restrições arquitetônicas, estruturais e econômicas que dificultam a execução do projeto arquitetônico.

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 e Krainer, 1999; Bugeat *et al.*, 2020). Assim, não somente o correto dimensionamento do poço, mas também os materiais que revestem suas superfícies podem aumentar a disponibilidade de luz natural nos ambientes conectados a ele, minimizando os prejuízos à saúde humana (Martins, 2011).

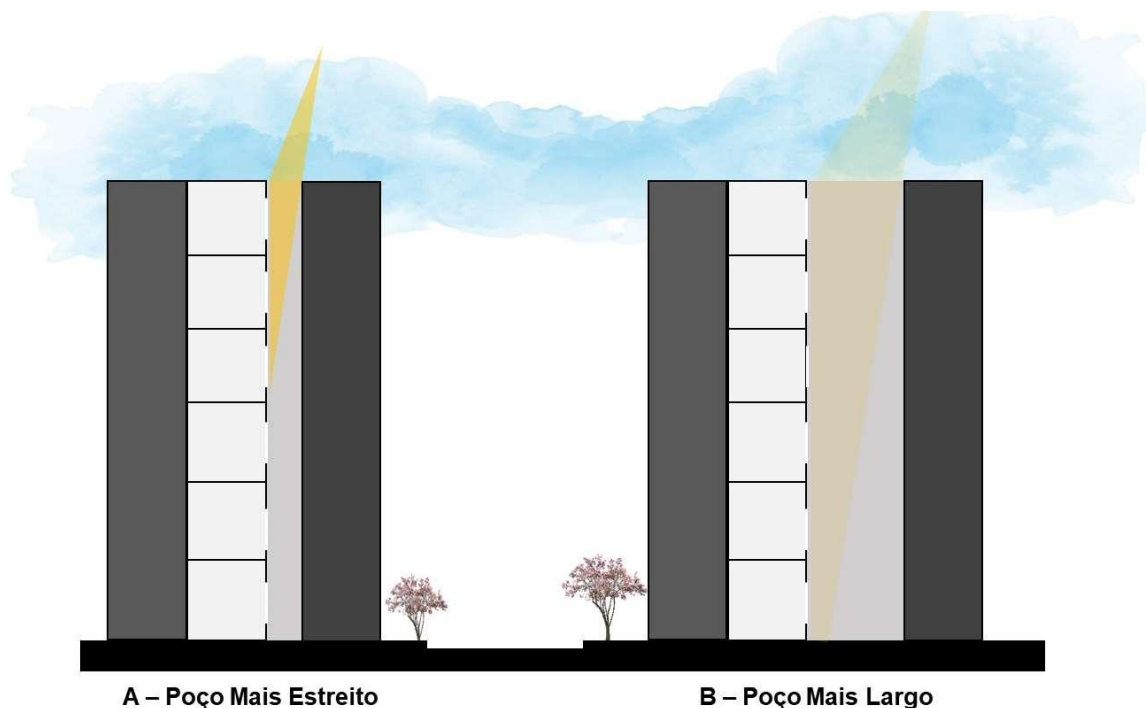
2.6 O Desempenho da Iluminação do Poço de luz em Função das suas Variáveis Arquitetônicas

Esta seção aprofunda a discussão na literatura a respeito das características arquitetônicas do poço de luz que influenciam a iluminação natural no ambiente interno

2.6.1 Abertura Superior

Assim como em outras estruturas zenitais, a quantidade de luz que entra no poço irá depender do desenho arquitetônico e do clima onde a edificação está implantada, principalmente da dimensão da abertura superior e da posição do sol na abóboda celeste (Lamberts *et al.*, 2014). A Figura 5 ilustra como a dimensão da abertura do poço de luz influencia o alcance da luz direta do sol na porção mais profunda do poço.

Figura 5 – Influência da proporção da abertura na entrada de luz do sol no poço.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Littlefair (2002) argumenta que fórmulas analíticas podem prever com precisão os níveis de iluminação em diferentes geometrias de átrios. Ele propõe o uso de técnicas de simulação para avaliar como a forma dos átrios afeta a distribuição da luz natural, enfatizando a importância da geometria na otimização do design do poço de luz.

Assim, é interessante notar que vinte anos após o estudo de Littlefair (2002), o trabalho de Goharian *et al.* (2022) ratifica a teoria de que a dimensão da abertura da geometria do poço é extremamente importante no desempenho da iluminação natural. Para isso, os autores utilizam simulações computacionais mais eficazes que as utilizadas por Littlefair, apresentando complexidades não observadas antes. Seu estudo, conduzido sob o clima de Teerã, Irã (35°N), leva em consideração o aprendizado de máquina, ou algorítmico evolutivo, para determinar um desenho de poço de luz “ideal” por meio do plug in HoneyBee e Grasshopper. A pesquisa ainda considerou diferentes condições de céu (claro, nublado, nebuloso e chuva intensa) e duas métricas, “iluminância” e “UDI”. Assim, justificam obter resultados mais confiáveis. A pesquisa é conduzida em diversas etapas, cada uma apresentando configurações diferentes do poço. Em todo o estudo, a profundidade máxima do poço é de 21 m e abertura superior variando de 2 a 6 m. Entre as principais contribuições

do estudo, está a constatação de que uma abertura maior do poço oferece uma melhor distribuição de luz no poço. Os autores concluem no estudo que um índice de 2.1 oferece um alcance maior da iluminação na porção mais profunda, enquanto um índice de 10.5 concentra esta iluminação na porção superior. Os valores se referem a divisão da altura do poço pelo índice para determinar a dimensão. Ainda, conforme o estudo, o uso de espelhos na porção superior também melhora a distribuição de luz no poço.

Mohsenin e Hu (2015) observam no seu trabalho resultados similares aos de Goharian *et al.* (2022). No entanto, as métricas utilizadas foram *sDA* e *ASE*. Os autores realizaram simulações sob a Zona Climática 3 dos EUA's, O clima é temperado, considerando a cidade de Carolina do Norte, EUA (35°N). Foram testados diversos tipos de poço de luz, aberto, semiaberto e fechado nas laterais, claraboia superior aberta e fechada. Os resultados do estudo indicaram que um poço de índice 0.5 têm melhor desempenho de iluminação (*sDA*) devido à maior proporção de iluminação natural, mas também apresentam maior risco de excesso de exposição solar (*ASE*), enquanto, enquanto índices de 1 e 2 mostraram uma diminuição no *sDA* mas também no *ASE*, indicando menor risco de ofuscamento, mas também menor desempenho geral de iluminação natural. Os autores concluem que o índice do poço se mostrou um indicador eficaz para caracterizar a proporção desses.

No estudo de Freewan *et al.* (2014), realizado em Irbid, Jordânia, em um edifício de dois pavimentos, um poço de luz de 2x2 m 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 m de profundidade. Porém, para atingir esses mesmos níveis de iluminação natural em um edifício de três pavimentos, foi necessária uma abertura de 3x3 m do poço de luz e, para um edifício de quatro pavimentos, o vão teria de ser 4x4 m. 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 o autor não avaliou os impactos das aberturas e da profundidade do poço maiores que 4x4 m e quatro pavimentos (13 m).

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 ambientes internas conectadas a um poço de luz de 4 m de diâmetro em um edifício de sete 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 m de altura e dimensão geométrica quadrada de 3 m. É relevante notar que essas pesquisas se limitaram a estudar dimensões geométricas de no máximo 3 ou 4 m de vão.

As principais contribuições destes estudos estão na afirmação que a geometria do poço exerce uma influência direta no desempenho do poço de luz. No entanto, conforme afirmado por Goharian *et al.*, (2022) os resultados dependem da latitude estudada. Os métodos também são variados e a maior parte destes trabalhos utilizaram métricas estáticas, que não oferecem mesma precisão que métricas dinâmicas, mais recentes. A determinação de um “índice” também é um fator variável, não sendo possível estabelecer um valor absoluto útil para qualquer poço de luz em qualquer localidade do mundo, pois outros fatores influenciam o seu desempenho, como reflexão das paredes.

2.6.2 Refletância das paredes

O desempenho do poço não depende apenas da quantidade de luz que entra em função da abertura, mas também do alcance e distribuição desta luz para dentro dos ambientes. (Dong *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2024).

Martins (2011) afirma que o poço de luz se assemelha ao duto de luz, um dispositivo tubular com abertura zenital, por onde a luz entra e é direcionada para dentro do edifício através dos materiais reflexivos que compõem sua superfície interna. Nesse sentido, suas limitações também são similares. Dessa forma, é recomendado que suas superfícies possuam acabamento de alta refletância (ABNT, 2003).

“A eficiência do duto de luz é limitada de acordo com o seu desenho e propriedades físicas dos materiais. Não é possível coletar mais luz do que a incidente na abertura externa. Como a luz deve chegar por meios de reflexão, a distância e o material irão influenciar fortemente os resultados.” (MARTINS, 2011, p.62)”.

A capacidade de reflexão de um material depende principalmente das características físicas das superfícies, como rugosidade² ou a cor do revestimento (Lamberts *et al.*, 2014). 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 m), 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°). Ademais, 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 de acordo com Ahadi *et al.* (2018) tendem a ser mais frescos.

Com isso, alguns autores defendem que o poço de luz possui regiões estratégicas para a reflexão da luz. Littlefair (2002) argumenta que a utilização de material com alta refletância nas paredes localizadas na porção superior aumenta a luz refletida até o fundo. No seu trabalho, foram realizadas simulações estáticas em

² “Rugosidade são micro irregularidades geométricas deixadas na superfície do material” (CARPINETTI *et al.*, 2020)

um modelo de átrio no software “*Radiance*” sob céu claro, nublado e intermediário. Utilizou-se para análise a métrica “*Daylight Factor*”. Os autores concluem que paredes superiores com refletância de 80% podem triplicar a autonomia da iluminação natural na porção mais profunda em comparação com paredes com refletância de 50%. Além disso, defendem que a compreensão da linha que divide as áreas que recebem luz direta do sol daquelas que não recebem é fundamental para entender onde a iluminação natural será insuficiente no ambiente interno, necessitando da suplementação da iluminação artificial. Os autores ainda sugerem que os vidros devem possuir um valor alto de transmitância, 80%, para maximizar a entrada de luz natural no ambiente interno.

Assim, Bugeat *et al.* (2020) também considerou no seu estudo que o uso de material espectral no revestimento das superfícies do poço é capaz de conduzir melhor a iluminação natural até a parte mais profunda. Neste sentido, embora o autor considere a reflexão difusa como importante para a distribuição da luz no espaço interior, ele também conclui que no poço de luz estreito, o uso de superfícies espelhadas torna-se obrigatória em razão da potencialidade superior da reflexão espectral frente ao desempenho da reflexão difusa. Ainda de acordo com o estudo, estas superfícies espelhadas podem ser posicionadas perpendicularmente à parede superior do poço, que recebe maior quantidade de luz solar direta, ou por meio de dispositivos instalados acima da claraboia, posicionados em um ângulo previamente calculado para promover uma melhor captação e reflexão da luz até o térreo. A proporção do ganho de iluminação natural utilizando superfícies especulares, como espelhos, e superfícies com materiais difusos, como parede branca, é de respectivamente 30 e 05 vezes se comparados ao uso de materiais escuros. O estudo, porém, não esclarece se o uso de espelhos dentro do vão do poço é eficaz ao conforto térmico. Uma preocupação manifestada por Joudi *et al.* (2013), que argumentam que 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.

Apesar das contribuições destes trabalhos para o entendimento da reflexão da luz pelas paredes do poço, alguns pontos não estão totalmente esclarecidos. Um deles é como o uso de superfícies de alta refletância pode impactar o conforto visual e térmico dentro do poço. Deve-se pensar em material alternativo aos “espelhos”, uma

vez que podem não ser viáveis do ponto de vista econômico no projeto do poço de luz.

2.6.3 P.A.F.- Percentual de Abertura da Fachada

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 e Cheung, 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 da abertura e com paredes internas revestidas de acabamento com refletância de 0,70.

Com isso, percebe-se que os critérios para definir a qualidade da iluminação natural variam em função do material utilizado como referência, seja uma norma ou um estudo científico. Portanto, torna-se importante definir de forma criteriosa o método a ser utilizado na avaliação da iluminação natural para garantir a qualidade do projeto do edifício. No entanto, conforme afirmado por Goharian *et al.*, (2022) os estudos neste tema ainda são escassos. Existe uma concentração de estudos sob os climas do hemisfério norte e sob métricas já obsoletas. Mesmo Goharian *et al.* (2022) e

Bugeat et. al. (2020), que estudam diferentes latitudes, fazem a maior parte das simulações sob climas do hemisfério Norte. No tema iluminação natural, ainda é necessário estudos com métodos contemporâneos e levando em consideração as latitudes do hemisfério sul, conforme afirma Albuquerque e Amorim (2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme o exposto por Ahadi *et al.* (2017), a simulação computacional se apresenta com método eficiente para avaliar a iluminação natural sob diferentes condições arquitetônicas e climáticas. Neste estudo, além da simulação computacional, destaca-se a parametrização do modelo virtual. Esta proposta gera um número maior de resultados em relação a modelos não parametrizados, por consequência, aumenta-se a precisão das análises.

3.1 Síntese da metodologia aplicada no estudo

A Figura 6 apresenta a metodologia geral aplicada no estudo. Um modelo base de poço de luz foi criado virtualmente. Na sequência, este modelo foi configurado e submetido às simulações virtuais de iluminação natural. Resultados sobre a iluminação no ambiente foram gerados a partir das variações nas configurações do modelo. Assim, foi possível comparar estes resultados para analisar a influência de algumas das características arquitetônicas e climáticas do poço de luz sobre luz natural dentro dos ambientes conectados a ele.

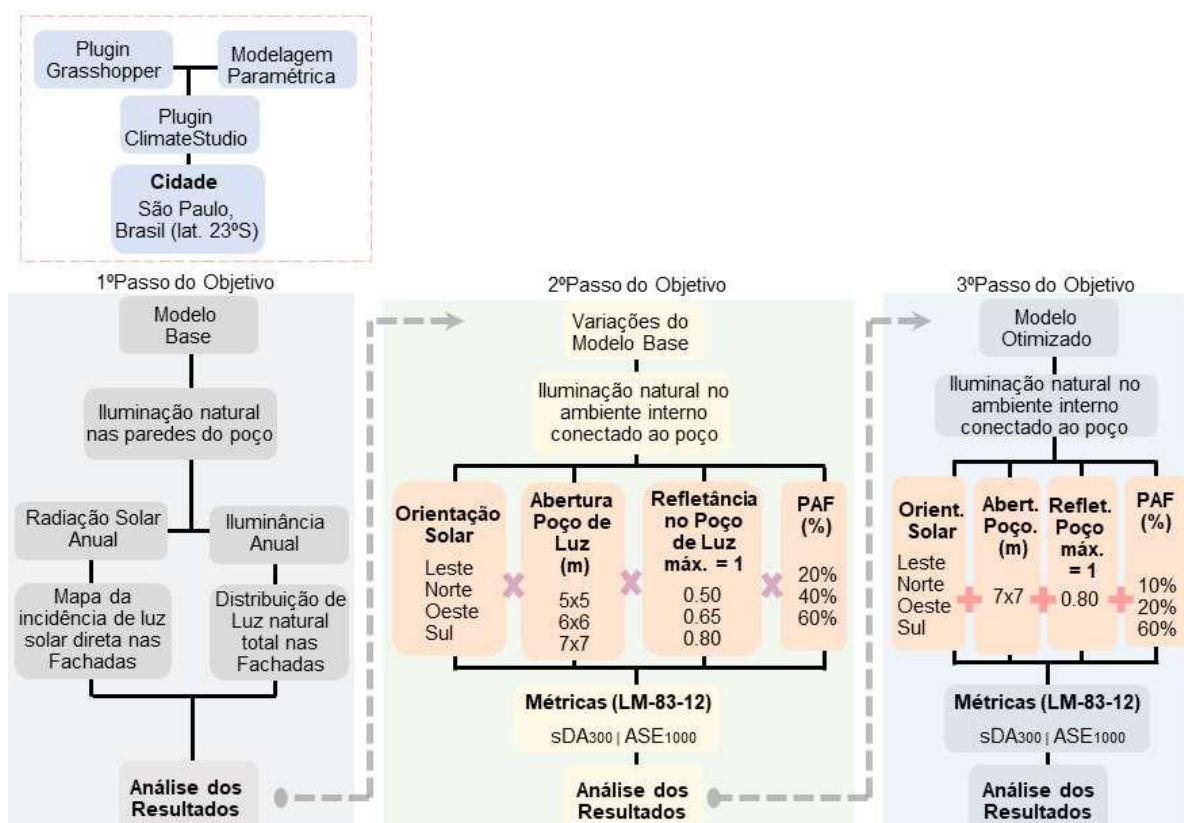
O primeiro passo do método atende o primeiro passo do objetivo. A iluminação natural foi simulada nas paredes do poço e na porção interna do ambiente conectado a ele. Dessa forma, foi gerado um diagrama de incidência de luz solar direta nas fachadas e outro diagrama de distribuição de luz natural nas fachadas. Posteriormente, foram gerados diagramas de distribuição da luz natural na superfície de trabalho do ambiente interno. Dessa forma, foi possível analisar o comportamento da luz natural em seu trajeto pelo poço de luz.

O segundo passo do método atende o segundo passo do objetivo. A partir da análise dos resultados do primeiro passo, foram gerados modelos alternativos de poço de luz. Variou-se as configurações arquitetônicas do modelo, como a abertura superior e a refletância das paredes do poço de luz, além do PAF dos ambientes internos. A iluminação natural foi simulada na superfície de trabalho dos ambientes internos. Os resultados foram analisados sob a normatização da LM-83-12 (IES, 2012).

O terceiro passo do método atende o terceiro passo do objetivo. A partir da análise dos resultados do segundo passo, foi gerado um modelo otimizado de poço de luz. As configurações do modelo foram realizadas de forma pontual a partir dos

melhores resultados obtidos nas etapas do método. Sob a normatização da LM-83-12 (IES, 2012), as simulações da iluminação natural no ambiente interno do modelo resultaram em dados que foram analisados, assim, embasando diretrizes projetuais para o desenho do poço de luz estudado.

Figura 6 – Diagrama com visão geral da metodologia



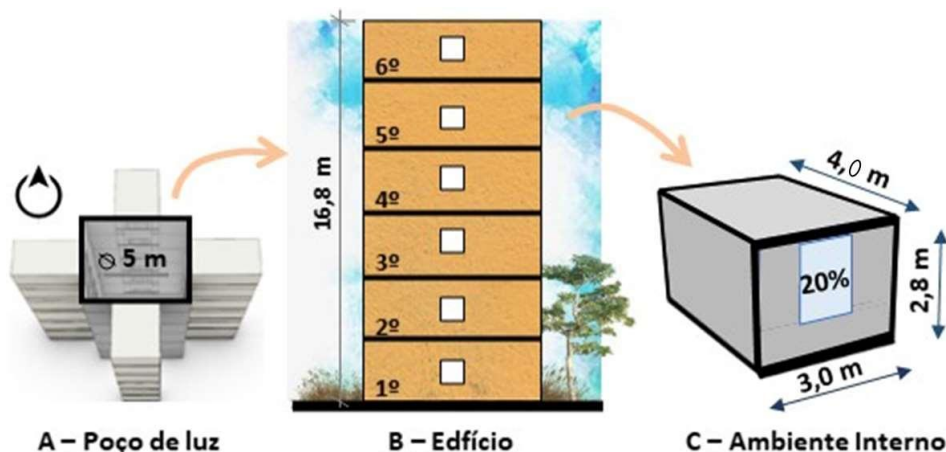
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.2 Configurações do modelo

A Figura 7 apresenta o modelo base usado nesse estudo. As dimensões e geometrias adotadas neste estudo são definidas a partir dos achados detalhados na fundamentação teórica. No modelo, o poço de luz, conectado a quatro ambientes, possui profundidade de 16,8 m. A abertura superior possui formato quadrado de 5 m. Cada ambiente possui dimensões retangulares com 3 m de largura e 4,5 m de profundidade, com área de 13,5 m quadrados. A distância entre o piso e o teto é de 2,8 m. O PAF do modelo base é 20%. As aberturas dos ambientes foram posicionadas

conectadas ao poço de luz sob os pontos cardeais (Norte, Sul, Leste, Oeste), por serem as principais orientações solares.

Figura 7 – Configurações do Modelo Base



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A propriedades física dos materiais das superfícies dos ambientes é fixada conforme Tabela 2. Em todas as superfícies físicas, a reflexão espectral permanece em 0%. A escolha por estas configurações se fundamenta nas recomendações da norma internacional LM-83-12. O nome da cor do material que reveste as superfícies não possui relevância metodológica neste estudo, uma vez que o *software* considera as propriedades físicas do material. Ainda assim, as cores equivalentes das refletâncias também podem ser conferidas da Tabela 2, que está de acordo com o trabalho de Castro *et al.* (2002). É importante destacar que os materiais que compõem todas as superfícies são configurados com valor de rugosidade igual a 0.

Tabela 2 – Índice de refletâncias para diferentes cores

Materiais Opacos			
Superfície	Nome do Material no <i>ClimateStudio</i>	Refletância Difusa	Cor Equivalente (Castro <i>et al.</i> , 2002)
Teto	<i>Ceiling LM8312</i>	70%	Branco Gelo
Paredes	<i>Wall LM8312</i>	50%	Mel
Piso	<i>Floor LM8312</i>	20%	Azul Escuro

Materiais Translúcidos					
Tipo	Folha	Nome do Material	Transmitância	Reflexão	Cor
Vidro	Única	<i>Clear</i>	87,7%	8,4%	

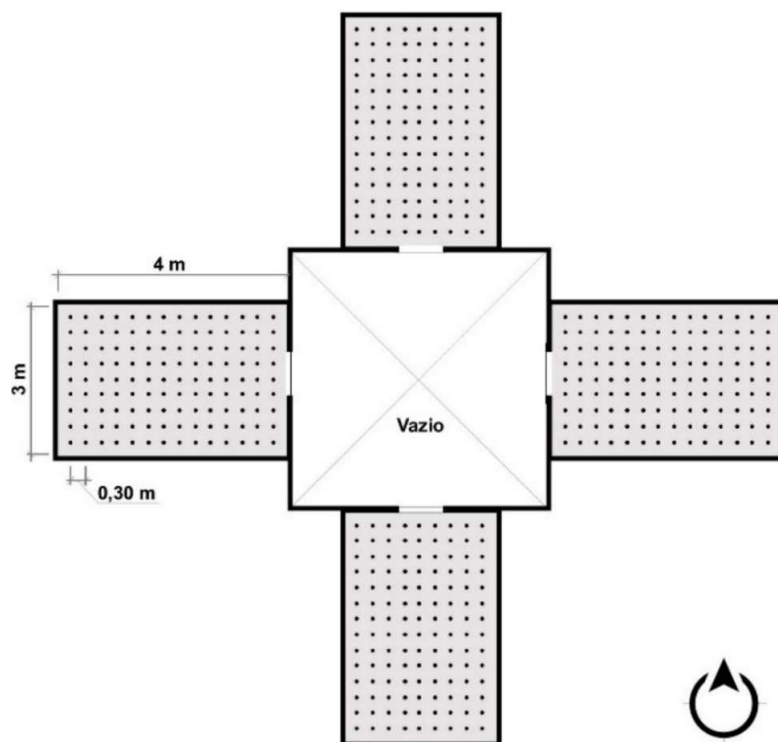
Fonte: Adaptado de Castro *et al.*, 2002; IES, 2012; Sollema INC, 2024.

3.3 Configurações das simulações computacionais

Em todos os ambientes foi posicionado um “grid” virtual de sensores com espaçamento de 0,30 m entre si e altura de 0,75m em relação ao piso (Figura 8). Estes sensores recebem os raios luminosos simulados pelo *plug in ClimateStudio (C.S.)*. Cada sensor foi configurado para receber dez mil raios de luz para aumentar a precisão dos resultados e se aproximar de valores reais. Esta quantidade de amostras é a máxima permitida pelo plugin “*ClimateStudio*” na sua versão combinada com o plugin “*Grasshopper*”, o que torna a simulação mais confiável, porém, mais lenta.

Após a simulação, o *plugin* realiza um cálculo com as informações obtidas e gera resultados, que podem ser números, gráficos ou diagramas. No entanto, em simulações mais complexas, com maior número de resultados, é necessário extrair os dados e utilizar outras ferramentas para análise, como o *software* Excel. O Horário de ocupação é definido entre 8:00 até 18:00 horas. Esse horário de ocupação é determinado pela norma LM-83-12 (IES, 2012), que fundamenta o método. Os parâmetros de “*Radiance*” são definidos como -ab -lw 0.01.

Figura 8 Grid de sensores posicionados de acordo com a geometria do ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.4 Simulações computacionais realizadas no estudo

Esta pesquisa faz uso de simulações dinâmicas para obter melhor acuracidade do método. Inicialmente, usa-se “Mapa de Radiação global” e Iluminância Anual no modelo base, com “*grid*” posicionado nas paredes do poço para verificar a distribuição da luz natural na cavidade. Este é o primeiro passo dos objetivos específicos que busca verificar a distribuição de luz natural nas paredes do poço. Posteriormente são utilizadas as métricas sDA₃₀₀ e ASE₁₀₀₀ para execução da segunda etapa dos objetivos, que investiga a iluminação no ambiente interno conectado ao poço.

3.4.1 Iluminância e Mapa de Radiação Global

O mapa de radiação solar anual permite identificar as áreas do poço com maior incidência de luz solar direta durante todo o ano, assim como outros tipos de radiação. Estes dados são obtidos utilizando informações meteorológicas do arquivo climático durante a simulação.

A Iluminância Anual permite identificar a distribuição da iluminação natural ao longo da cavidade do poço. Nestas simulações, são consideradas todo tipo de iluminação que entra no poço e que eventualmente é refletida pelas paredes. Usualmente, este tipo de simulação é realizado sob escolha de um horário e céu fixo. Porém, nesta pesquisa, é usado um céu dinâmico proveniente do arquivo climático. Os resultados são fornecidos pelo plugin *ClimateStudio*, que realiza uma média com todos os valores de Iluminância ao longo do ano de acordo com o clima escolhido.

3.4.2 Métricas sDA₃₀₀ e ASE₁₀₀₀

Para a análise do ambiente interno com abertura voltada à cavidade do poço, são realizadas simulações dinâmicas. A Tabela 3 apresenta os parâmetros das métricas utilizadas para avaliar o desempenho da iluminação neste estudo. A métrica *spatial daylight autonomy* (sDA, “autonomia espacial da luz do dia”) e *annual sunlight exposure* (ASE, “exposição anual à luz solar”) foram criadas pela IES LM-83 (2012) e tem sido utilizada em estudos recentes (Elbatran e Ismaeel, 2021; Sreelakshmi e Ramamurthy, 2024; Taleael e Sangin, 2024).

Tabela 3 – Parâmetros para análise do sDA₃₀₀ e ASE₁₀₀₀.

sDA_{300/50%}	ASE_{1000/50%}
>55% Aceitável	<10% Aceitável
>75% Ideal	>10% Risco de desconforto

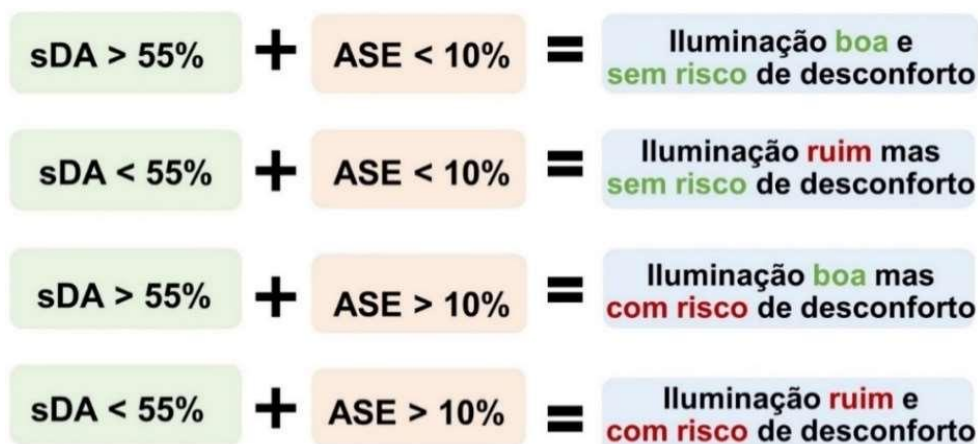
Fonte: IES (2012)

A métrica sDA (sDA_{300, 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 (ASE_{1000, 250 h}) é definida como a porcentagem da área de piso que recebe luz solar direta a partir 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 por excesso de luz natural no ambiente, especialmente nos pavimentos superiores.

Esta pesquisa também faz o uso combinado dessas métricas para permitir uma análise mais precisa da disponibilidade de luz natural ao longo do edifício. Conforme Figura 9, um valor ideal de sDA pode vir acompanhado de ASE excessivo, assim como, um valor ideal de ASE pode ser acompanhado de sDA insuficiente. O ideal é que se encontre um equilíbrio ao comparar as métricas (Mohsenin e Hu, 2015).

Figura 9 – Critérios de análise a partir das combinações das métricas



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

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).

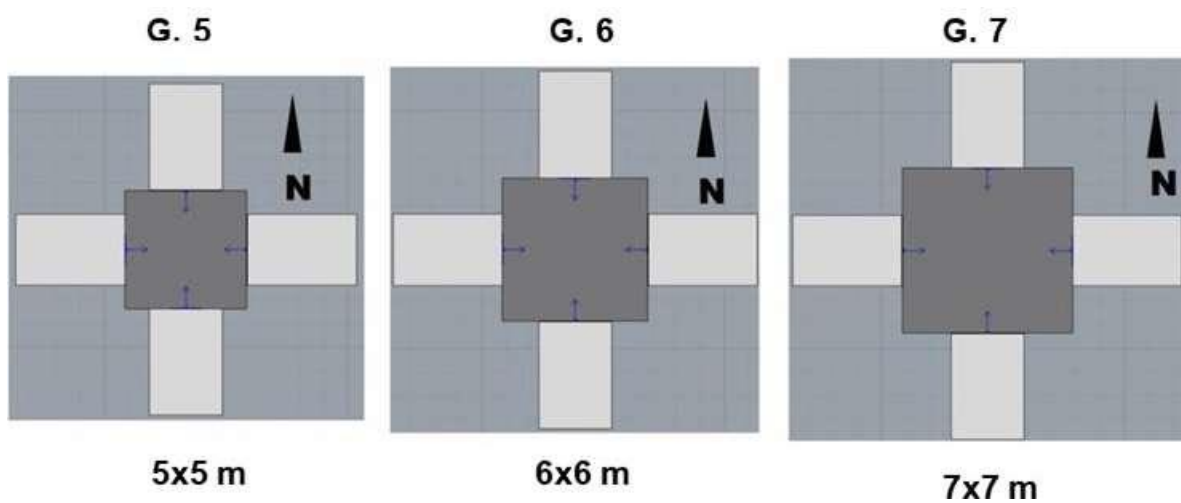
3.5 Configurações das variáveis arquitetônicas

As iluminações em cada ambiente foram calculadas usando modelos dinâmicos de céu com base no arquivo climático³ da cidade de São Paulo, Brasil (L. 23° S).

A partir do modelo base, modelos alternativos foram simulados alternando a configuração de uma das variáveis estudadas (dimensão geométrica do poço de luz, PAF e refletância). Foram simuladas alternativamente dimensões geométricas quadradas de 6mx6m e 7mx7m (Figura 10), índices de refletância das paredes poço de luz em 65% e 80% (Figura 10), e aberturas de janelas correspondentes a 40% e 60% de PAF (Figura 12). A justificativa da variação horizontal do PAF se dá em função da metodologia. Ao fixar o peitoril em 1m e fixar a altura das janelas em 1,71m, evita-se a influência desses na variação do alcance da luz na parte mais profunda do ambiente.

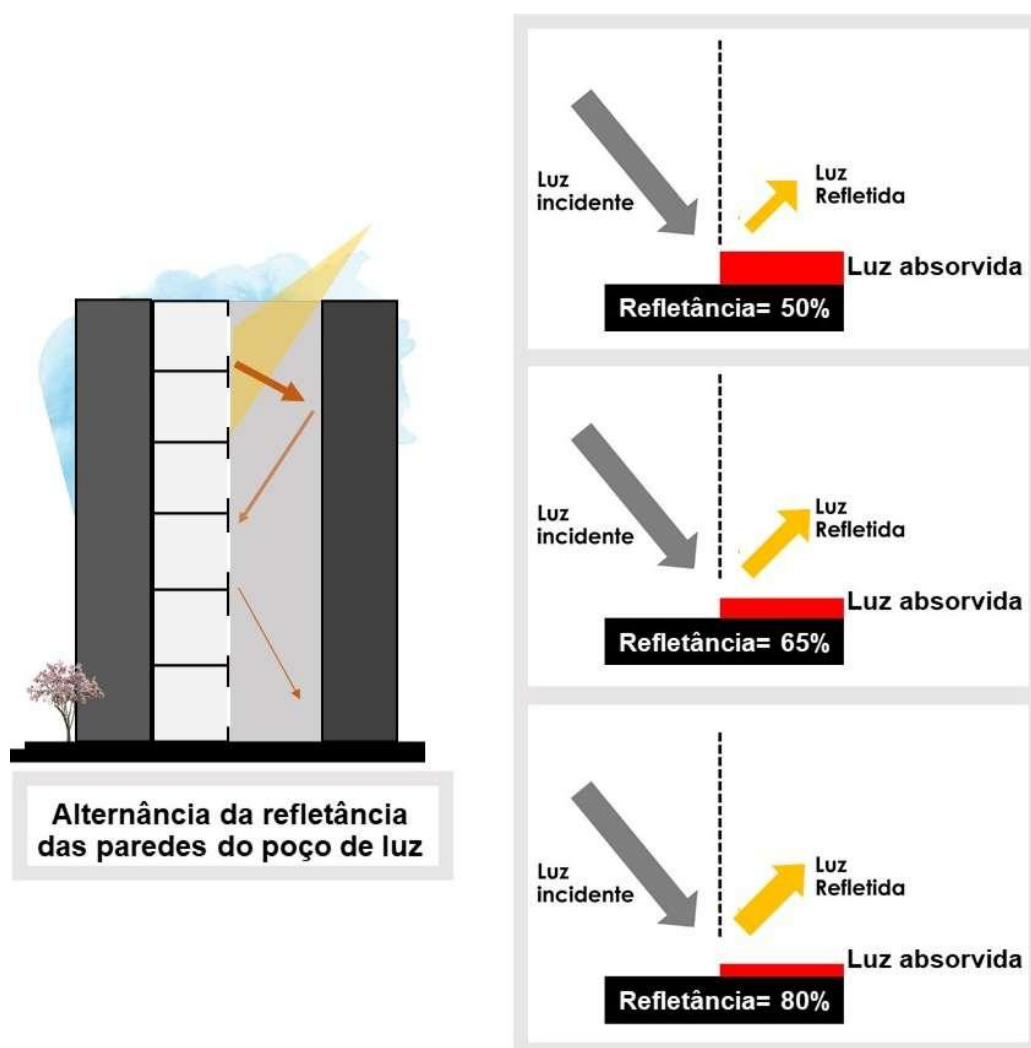
³ A fonte do arquivo climático com os dados meteorológicos da cidade de São Paulo, Brasil, no formato epw., é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e foi disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, vinculado ao Núcleo de Pesquisa em Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Figura 10 – Variação da Dimensão da Abertura Superior



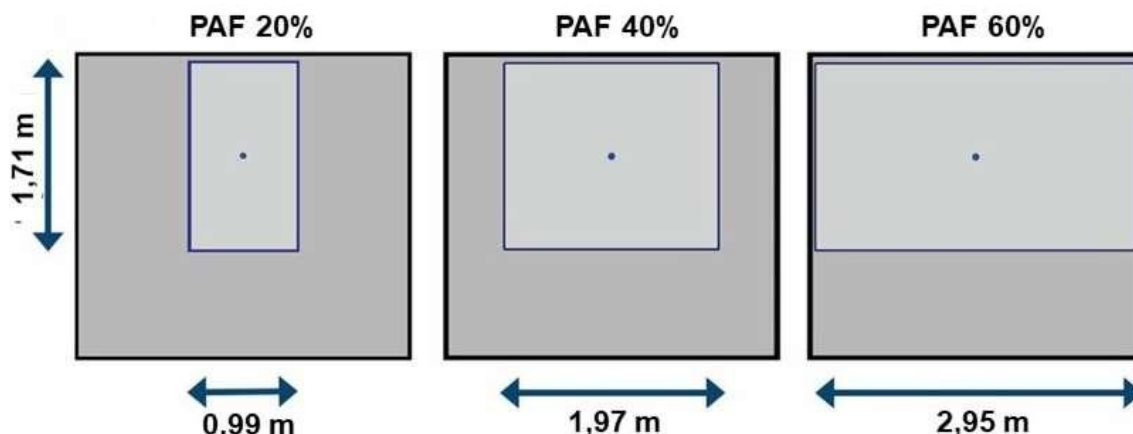
Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

Figura 11 – Variação do Índice de Refletância das Paredes do Poço de luz



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024)

Figura 12 – Variação da P.A.F. (Percentual de Abertura de Fachada)

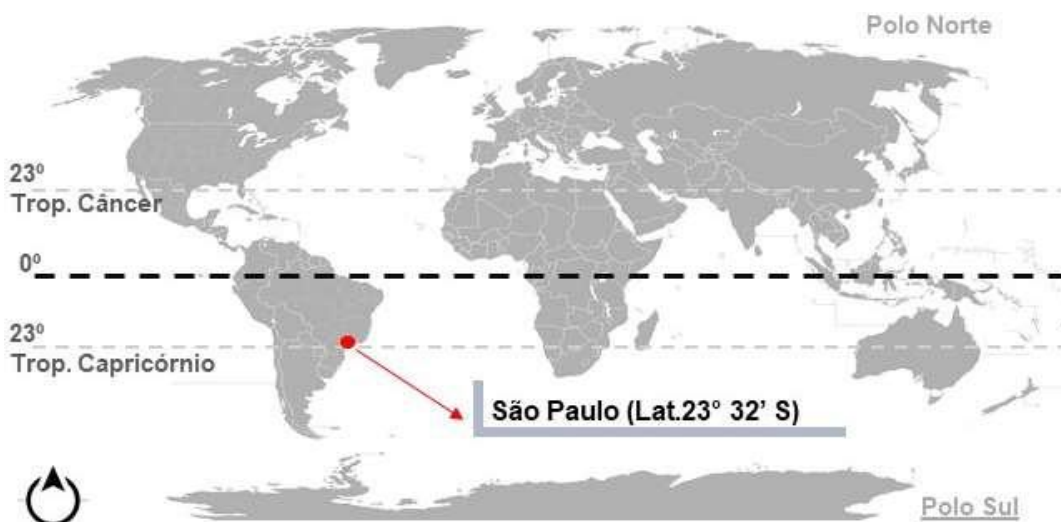


Fonte: Elaborado pelo Autor (2023)

3.6 Caracterização do clima utilizado nas simulações

A Figura 13 apresenta a posição geográfica da cidade de São Paulo, Brasil, (23° S), em função das coordenadas latitudinais no globo terrestre. A metrópole é edificada sob o eixo latitudinal do trópico de capricórnio, considerado latitude intermediária, em que a posição do sol na abóboda celestia é mais baixa em comparação ao eixo do equador (Bedaque e Bretones, 2016). “A posição e ângulo de inclinação solar são responsáveis pelas dinâmicas ambientais que influem nas variações termo pluviométricas, na distribuição da fauna e da flora, assim como no comportamento dos seres vivos [...]” (Siteio, C.L., p. 190, 2019).

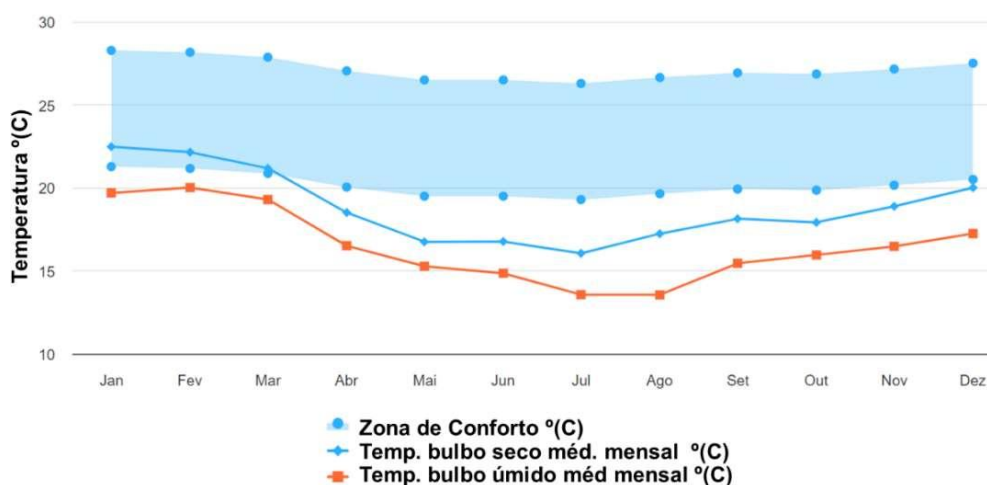
Figura 13 – Mapa do mundo com os principais eixos latitudinais



Fonte – Adaptado pelo autor (2024).

Assim, o clima de São Paulo é classificado como Cwa, subtropical úmido de inverno seco (Koeppen, 1948). A Figura 14 apresenta os dados climáticos da local simulado. Este clima é caracterizado por ser predominantemente úmido, com um inverno seco e verão quente. 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 mm, sendo agosto o mês mais seco com 32,3 mm e janeiro o mês mais chuvoso com 292,1 mm. A variação da temperatura anual vai de 16,4° C a 26,1° C, tendo julho com o mês mais frio com média anual 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).

Figura 14 – Gráfico das médias das temperaturas mensais de São Paulo (23°S)

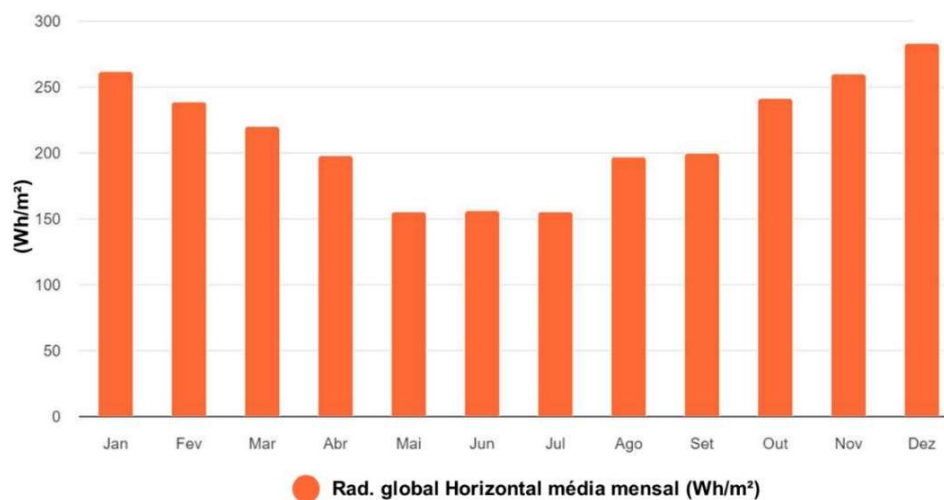


Fonte: Adaptado de PROJETEEE (2024)⁴

Conforme os dados presentes na Figura 15, os meses com maior incidência de radiação solar são outubro, novembro, dezembro e janeiro. Em dezembro a radiação global pode chegar a quase 300 Wh/m². Os meses com menor incidência de radiação são maio, junho e julho, com radiação global próximo a 150 Wh/m².

⁴ O Conteúdo das figuras 14 e 15 pode ser acessado em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/>

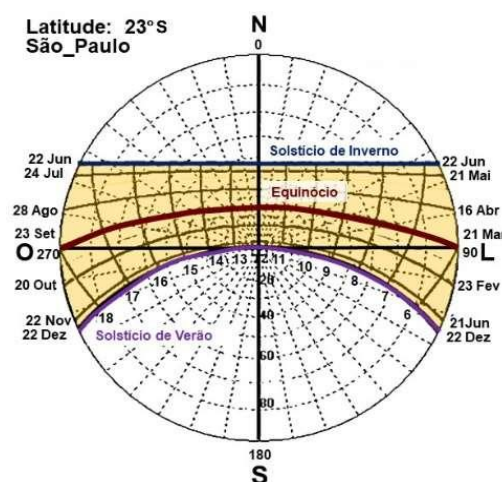
Figura 15 – Radiação Média Mensal na Cidade de São Paulo (23°S)



Fonte: Adaptado de PROJETEEE (2024)

A Figura 16 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. Entretanto, por se tratar do verão, a incidência solar nesta fachada é mais desconfortável para o usuário do edifício.

Figura 16 – Carta solar da cidade de São Paulo, Brasil (23° Sul)



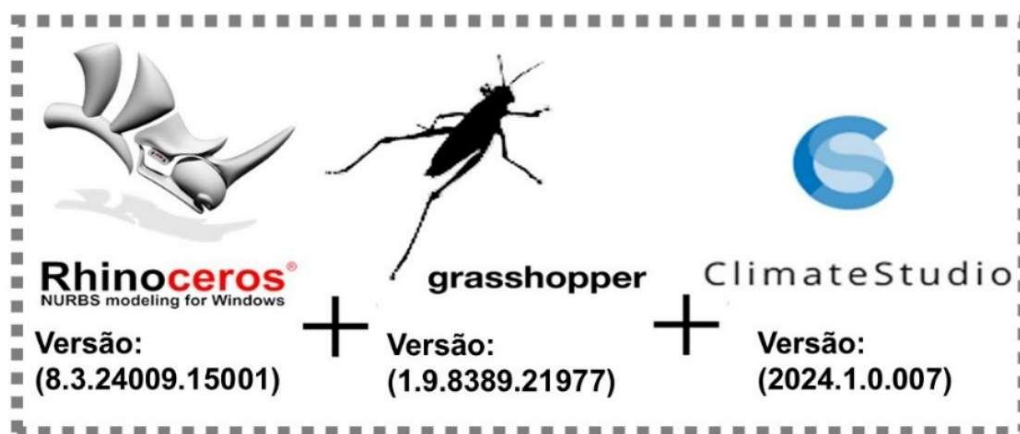
Fonte: Adaptado pelo autor a partir do *software* Sol-Ar (2023).⁵

⁵ O *software* Sol-Ar está disponível por meio do link <https://labeee.ufsc.br/pt-br/downloads/software/analysis-sol-ar>

3.7 Softwares e *Plugin's* utilizados

Foram utilizados nesta pesquisa os softwares apresentados na Figura 17. *Rhinoceros* é um software de modelagem do tipo “*Non-Uniform*” (NURBS). Isto significa que ele reproduz o espaço no ambiente de forma diferente aos programas tipo “*CAD*”, como “*Revit*”. A diferença é que o *software Rhinoceros* consegue realizar procedimentos com cálculo matemático para criar formas variadas, retas e curvas, principalmente orgânicas. O *Grasshopper* é um plugin para o *Rhinoceros* com capacidade de programação. Neste estudo, o *Grasshopper* é o *plug in* usado para criar o modelo parametrizado dentro do *Rhinoceros*. O *ClimateStudio* é um *plug in* que pode ser usado tanto no *Rhinoceros* quanto no *Grasshopper*. No segundo, oferece mais resultados em menos tempo associado a parametrização do *Grasshopper*. O *ClimateStudio* é responsável por gerar as simulações em iluminação natural dentro do modelo criado pelo *Grasshopper*. Os resultados são exportados em forma de números ou diagramas.

Figura 17 – Principais Programas Utilizados na Pesquisa



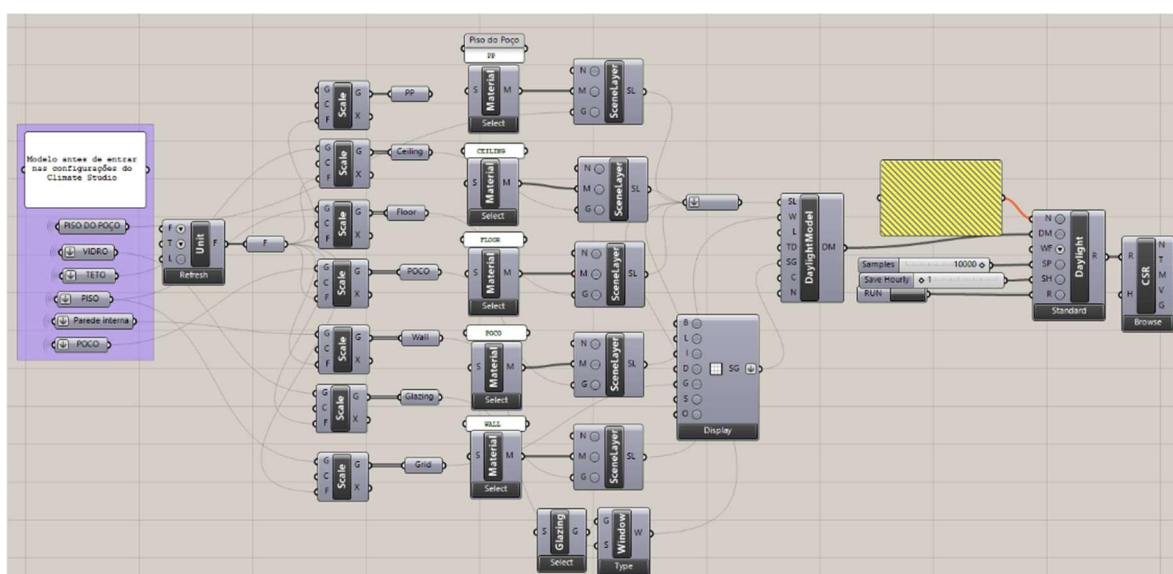
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.7.1 Validação do *Plugin Climate Studio*

O uso do *plug in Climate Studio* é uma etapa importante na pesquisa, pois, por meio dele foram gerados os resultados das simulações. Seu fluxo de trabalho depende de configurações parametrizadas dentro do *plug in Grasshopper*. No entanto, o motor utilizado durante as simulações é baseado no *software Radiance*, que já foi validado em estudos anteriores (Reinhart e Walkenhorst, 2001). Portanto, neste

questo, o *plug in* mantém a precisão de outros que também se baseiam no *software* Radiance, como *Honeybee*, *LadyBug* e *Diva*. Domínguez-Amarilo *et al.* (2023) realizaram testes para validar programas de simulação em iluminação natural. Os autores concluíram que a ferramenta *Climate Studio* possui limitação apenas se usado céu estático padrão CIE⁶, ainda assim, possui melhor precisão que os outros *plug ins*, exceto *DIVA*, que já foi descontinuado pela sua desenvolvedora. O fluxo de trabalho do *Climate Studio* utilizado para simulações nesta pesquisa⁷ pode ser conferido na Figura 18.

Figura 18 – Fluxo de trabalho do *Climate Studio* parametrizado no *Grasshopper* para simulações dinâmicas de iluminação natural.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

⁶ Esta dissertação não utiliza céu estático em nenhuma etapa do método.

⁷ Neste fluxo de trabalho estão apenas as configurações necessárias para prosseguir com as simulações no *Climate Studio* a partir do objeto modelado. O restante do "script" não foi inserido na dissertação devido à sua extensão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tópico “resultados e discussão” apresenta e discute os dados obtidos a partir das simulações computacionais, fazendo uma análise das informações obtidas e relacionadas com a literatura. O tópico é separado em subtópicos e constrói uma narrativa sobre a investigação da iluminação no poço de luz. Ao final, é proposta uma otimização das configurações arquitetônicas do poço com base na investigação realizada.

4.1 Iluminação natural no modelo base

Este item aborda o 1º e 2º passo dos objetivos específicos. Buscou-se entender o comportamento da luz natural em diversas etapas da sua trajetória no poço de luz e como as configurações arquitetônicas influenciam a iluminação nos ambientes internos. Primeiramente, foi criado um modelo base. Assim, no tópico “Incidência de radiação solar anual nas paredes do poço” foi analisada a incidência de radiação total do sol que atravessa a abertura no topo do poço modelado. Depois, no tópico “Distribuição da iluminação natural nas paredes do poço” foi analisada a distribuição de apenas a luz visível pelas paredes do poço de luz antes de atravessar a janela dos ambientes internos. Posteriormente, no tópico “Desempenho da iluminação natural no ambiente interno do modelo base” foi analisada a distribuição luz nos ambientes internos. Na sequência, no tópico “Dimensões geométricas do poço de luz” foi discutido como variações nas configurações arquitetônicas do modelo base podem resultar em melhorias, ou não, para o desempenho da iluminação natural nos ambientes internos.

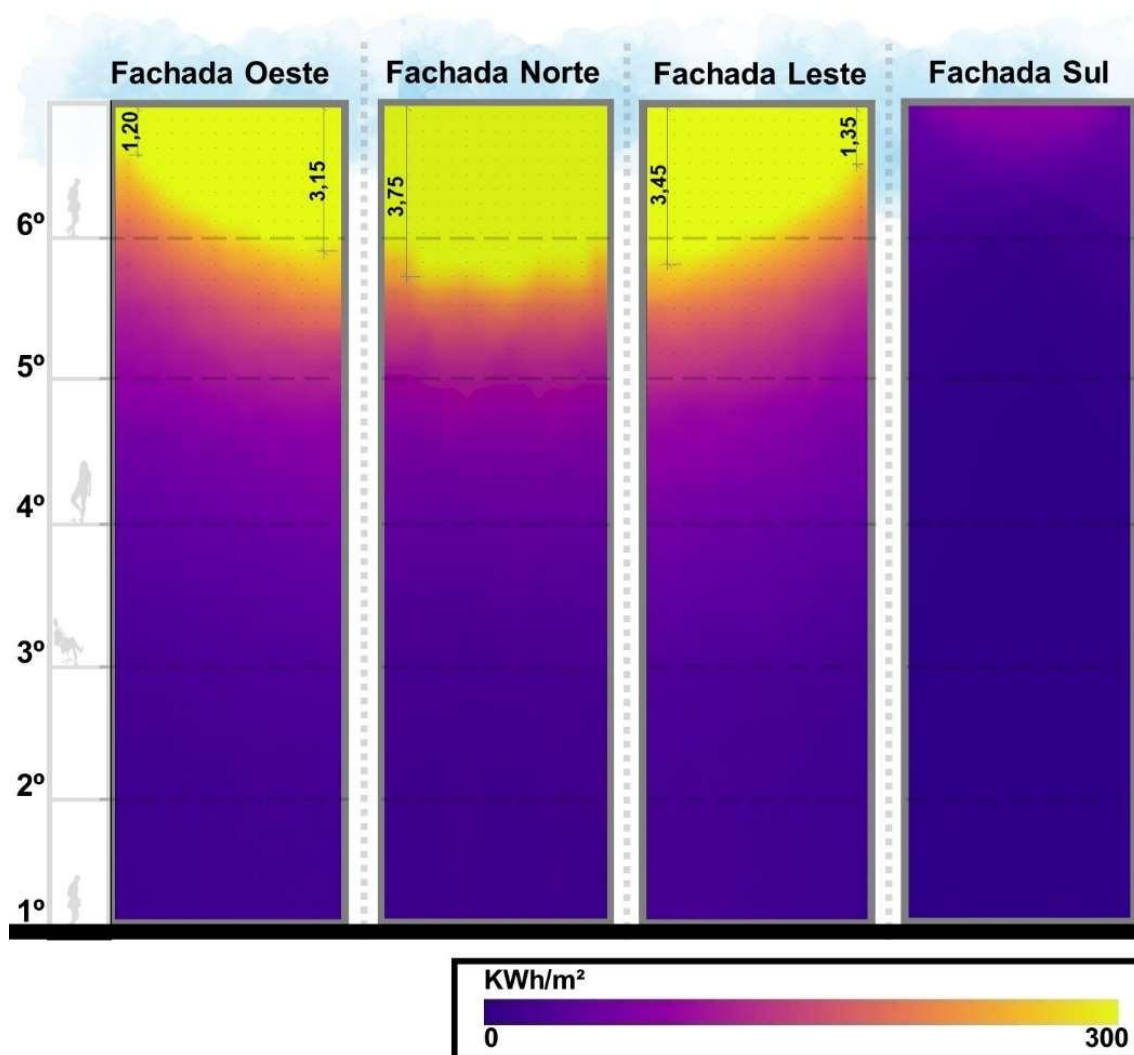
4.1.1 Incidência de radiação solar anual nas paredes do poço

A Figura 19 apresenta o resultado das simulações a partir da exposição das fachadas do poço de luz à radiação solar sob o clima de São Paulo, Brasil (23°S). Este diagrama é importante para entender a quantidade de energia que as fachadas recebem do sol e assim interpretar as áreas com maior incidência de luz solar direta.

O estudo de Goharian *et al.* (2022) afirma que a porção da parede do poço com maior incidência solar é mais apropriada para reflexão da luz. Neste modelo base,

estas regiões são destacadas em amarelo no diagrama da Figura 19. A profundidade desta região estratégica, em relação ao topo do poço, varia de 1,20m a 3,15m na fachada oeste, próximo de 4 m na fachada norte, e de 3,75m a 1,35m na fachada leste.

Figura 19 – Diagrama de Distribuição da Radiação Solar Direta Anual nas Paredes do Poço de luz



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A maior parte da radiação solar anual se concentra na porção superior do poço de luz em todas as fachadas, exceto a sul. Esta radiação permanece intensa no sexto, diminuindo no quinto e se tornando inexistente a partir do terceiro pavimento. Na fachada oeste, a radiação solar é distribuída no topo como uma linha curva, seguindo a trajetória solar. A radiação solar na fachada leste apresenta o mesmo padrão de distribuição que a fachada oeste, porém, com aspecto invertido, como se estivessem

espelhadas. Na fachada oeste, na área correspondente ao sexto pavimento, a porção mais à direita recebe maior quantidade de radiação. Na fachada leste, isso ocorre na porção mais à direita. A fachada norte possui uma distribuição uniforme da radiação solar no topo. Este desenho da radiação no topo da fachada, formando uma elipse, ocorre devido a posição e trajetória do sol nesta latitude, partindo do leste ao oeste (Bedaque e Bretones, 2016).

A porção do sexto pavimento é totalmente preenchida por radiação solar anual de 300 KWh/m², o que sugere uma intensa iluminação natural. Nas fachadas oeste, leste e norte, abaixo do quinto pavimento, esta radiação cai para menos da metade do valor correspondente ao topo. Abaixo do terceiro pavimento, essa radiação é inexistente. Na fachada sul, a radiação solar direta é uniforme em toda área da fachada, não apresentando radiação expressiva. Isto é observado na Figura 19, pois, as cores ilustrativas nesta fachada permanecem uniformes. Isto se deve à localização da cidade de São Paulo, no hemisfério sul, que recebe menos raios solares em comparação aos outros pontos cardeais (Labeee, 2016)⁸, conforme é observado na Figura 16.

4.1.2 Distribuição da iluminação natural nas paredes do poço

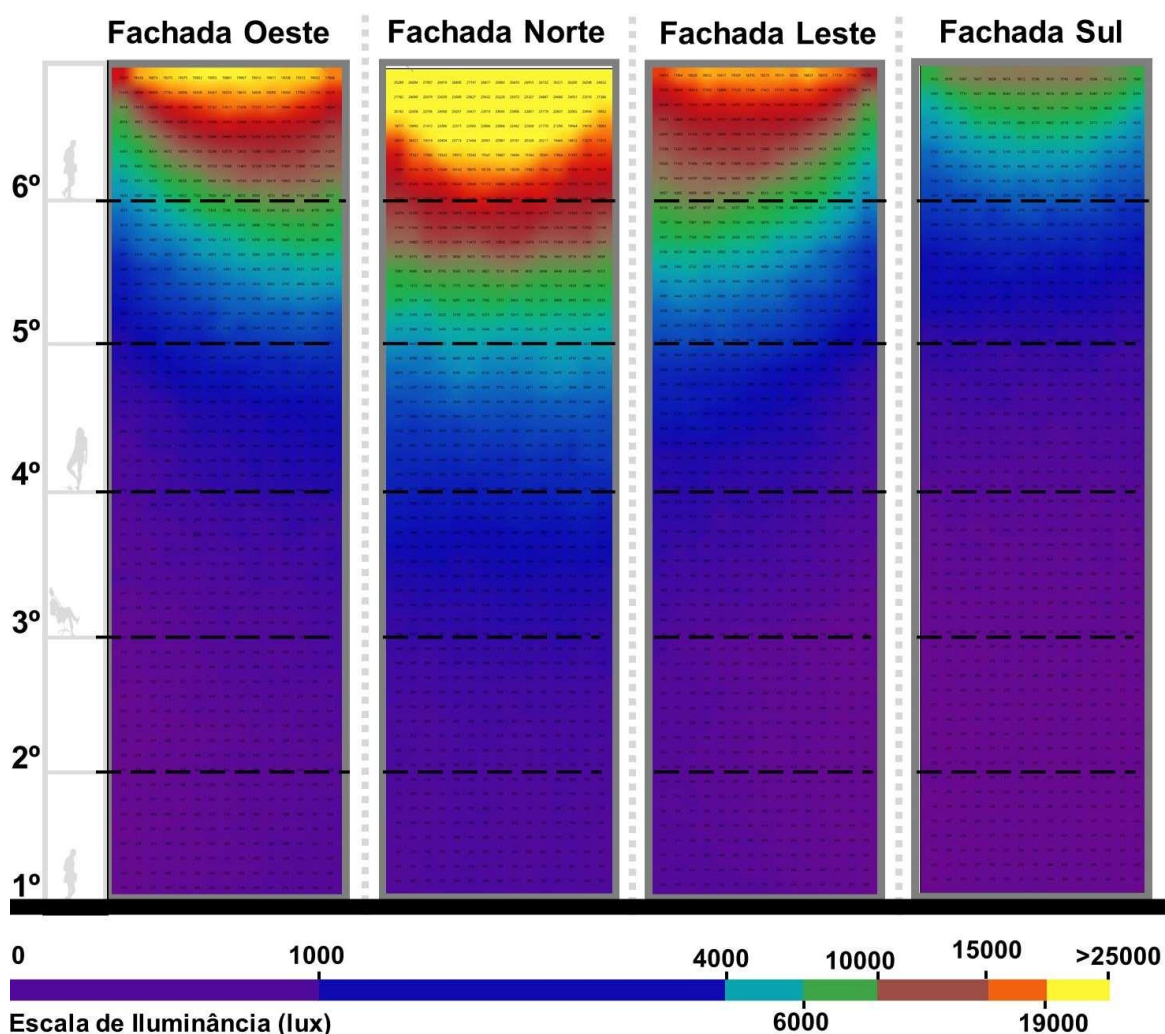
Neste tópico é abordada a distribuição da luz natural pelas paredes do poço. Os resultados se relacionam com a reflexão da luz natural que entra pelo topo do edifício e percorre toda a cavidade antes de alcançar o ambiente interno. Foram utilizados os resultados da iluminância anual a partir da luz natural direta e indireta. Assim, foi possível observar a perda de iluminação natural em diferentes partes do poço, antes de alcançar o ambiente interno.

A Figura 20 apresenta a distribuição de luz natural nas paredes do poço de luz. A parte superior recebe uma intensa iluminação que chega a mais de 20.000 lux na região amarela. Esta região corresponde a quase todo sexto pavimento. No quinto pavimento, esta iluminação cai gradualmente até atingir valores mínimos no quarto pavimento. Esta queda gradual na iluminação revela uma zona de transição da iluminação natural que ocorre logo após a zona excessivamente iluminada. Essa

⁸ "DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES - 7ª edição, 2016". Material elaborado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (UFSC) para a disciplina "ECV 5161". Inicialmente criado por Roberto Lamberts em 1994, revisado por Joyce C. Carlo em 2005 e atualizado por Wanessa C. P em 2016.

transição ocorre ainda na parte superior e pode ser influência da trajetória do sol na abobada celeste. A região mediana do poço recebe pouca iluminação, enquanto os dois pavimentos inferiores são escuros. Dessa forma, os valores de iluminação no fundo não ultrapassam 1000 lux e a região mediana do poço, entre o 3º e 4º pavimento, não ultrapassam 4000 lux. Estes valores podem ser considerados excessivos para um ambiente interno, mas neste caso, se trata de um ambiente externo em que a luz ainda vai percorrer um caminho até alcançar o ambiente interno.

Figura 20 – Distribuição de luz natural nas paredes do poço no modelo base



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os resultados da simulação demonstraram que na fachada norte, a luz permanece concentrada na porção superior do poço. Porém, a comparação entre as imagens revela que a área com alto índice de iluminação no poço vai além da porção exclusivamente iluminada pela luz solar direta. Este fato indica que o problema da

falta de luz na porção mais profunda do poço não está relacionado apenas a sua geometria, mas sim à distribuição dessa ao longo da cavidade do poço. Goharian *et al.* (2022) atribuem este fenômeno a propriedade difusa do material, em que a luz se espalha desordenadamente e volta para o topo da cavidade.

Kristl e Krainer (1999) realizam uma observação similar no seu estudo, onde paredes inclinadas direcionam a luz para a porção mais profunda do poço. Neste sentido, Goharian *et al.* (2022) estabelece que além da inclinação, as propriedades físicas dos materiais que revestem as paredes devem ser alteradas para permitir uma melhor distribuição da luz. Por esta razão, Littlefair (2002) postula que a porção superior do poço de luz deve ser feita de material de alta refletância, para compensar as perdas de luz.

Do ponto de vista do estudo de Goharian *et al.* (2022) e Littlefair (2002), estratégias projetais aplicadas nesta região de intensa iluminação, como o uso de material especular, podem prolongar a região de transição de luz. Essa, é uma região da parede do poço em que a iluminação decresce gradualmente. Na fachada norte do modelo base, esta região vai até o piso do quinto pavimento. A partir da região do quarto pavimento, a distribuição da luz não é eficaz e ele se torna escuro.

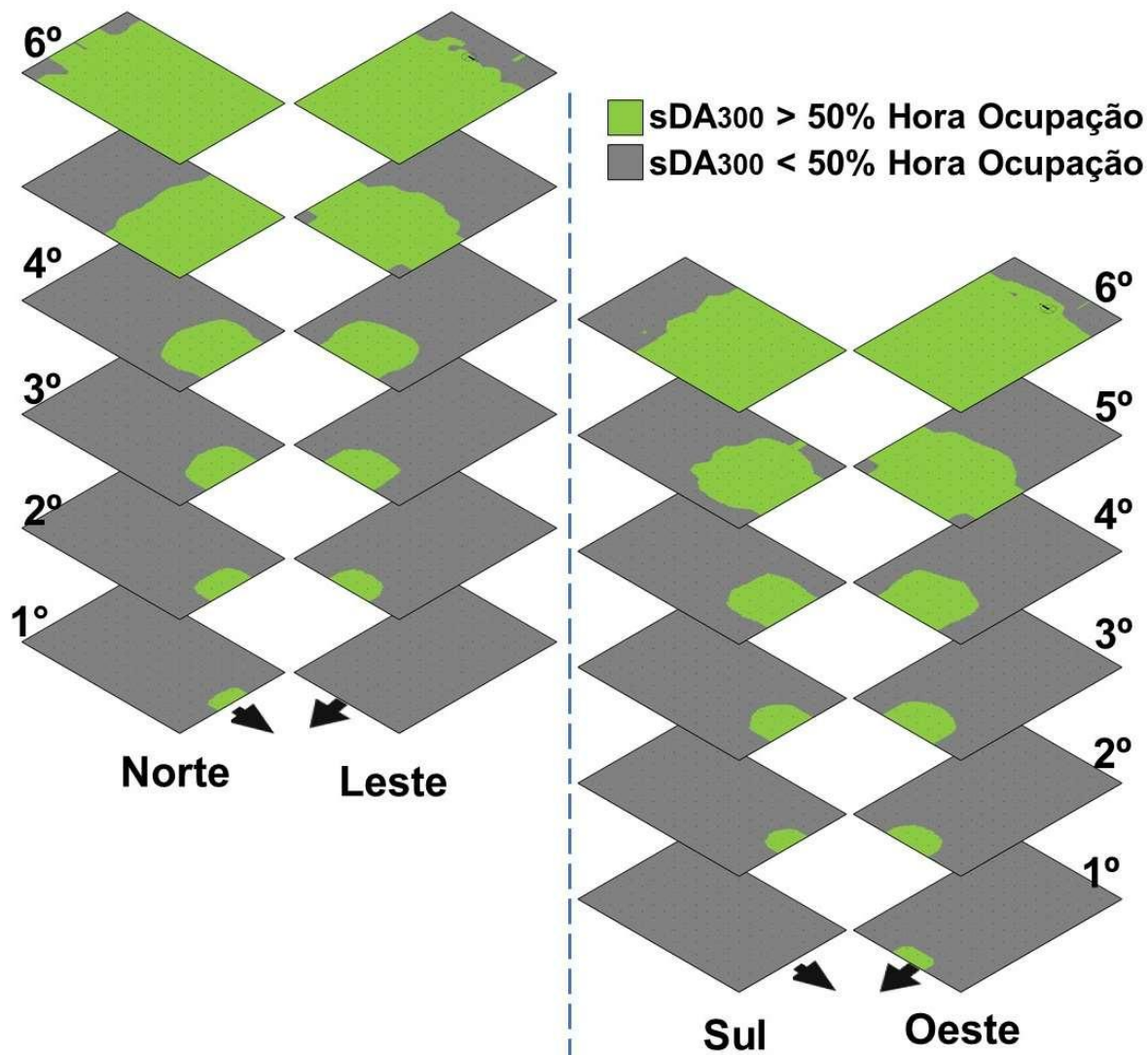
A queda na iluminação na porção de transição da luz é de mais de 80% em relação ao topo excessivamente iluminado. Mais da metade desta fachada não atinge 20% da luz que entra pelo topo do poço de luz e isto implica na luminosidade que entra pela janela e ilumina o ambiente interno.

4.1.3 Desempenho da iluminação natural no ambiente interno do modelo base

A Figura 21 apresenta os diagramas de $sDA_{300,50\%}$ obtidos a partir da simulação da iluminação no modelo base. O sexto pavimento recebe quantidades que atendem aos critérios de iluminação natural em todas as fachadas, com valores de sDA_{300} acima de 55% da área de piso de cada ambiente. O ambiente interno do sexto pavimento da fachada norte é o que melhor apresenta distribuição desta iluminação. Neste ambiente, foram obtidos valores acima de 300 lux na linha de sensores posicionados quase 4,2 metros de distância da janela. Mesmo o ambiente da fachada sul que não recebe radiação solar direta (Figura 19) possui valores de iluminação natural acima de 300 lux até próximo do fundo do ambiente (Figura 21). Neste ambiente foram obtidos valores acima de 300 lux na linha de sensores distantes em

até 2,85 m da janela. Este fato se deve à reflexão da luz das outras fachadas que atravessa a abertura do ambiente voltado ao Sul.

Figura 21 – Distribuição do sDA₃₀₀ nos ambientes com aberturas voltadas a Norte e a Leste do modelo base



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os valores de iluminação decaem drasticamente abaixo do quinto pavimento, porém, a luz natural ainda é bem distribuída em todo os ambientes deste pavimento. No ambiente da fachada norte, este decréscimo de sDA₃₀₀ é de 95% para 50% do sexto para o quinto pavimento. Na fachada sul, a iluminação ótima no ambiente ocorre próximo à janela, a uma distância de 1,98m da abertura. Assim, o valor de sDA₃₀₀ decresce de 69% para 34% do sexto para quinto pavimento, o que pode indicar uma ausência da influência de raios luminosos vindos da porção mais acima do poço.

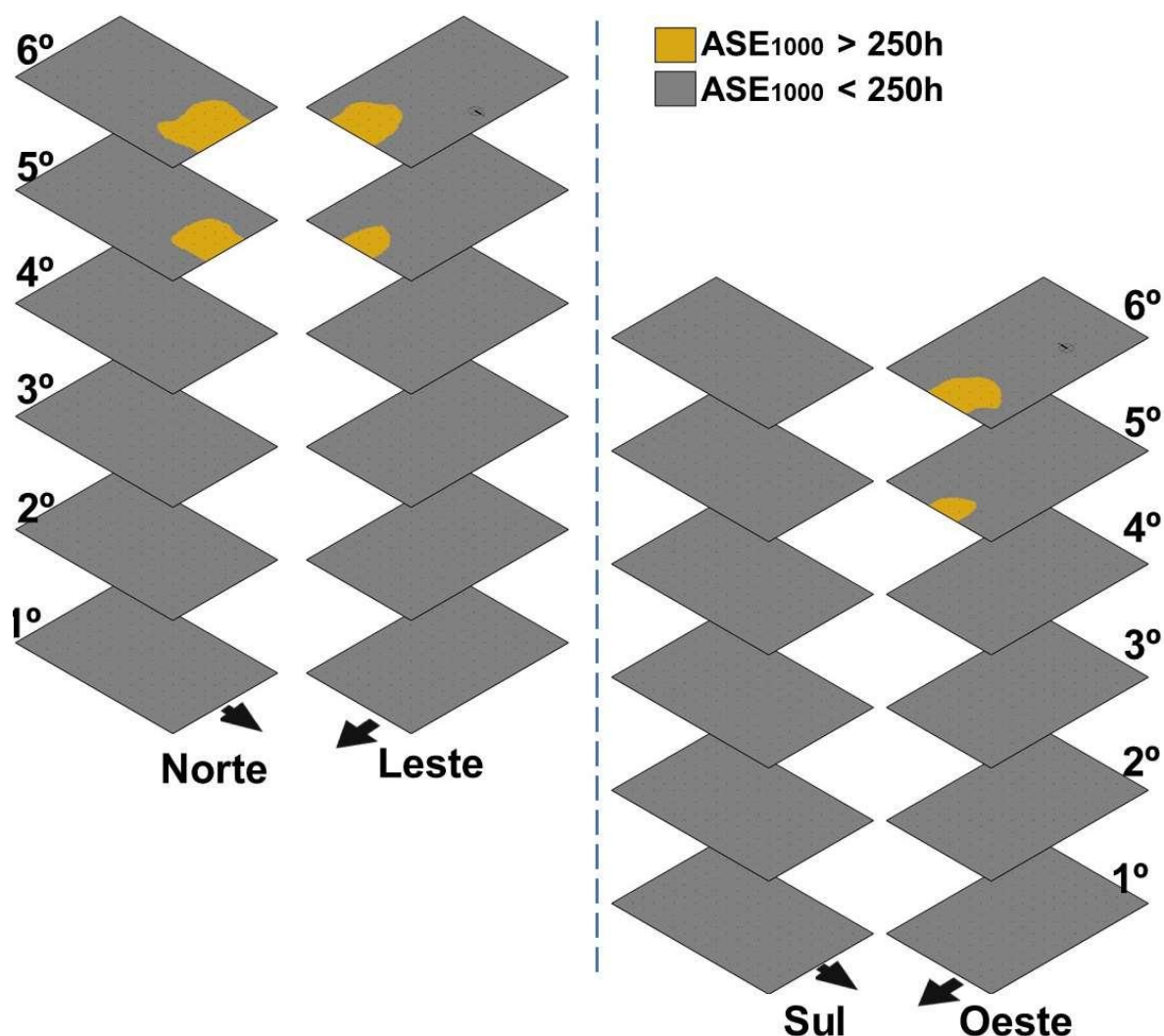
A partir do quarto pavimento, a distribuição do sDA_{300} se concentra próximo à janela em todos os ambientes. A iluminação ideal alcança maior profundidade no ambiente da fachada norte, ainda assim, apenas 1,32m de distância da janela. Menos da metade da área destes ambientes recebem luz natural acima de 300 lux, o que indica desacordo com a norma LM-83-12 (IES, 2012). No pavimento térreo, os ambientes Sul e Leste não recebem valores de iluminação natural acima de 300 lux.

A presença de alto valor de sDA_{300} no pavimento superior pode indicar de uma iluminação potencialmente desconfortável. Porém, essa métrica não estipula um valor máximo de iluminação acima de 300 lux. Por esta razão, a norma LM-893-12 (2012) recomenda o uso associado com outra métrica de desempenho, a ASE_{1000} . Assim é possível avaliar, no ambiente, o incômodo da luz que vem diretamente do sol. Um valor de ASE acima de 10% está associado a valores de sDA_{300} aumentados, mas com potencial para prejudicar o conforto térmico e visual.

A Figura 22 demonstra que a presença de luz solar direta no sexto e quinto pavimento só não é preocupante na fachada sul. É importante notar que os pavimentos inferiores, abaixo do quinto, não recebem nenhum valor de ASE_{1000} distribuído pelo piso. Isto indica que luz do sol não alcança estes ambientes. Em comparação com a Figura 19, é possível inferir que a dimensão da abertura do topo, 5 m, não permite um alcance da radiação solar direta pelas paredes do poço suficiente para iluminar a parte mais profunda.

Ao observar os diagramas do modelo base, é possível inferir que a luz direta do sol predomina na região superior do poço (Figura 19). Apesar disso, a luz que atravessa a janela é predominantemente indireta.

Figura 22 – Distribuição do ASE 1000 nos ambientes com aberturas voltadas ao Norte, Leste e Sul e Oeste do modelo base



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao comparar a Figura 21 e Figura 22, torna-se evidente uma melhor distribuição do sDA₃₀₀ no piso do que o ASE₁₀₀₀. A partir do quarto pavimento, esta luz natural se concentra próximo à janela dos ambientes. Como é inexistente resultados de ASE₁₀₀₀ nestes ambientes, sugere-se que a luz seja absolutamente indireta. Na porção mais profunda do poço, além da ausência da luz direta do sol, também inexistente a luz indireta. Portanto, é uma região escura. Os trabalhos de Freewan *et al.* (2014) atribuem este fenômeno à profundidade do poço. Para eles, poços mais rasos, com até dois pavimentos, tendem a distribuir melhor a luz. O modelo base foi propositalmente configurado mais alto e mais estreito, apresentando o pior cenário a ser considerado.

Bugeat *et al.* (2020) vão além e justificam que as propriedades físicas da parede do poço influenciam o desempenho da luz dentro dos ambientes. Para esses autores, quanto maior o índice de reflexão especular, melhor a distribuição de luz. Souza *et al.* (2021) sugerem valores de refletância acima de 80% para melhor desempenho da luz natural nos ambientes conectados ao poço. Neste modelo base, foi utilizada refletância difusa de 50% e especular 0%, tendo em vista que trabalhos como o de Lamberts *et al.* (2014) não recomendam o uso de superfícies espectrais, ou espelhadas, pelo risco de desconforto térmico e visual.

Assim, os resultados obtidos neste capítulo estão de acordo com os estudos mais recentes. Era esperado um desempenho não satisfatório do poço de luz na iluminação natural, pelo exposto na literatura (Martins, 2011; Acosta *et al.*, 2013; Magktuto *et al.*, 2016; Leite *et al.*, 2024). Porém, ainda não é evidente como a variação destas configurações do poço pode influenciar a iluminação dos ambientes. Desta forma, o tópico seguinte demonstra resultados com outras configurações do poço também recomendadas na literatura. Tem-se como ineditismo o uso da métrica dinâmica contemporânea, clima e latitude pouco estudados, além de um aprofundamento da relação entre as variáveis arquitetônicas.

4.2 Varáveis arquitetônicas e o desempenho da iluminação natural do ambiente conectado ao poço de luz

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir do cumprimento do objetivo 2.

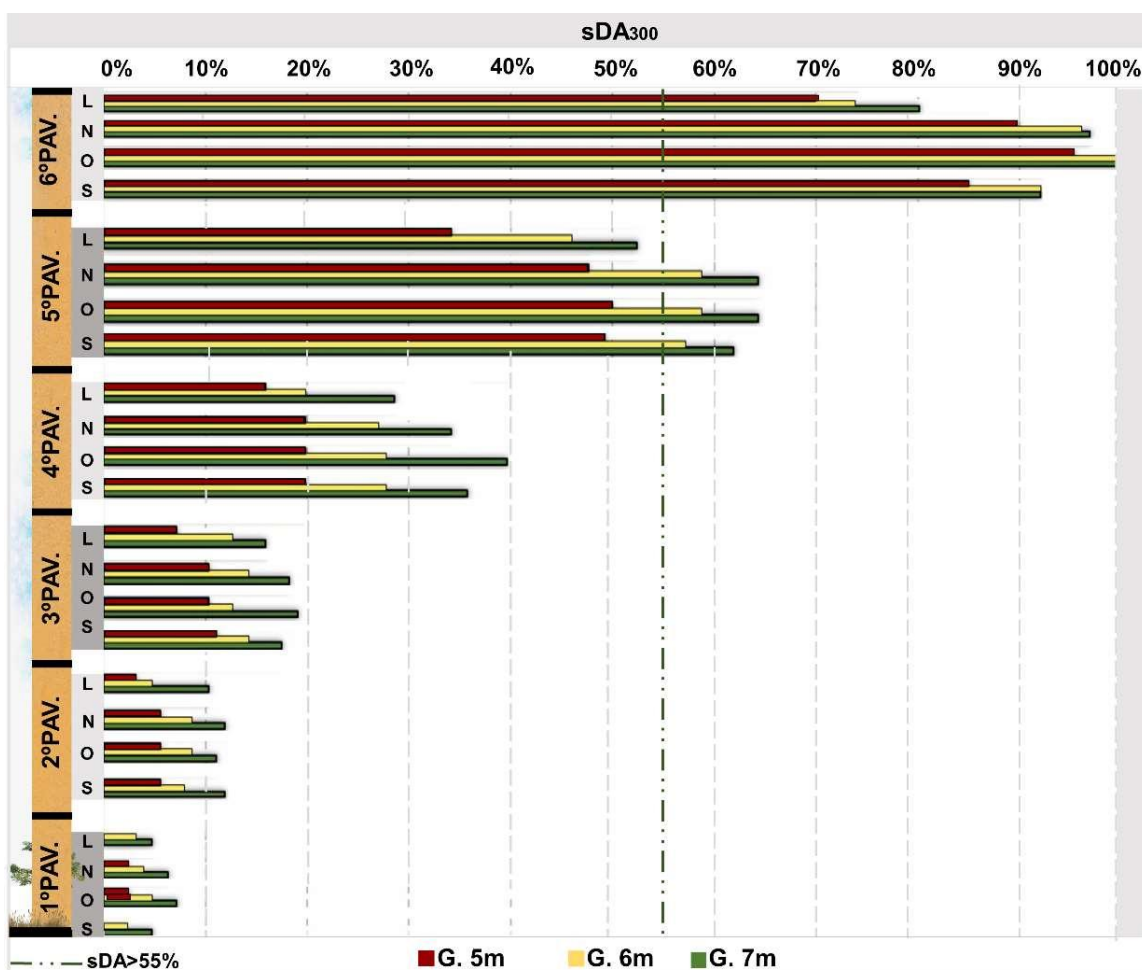
4.2.1 Dimensões geométricas do poço de luz

A literatura indica que a ampliação das dimensões geométricas do poço de luz é uma das formas de expandir o acesso da iluminação aos ambientes conectados a ele (Acosta *et al.*, 2013; Freewan *et al.*, 2014; Magktuto *et al.*, 2016; Ahadi *et al.*, 2018). Assim, a dimensão da abertura superior do modelo base foi aumentada para 6x6m e depois 7x7m. Desta forma, foi possível comparar os valores obtidos para verificar os ganhos na iluminação natural a partir desta variação da dimensão do poço. A altura permaneceu fixada em 16,8 m. Verificou-se que em todos os modelos há uma expressiva queda de iluminação natural a partir do 6º pavimento, com valores de sDA

insuficientes a partir do 4º e atingindo percentuais próximos de 0% no 1º pavimento. No topo do edifício, os ambientes que mais recebem iluminação natural têm aberturas voltadas ao norte, em seguida oeste, leste e sul.

Na Figura 23 são apresentados os resultados dos valores de sDA_{300} do conjunto de ambientes de cada pavimento com o vão do poço nas medidas 5x5m, 6x6m e 7x7m (nesta simulação o PAF 20% e refletância 0,50 do modelo inicial foram mantidos). Ao aumentar a dimensão geométrica de 5m para 7m, é possível observar que, no 6º pavimento, os ambientes que recebem luz solar direta (fachadas leste, norte e oeste) têm um ganho de sDA_{300} menor em relação à fachada sul, que não recebe luz solar direta na maior parte do ano. No ambiente sul esse aumento foi de 70% para 80% e no ambiente norte foi de 95% para 100%. Já no 5º pavimento, o sDA_{300} aumenta em 18% no ambiente com abertura voltada ao sul e em 14% no ambiente ao norte. O 4º pavimento apresenta os maiores ganhos com o aumento da dimensão geométrica de 5m para 7m, pois passa a receber luz solar direta. Nele, os valores de sDA_{300} 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 sDA_{300} são similares entre os ambientes internos, independente da orientação solar. Nessa região do poço, o aumento da dimensão geométrica de 5m para 7m resulta em um aumento considerável do sDA_{300} , que chega a dobrar, mas o máximo alcançado é insuficiente para uma iluminação natural adequada, segundo a IES LM-83 (2012). Os valores de sDA_{300} não ultrapassam 19% no 3º pavimento e 7% no 1º pavimento.

Figura 23 – Valores de sDA_{300} em diferentes dimensões geométricas, PAF 20% e refletância 0,50



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Novamente, o ASE é importante para uma análise mais precisa da qualidade da iluminação natural. Por meio da análise dos resultados de ASE (Tabela 3), percebe-se que os ambientes do 6º e 5º pavimentos recebem luz solar direta excessiva, pois os raios solares alcançam uma profundidade maior dentro destes ambientes. 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 permanece em 0%. No 5º pavimento, a luz solar direta só é excessiva no ambiente com abertura voltada ao norte, com ASE em 11%. Do 3º piso até o térreo, devido à ausência de luz solar direta, o valor do ASE é 0% em todas as fachadas. Apesar da luz direta do sol ser excessiva no 6º pavimento, o aumento da dimensão geométrica de 5m para 7m resulta em um pequeno aumento dessa luz somente na abertura ao

norte. No 5º e 4º pavimentos, na maior parte dos ambientes, os valores de ASE não ultrapassam 10%, portanto a luz solar direta nestes ambientes não é elevada a um nível acima do recomendado pela IES LM-83-12, minimizando o risco de desconforto visual.

Tabela 3 – Valores de ASE em diferentes dimensões geométricas (G), PAF 20% e refletância 0,50

		Leste	Norte	Oeste	Sul
Abertura de 5m	6ºPav.	11%	14%	10%	0%
	5ºPav	5%	9%	4%	0%
	4ºPav.	0%	0%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
Abertura de 6m	6ºPav.	11%	16%	11%	0%
	5ºPav	6%	11%	4%	0%
	4ºPav.	2%	2%	2%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
Abertura de 7m	6ºPav.	11%	17%	11%	0%
	5ºPav	9%	11%	6%	0%
	4ºPav.	4%	5%	2%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%

*Em **vermelho**, valores acima do recomendado pela LM-8312 (2012).

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.2.2 Refletâncias das paredes do poço de luz

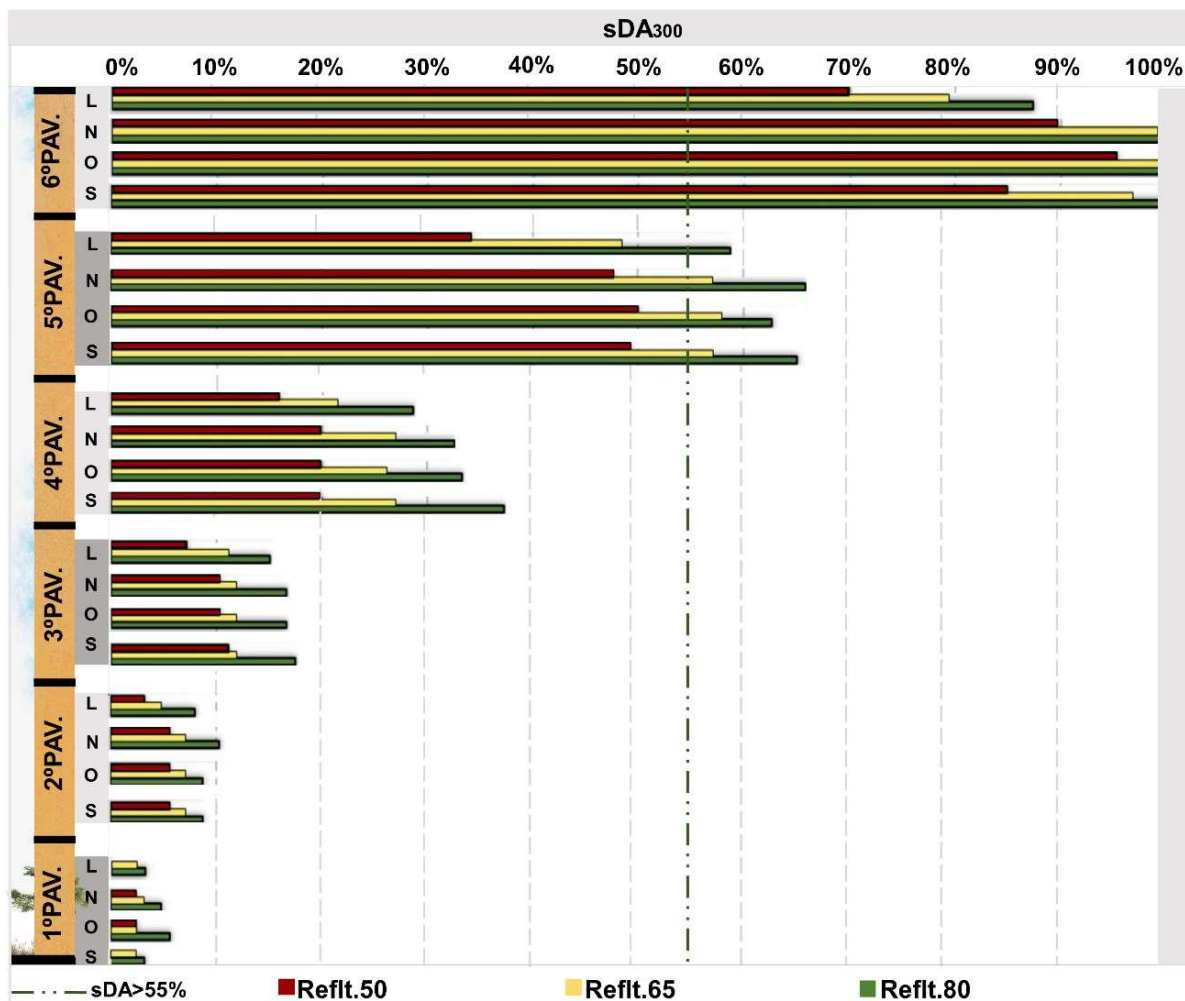
A Figura 24 apresenta os valores de sDA_{300} e ASE_{1000} nos ambientes a partir da variação da refletância das paredes do poço de luz, fixando o PAF em 20% e dimensão geométrica em 5m. É possível notar que os ganhos de sDA_{300} são mais evidentes nos ambientes que não recebem luz solar direta. Ao aumentar a refletância de 0,50 para 0,80 na parede do poço, a fachada sul no 5º pavimento apresenta uma variação de iluminação superior à variação na fachada norte; o sDA_{300} foi de 34% para 59% no ambiente sul e de 50% para 63% no ambiente norte, aproximando o valor

final de sDA₃₀₀ dos dois ambientes. 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, os ambientes com abertura ao sul terão iluminação semelhante aos ambientes com abertura ao norte. Esse fato, contudo, não é observado na metade inferior do poço de luz, pois a luz solar direta não alcança essa região. No 3º pavimento, os valores variam de 10% para 17% no ambiente com abertura voltada para leste, 11% para 17% para norte e oeste e 7% para 15% ao 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. Isto se verifica no 1º 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 dos ambientes.

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 este 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. Neste 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 dos ambientes.

Figura 24 – Valores de sDA em diferentes refletâncias. PAF 20% e dimensão geométrica 5m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao comparar os valores de ASE sob diferentes refletâncias do poço de luz (Tabela 4), é possível perceber os valores não se alteram. Isso indica que aumentar a refletância do poço não resulta em variação de ASE. Os valores permanecem abaixo de 14% no 6º pavimento e abaixo de 9% no 5º pavimento. O ASE permanece em 0% nos ambientes com abertura ao sul e em todos os ambientes do 4º 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 dos ambientes. No entanto, apenas o 6º 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 iluminância em um edifício de 6 pavimentos na latitude considerada.

Tabela 4 – Valores de ASE em diferentes refletâncias. PAF 20% e dimensão geométrica 5m

		Leste	Norte	Oeste	Sul
Reflet.50	6ºPav.	11%	14%	10%	0%
	5ºPav	5%	9%	4%	0%
	4ºPav.	0%	0%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
Reflet.65	6ºPav.	11%	14%	10%	0%
	5ºPav	5%	9%	4%	0%
	4ºPav.	0%	0%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
Reflet.80	6ºPav.	11%	14%	10%	0%
	5ºPav	5%	9%	4%	0%
	4ºPav.	0%	0%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%

Em **vermelho**, valores acima do recomendado pela LM-8312 (2012).

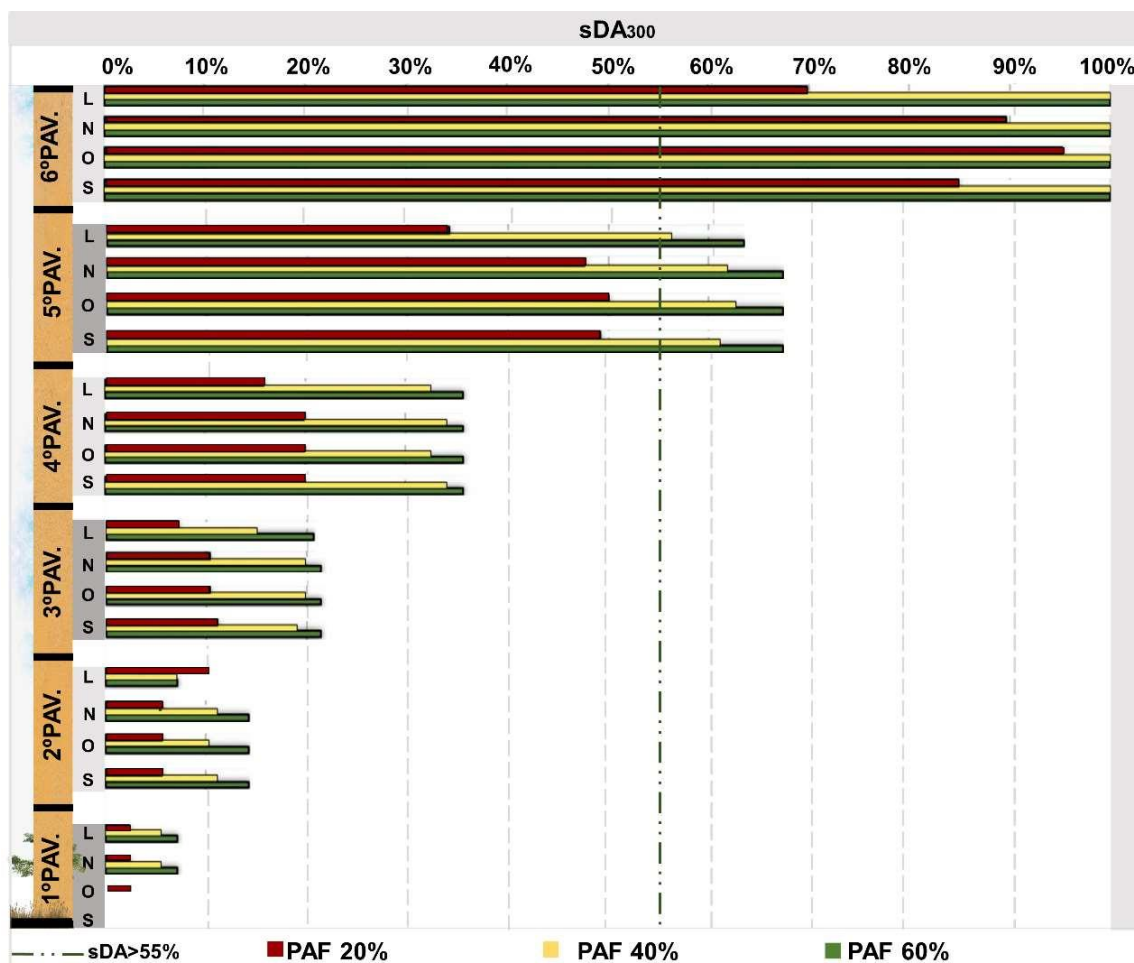
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.2.3 Porcentagens de Abertura da Fachada (PAF)

A Figura 25 apresenta os valores de sDA_{300} nos ambientes 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 os ambientes. No modelo simulado com janelas em 60% (PAF) os ambientes atingem valores muito semelhantes de sDA_{300} independente da orientação solar, exceto no 2º e 1º pavimento. No 6º pavimento o sDA_{300} é de 100%, no 4º pavimento é de 36% e no 3º pavimento, 21%. No 2º e 1º 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 o ambiente 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 nos ambientes com abertura ao sul. No 6º pavimento, o ambiente sul atinge 70% de sDA₃₀₀ e o ambiente norte 95%; no 4º pavimento esses valores são de 16% e 20% e no 3º pavimento, 7% e 10%, respectivamente.

Figura 25 – Valores de sDA em diferentes PAF's. Refletância 0,5 e dimensão geométrica 5m



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

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%, o ambiente com abertura ao sul obtém um aumento do sDA₃₀₀ de no máximo 7% no 5º pavimento, 3% no 4º pavimento e 0% no 2º pavimento. Entre a proporção de 20% e 40%, os ganhos do sDA₃₀₀ no ambiente sul são mais evidentes, com um aumento de 22% no 5º pavimento, 17% no 4º pavimento e 4% no 2º 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.

Em relação aos valores de ASE (Tabela 5), 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. Nos ambientes em que há incidência de luz solar direta, os valores de ASE quadruplicam, elevando de 14% para 42% no 6º pavimento e de 9% para 33% no 5º pavimento nos ambientes voltadas ao norte. Isso pode prejudicar o conforto visual nestes ambientes. Contudo, não foi observado um aumento da luz excessiva no ambiente sul, que permanece em 0%, e nem abaixo do 5º 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 na 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.

Tabela 5 – Valores de ASE₁₀₀₀ em diferentes PAF's. Refletância 0,5 e dimensão geométrica 5m

		Leste	Norte	Oeste	Sul
PAF 20%	6ºPav.	11%	14%	10%	0%
	5ºPav	5%	9%	4%	0%
	4ºPav.	0%	0%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
PAF 40%	6ºPav.	25%	35%	35%	0%
	5ºPav	12%	23%	9%	0%
	4ºPav.	1%	1%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
PAF 60%	6ºPav.	36%	42%	33%	0%
	5ºPav	19%	33%	13%	0%
	4ºPav.	2%	1%	0%	0%
	3ºPav.	0%	0%	0%	0%
	2ºPav.	0%	0%	0%	0%
	1ºPav.	0%	0%	0%	0%
Em vermelho , valores acima do recomendado pela LM-8312 (2012).					

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.2.4 Discutindo a iluminação natural nos casos simulados

A disponibilidade de iluminação natural está diretamente relacionada com a dimensão geométrica do poço (Freewam *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. Este fato também foi observado em outras localidades com diferentes alturas do poço de luz (Bugeat *et al.*, 2020; Goharian *et al.*, 2022).

Assim, os resultados indicaram que o aumento da dimensão geométrica de 5m para 7m beneficia os ambientes que inicialmente não recebem luz solar direta. No entanto, na configuração de edifício simulado, uma dimensão geométrica de 7m não é suficiente para levar luz solar direta além do 4º 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 e Krainer (1999).

Em contrapartida, o aumento da dimensão geométrica de 5m para 7m pode resultar em valores preocupantes de exposição da luz direta do sol nos pavimentos superiores. Contudo, esse risco diminui consideravelmente a partir do 5º pavimento, exceto na fachada norte. A luz solar direta não incide durante todo o dia nas demais fachadas, conforme se verifica na Figura 24, o que justifica os valores de ASE abaixo de 10% a partir do 5º 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 dentro dos ambientes 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.

Desta forma, os resultados da geometria do poço estudado convergem com os estudos apresentados. Ainda assim, estes estudos se limitaram a dimensões menores

do poço, ora por limitações de hardware, ora pelo escopo da pesquisa. Portanto, os resultados deste modelo indicam que mesmo um poço de luz com grandes dimensões (7 x 7m) melhora a distribuição de luz, mas não é suficiente para levar iluminação adequada para a porção mais profunda do poço. Por consequência, os códigos de obras brasileiros, que apresentam como exigência apenas a correção do diâmetro do vão pela altura do prédio, podem induzir a projetos de ambientes com iluminação inadequada ao propor um índice fixo. O projetista pode ser induzido ao erro ao se levar em consideração apenas a correção da dimensão do poço pela altura do edifício, pois, é preciso considerar a refletância e PAF como fatores que influenciam a iluminação.

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 os ambientes do modelo estudado com PAF fixado em 20% e dimensão geométrica em 5m. Apesar disso, a iluminação natural é reduzida à medida que o poço aprofunda, devido 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).

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 PAF em um mesmo poço de luz, assumindo uma menor proporção nos pavimentos superiores e aumentando o vão na região mais profunda.

4.3 Modelo Otimizado do Poço de Luz

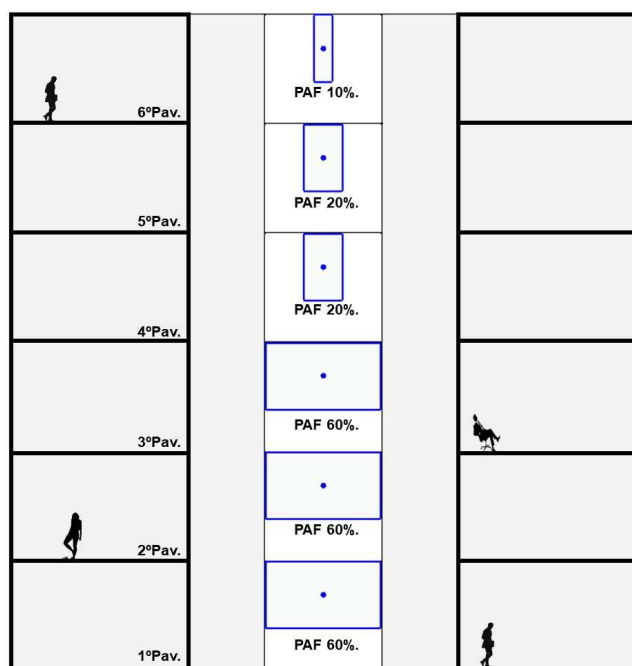
Este item aborda o 3º passo do objetivo específico desta dissertação. Buscou-se encontrar uma solução viável para melhorar o poço de luz estudado a partir do modelo base. Foram aplicadas configurações já discutidas neste trabalho de forma

pontual. Foram consideradas as melhores configurações encontradas na discussão dos capítulos anteriores para montar um modelo de poço otimizado.

Constatou-se nos capítulos anteriores que soluções arquitetônicas para o poço de luz não são suficientes se aplicadas de forma isolada. O aumento da dimensão geométrica melhora a iluminação em todo o poço, mas prejudica a parte superior. Esta região, compreendida entre os dois pavimentos ao topo, recebe luz solar direta em excesso, o que pode ser um problema. Em relação à refletância das paredes do poço, a aplicação de até 80% distribui melhor a iluminação no poço, facilitando o alcance da luz para dentro dos ambientes. No entanto, é ineficiente na ausência de luz, como ocorre na porção mais profunda de um vão estreito. Já o PAF deve ser cuidadosamente projetado. Na porção superior, se a abertura for extensa, permite a entrada de luz solar excessiva no ambiente interno. Na porção inferior, se o PAF for pequeno, a luz não alcança o ambiente interno de forma satisfatória.

A partir dessas observações, um poço otimizado foi desenvolvido, integrando as melhores configurações testadas nesta pesquisa (Figura 26). Este modelo possui 7m de abertura superior, para permitir que mais luz entre na cavidade, mantendo altura de 16,8 m. Uma refletância de 80% foi configurada para as paredes do poço, de forma a permitir melhor distribuição da luz na parte mais profunda do poço. O PAF permaneceu o mesmo todas as fachadas ou orientações solares testadas.

Figura 26 – Elevação do Poço de Luz Otimizado



Fonte: O autor (2024).

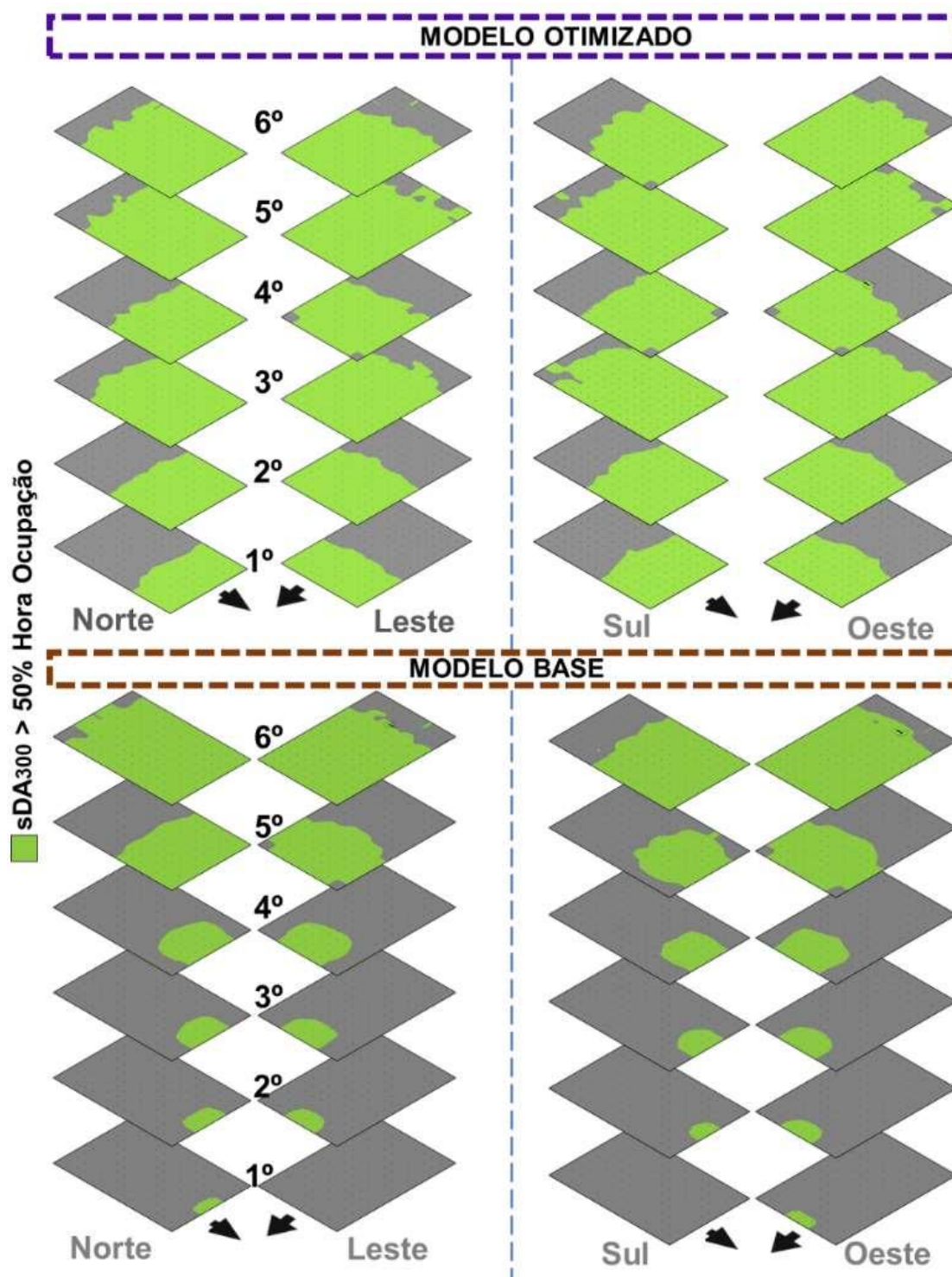
Considera-se nesta etapa do trabalho, que o poço de luz pode ser dividido em duas metades. A metade superior é intensamente iluminada pela luz direta do sol e a metade inferior é pouco influenciada por esta luz (Figura 19). A metade superior apresenta iluminação natural que decresce de cima para baixo com mais expressividade e a metade inferior tem iluminação natural mais estável (Figura 20). Assim, o PAF foi configurando em cada pavimento de acordo com a intensidade do alcance da luz, com base em Figura 19 e Figura 20. Desta forma, as novas simulações foram conduzidas de acordo com o que já foi discutido nos tópicos anteriores, integrando as melhores soluções encontradas. A comparação da distribuição de luz nos ambientes do modelo otimizado e o modelo base pode ser conferido na Figura 27 e Figura 28. Os resultados do percentual de sDA_{300} e ASE_{1000} podem ser conferidos nas Tabela 6.

Na Figura 27, é possível notar uma melhor distribuição do sDA_{300} em todas os ambientes do modelo otimizado em comparação ao modelo base. Antes, no modelo base, os ambientes ao topo recebiam uma grande quantidade de iluminação que decresce drasticamente nos pavimentos inferiores. Já no modelo otimizado, essa distribuição de luz é uniforme em todos os pavimentos.

Ainda que o topo no modelo base receba uma grande quantidade de luz natural, essa não é excessiva e comparação ao modelo base, como demonstra a Figura 28. Os valores de ASE permanecem concentrados próximos à janela até o 3º pavimento do modelo otimizado. Já no modelo base, o ASE chega a quase 1/3 do piso do ambiente no ambiente norte do modelo base. O sDA_{300} decresce até o 4º pavimento e volta a alcançar o fundo do ambiente a partir do 3º pavimento, diminuindo novamente até o piso.

É preciso observar que os resultados indicam que a metade inferior do poço se comporta de forma independente da metade superior. Isso se dá em função do reconhecimento de que a metade inferior deve ser configurada de maneira diferente do topo. Ao configurar uma alta refletância no piso e uma PAF maiores na parte inferiores, os ambientes são melhor beneficiados do que aqueles ao topo, com excesso de luz. O ASE não altera nesses ambientes.

Figura 27 – Digrama de comparação da distribuição do sDA entre o modelo otimizado e modelo base



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

poço que recebe grande quantidade de luz. Os valores máximos de sDA_{300} ocorrem na fachada Norte e Oeste, com 83%, Leste com 77% e Sul com 67%. Todos estes valores estão dentro do recomendado pela LM-83-12 (2012). Nota-se que em nenhuma fachada os valores de ASE_{1000} são superiores ao recomendado pela LM-83-12 (2012), ou seja, menor que 10%. O equilíbrio de luz nos ambientes no 6º pavimento com PAF de 10% ocorre de forma mais eficiente do que se usado um PAF de 20% (Tabela 7) em que valores de ASE_{1000} estão acima do recomendado.

O 6º pavimento é o que mais recebe luz direta do sol, o que influencia a iluminação por fachada. Portanto o ambiente norte é mais iluminado que o ambiente sul. Porém, essa quantidade de radiação solar decai a partir do 5º pavimento, mas ainda permanece intenso. Assim, justifica-se o uso de um PAF de 20% no 5º e no 4º pavimento para reduzir a entrada de luz solar direta nos ambientes sem prejudicar a iluminação indireta que alcança o ambiente. No 5º pavimento, os valores de sDA_{300} permanecem dentro do recomendado com valor máximo de 94% da fachada oeste e mínimo de 85% na fachada norte. O ASE_{1000} , só é preocupante na fachada norte, com 14%. Nas demais fachadas permanecem dentro do recomendado. O ambiente na fachada sul apresenta valores de iluminação maiores que norte, com sDA_{300} de 85%, mas não apresenta valores de ASE_{1000} . Neste caso, a fachada norte reflete uma quantidade maior de luz para a sul. Este fenômeno também se repete nos ambientes do 4º pavimento, configurado com o mesmo PAF. Isto demonstra que o uso do PAF de 20% proporciona uma melhor reflexão da luz indireta, desejável, nestes ambientes. Isto é possível devido ao uso de superfície de alta refletância e menor proporção de PAF na parte do poço com excesso de luz do sol. Assim, aumenta-se a superfície de reflexão nas paredes, que redireciona os raios para outras partes do poço ao mesmo tempo que PAF menor controla a entrada do excesso de luz.

Tabela 6 – Valores de sDA₃₀₀ e ASE₁₀₀₀ no Modelo Otimizado

MODELO OTIMIZADO					
PAVIMENTO	sDA₃₀₀ (%)				PAF
	NORTE	OESTE	SUL	LESTE	
6	83	83	65	79	10%
5	85	94	87	93	20%
4	59	61	63	61	20%
3	82	84	88	87	60%
2	57	61	60	60	60%
1	45	47	47	47	60%
ASE₁₀₀₀ (%)					
6	6	6	0	4	10%
5	14	10	0	10	20%
4	7	4	0	4	20%
3	7	4	0	2	60%
2	0	0	0	0	60%
1	0	0	0	0	60%
MODELO BASE					
PAVIMENTO	sDA₃₀₀ (%)				PAF
	NORTE	OESTE	SUL	LESTE	
6	95	90	70	85	20%
5	50	48	34	49	20%
4	20	10	16	20	20%
3	10	6	7	11	20%
2	6	2	3	6	20%
1	2	0	0	0	20%
ASE₁₀₀₀ (%)					
6	14	10	0	11	20%
5	9	4	0	5	20%
4	9	0	0	0	20%
3	0	0	0	0	20%
2	0	0	0	0	20%
1	0	0	0	0	20%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O 4º pavimento também recebe luz direta do sol, porém em menor quantidade. Assim, um PAF de 20% foi suficiente para permitir que os ambientes em todas as fachadas alcancem valores ideais de sDA₃₀₀, acima de 55%, conforme se verifica na tabela acima (Tabela 6). O ASE₁₀₀₀ permaneceu dentro do recomendado, abaixo de 10%. Portanto, neste pavimento, o PAF de 20% também controla o excesso de luz direta do sol e permite quantidades adequadas de luz natural em boa parte do piso dos ambientes. A partir da metade inferior do poço de luz, os valores de iluminação

tendem a um decréscimo expressivo (Figura 20). Sendo assim, os pavimentos 3º, 2º e 1º foram configurados com o PAF de 60%.

Os resultados da Tabela 6 mostram que a iluminação melhora em todos os ambientes de todas as fachadas a partir da metade inferior do poço. Assim como nos pavimentos acima, no 3º pavimento, o sDA_{300} é maior no ambiente da fachada sul, com valor de 88% e o menor valor ocorre na fachada Norte, com sDA_{300} de 82%, mesmo com PAF de 60%. A explicação para este fenômeno se ampara na hipótese de que o poço de luz funciona de maneira diferente dependendo da região na sua profundidade. A luz que se estabelece nessa região tem influência da capacidade de reflexão dos raios luminosos pelas superfícies do poço e não somente da posição do sol na abóboda celeste. Assim, a orientação solar não determina a intensidade de iluminação nesta região. No 2º e 1º pavimento, todos os ambientes apresentam valores de iluminação similares. Até o 2º pavimento, todos os ambientes do poço possuem iluminação conforme recomendadas pela LM-8312 (IES, 2012). O sDA_{300} é maior na fachada Oeste com 61% e menor na Norte com 57%. O ASE_{1000} é inexistente. No 1º pavimento, os valores de sDA_{300} estão próximos do recomendado. Em todos os ambientes, valores atingem 47%. É importante destacar que a iluminação sempre será maior no topo, portanto, os valores na base podem ser considerados ideais, pois, aumentam sem prejudicar qualidade da iluminação na parte superior⁹. Um valor de PAF igual a 20% foi testado nos ambientes ao topo (Tabela 7), porém resultou em aumento da iluminação excessiva e pouca contribuição para a iluminação adequada de outros ambientes. Assim, a redução pela metade do PAF ao topo pareceu uma solução mais eficiente.

⁹ Em comparação com o modelo base de 5m de abertura, PAF 20% e refletância 0.20

Tabela 7 – Modelo não otimizado com PAF de 20% ao topo

Modelo Alternativo, Não Otimizado, com PAF 20% ao topo					
PAVIMENTO	sDA₃₀₀ (%)				PAF
	NORTE	OESTE	SUL	LESTE	
6	100	100	100	100	20%
5	83	84	75	87	20%
4	56	59	57	57	20%
3	76	80	83	82	60%
2	56	57	60	58	60%
1	44	43	45	44	60%
ASE₁₀₀₀ (%)					
6	20	21	0	18	20%
5	14	10	0	10	20%
4	7	4	0	4	20%
3	7	4	0	2	60%
2	0	0	0	0	60%
1	0	0	0	0	60%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

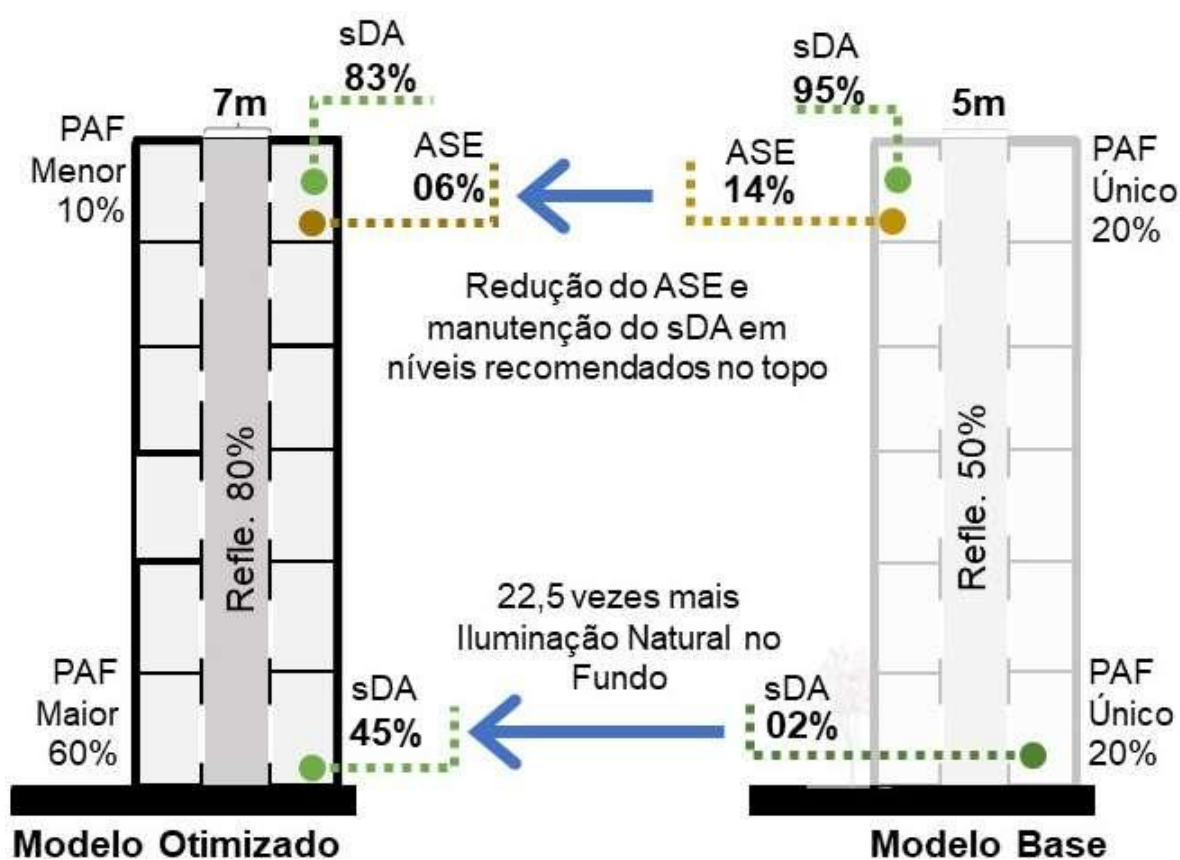
Nesta pesquisa, constata-se que o poço de luz muda de comportamento a partir de duas metades, uma superior e uma inferior. Este entendimento é indispensável para compreender como a luz vai se comportar até entrar nos ambientes. Na metade superior, predomina-se a luz do sol direta, na inferior, predomina a indireta. Assim, com a configuração de PAF variando pela profundidade, este modelo otimizado atingiu melhores valores de iluminação natural em todos os ambientes. A adoção de diferentes PAF redistribui a luz concentrada na parte superior e para alcançar a parte inferior, que comumente é mais escura. Mas esta solução só foi eficiente com o uso de alta refletância e a geometria maximizada, que contribuíram para a melhoria dessa distribuição da luz. Em outras palavras, mais luz entra e mais luz é distribuída, enquanto o excesso é redistribuído para a região escura.

É importante destacar a influência do piso do poço como superfície refletora da luz para os ambientes ao fundo. Esse possui uma geometria quadrada de 7m e refletância igual a 0.80, equivalente a um piso de cor branca. Assim, a luz que seria absorvida e perdida no fundo retorna para cima, entrando nos ambientes. Este caminho inverso da luz é extremamente benéfico nos ambientes inferiores, conforme observado na Figura 29.

aquecimento do espaço. Mas esta pesquisa não se aprofunda no mérito do assunto, embora reconheça o risco da luz direta do sol pela métrica ASE (IES, 2012).

Portanto, o modelo otimizado, obteve um aumento da quantidade luz natural correspondente a 45 vezes o valor encontrado no primeiro pavimento do modelo base, de geometria 5m. Contudo, sem aumentar a luz potencialmente desconfortável no pavimento superior (Figura 30).

Figura 30 – Diagrama de comparação entre o modelo base e o modelo otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por fim, este trabalho sugere alguns parâmetros de um poço de luz fechado baseado no modelo otimizado testado. Estas sugestões podem ser incorporadas aos códigos de obras locais, desde que sejam discutidas as dimensões em função das características climáticas locais. Assim, sugere-se:

- Utilizar superfícies de alta refletância nas paredes dos poços.
- Maximizar a dimensão geométrica do poço, ou abertura superior;
- Os PAF's devem possuir aberturas diferentes ao topo e na parte mais profunda do vão. Para isso, recomendam-se as seguintes proporções:
 - Último pavimento superior: PAF = Abertura 1/6 em relação ao PAF do último pavimento ao fundo, em todas as fachadas.
 - Penúltimo pavimento superior: PAF = Abertura 1/3 em relação ao PAF do último pavimento ao fundo, em todas as fachadas.

A relação de largura e altura pela profundidade do ambiente é substituída pela proporção de abertura de fachada, em função do escopo do trabalho. Novamente, estas sugestões precisam ser verificadas às necessidades de cada região pois refletem apenas os resultados dos testes neste estudo. Os resultados encontrados nesta pesquisa se limitam à altura e à profundidade do ambiente, ao clima, e às dimensões do vão do poço.

5 CONCLUSÃO

A conclusão deste trabalho é dívida em três itens: síntese do trabalho, principais contribuições, limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Síntese do trabalho

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. Por fim, foi analisado um modelo de poço otimizado a partir dos resultados encontrados ao longo do estudo. No edifício simulado, o aumento da dimensão geométrica do poço, da refletância e do PAF promoveram uma melhoria global da iluminação, principalmente na metade superior do poço, mas não garantiram iluminação adequada nos pavimentos inferiores. No entanto, no modelo otimizado, a iluminação natural melhorou em todos os ambientes.

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. 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.

Aumentar a refletância das paredes do poço de luz também promove melhorias na iluminação natural dos ambientes internos. O ganho na iluminação é maior nos ambientes 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 dos ambientes. No entanto, esse ganho com a refletância é limitado. Na metade inferior do edifício, onde não foi registrada luz solar direta, os ganhos em iluminação são minimizados e a orientação solar influencia pouco na iluminação nos ambientes.

O aumento do PAF é uma solução que também 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 pavimento, 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 dos ambientes. Porém, nos ambientes 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.

Entende-se neste trabalho que o poço de luz se comporta de forma diferente em suas duas metades, uma superior e outra inferior. Portanto, uma variação do PAF ao longo do edifício é necessária. Ao assumir uma proporção menor na metade superior do edifício e maior na metade inferior, evita-se o aumento do risco de desconforto visual nos pavimentos superiores que recebem maior incidência solar direta. Ao mesmo tempo, também é necessário aumentar a superfície de reflexão da luz solar que é direcionada para os pavimentos inferiores.

Assim, o modelo otimizado reuniu as melhores configurações testadas nesta pesquisa. Uma abertura superior de 7 m, refletância de 0.80 nas paredes do poço e PAF variando em cada pavimento. As demais configurações foram mantidas em relação ao modelo base. Com isto, mais luz natural entra no poço pela geometria e é mais bem distribuída pelas paredes com alta refletância. Ao mesmo tempo, em função da variação do PAF, a entrada de excesso de luz é controlada nos ambientes da parte superior e facilitada nos ambientes da porção inferior.

Verificou-se que o modelo de poço otimizado possui bom desempenho da iluminação natural. Um PAF de 10% no 6º pavimento, no topo da edificação, reduz a luz excessiva sem prejudicar a os valores ideais de iluminação natural. Um PAF de 20% no 5º, 4º pavimentos também produz os mesmos efeitos. Os ambientes do 3º e 2º pavimentos apresentam valores ideais de iluminação natural com PAF de 60%. O ambiente no 1º pavimento, contudo, alcança valores de sDA₃₀₀ próximos do recomendado, com 45% ao norte e 47% nas outras fachadas. Em comparação ao modelo base inicialmente simulado, o ganho na iluminação natural na fachada norte é 22,5 vezes maior. Apenas o ambiente norte do 5º pavimento apresenta valores não recomendados de ASE, com 14%. Ainda assim, dos 24 ambientes no edifício modelado, este é o único nesta situação. Justifica-se a melhoria na iluminação do modelo otimizado quando comparado ao modelo base, ambos com 24 ambientes. No modelo otimizado 20 ambientes alcançam valores ideais de sDA₃₀₀ enquanto no modelo base são apenas 4, sendo que dois desses possuem luz excessiva. Percebe-

se no modelo otimizado que apenas 6º pavimento possui maior quantidade luz. Nos outros pavimentos, essa é a fachada com menor iluminação, o que demonstra que as configurações aplicadas redistribuem o excesso de luz para regiões escuras do poço.

5.2 Principais contribuições do trabalho

Esta pesquisa se soma à literatura existente e permite que projetistas entendam o melhor o funcionamento do poço de luz para além do exigido pelas normativas locais. Assim, algumas considerações importantes sobre esse estudo são:

- Tem-se como diferencial o uso de métricas dinâmicas mais precisas e contemporâneas para avaliar a condição de iluminação natural nos ambientes;
- Testa-se o poço de luz sob o clima de uma cidade e latitude não antes pesquisada, São Paulo, Brasil (23º Sul);
- Verifica-se um modelo de poço de luz ideal para as condições do estudo, como o hiper dimensionamento de 7 m da abertura do poço de luz, além outras configurações como PAF's diferentes por pavimento associado a superfícies de alta refletância;
- Constata que o poço de luz pode assumir comportamento diferente em suas duas metades, uma superior com excesso de luz natural e outra, inferior, com pouca disponibilidade dessa.

Com isso, são sugeridas diretrizes¹⁰ para otimização do projeto de poço de luz, sendo necessário verificar adaptação às condições climáticas e normas locais para onde é executado o projeto do poço:

- Maximização da dimensão geométrica;
- Uso de superfícies de alta refletância na parede do poço de luz;
- Dimensionamento das Janela dos ambientes proporcional à localização do ambiente na profundidade do poço, sendo: Último pavimento ao topo: PAF's = Abertura 1/6 em relação ao PAF's do último pavimento ao fundo, em todas as fachadas. Penúltimo pavimento ao topo: PAF's = Abertura 1/3 em relação ao PAF's do último pavimento ao fundo, em todas as fachadas.

¹⁰ Estas diretrizes se limitam às configurações deste estudo.

5.3 Limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros

Uma importante limitação do modelo utilizado se deve à ausência de entorno no modelo simulado, que influencia a luz refletida de edificações próximas. Ressalta-se ainda a ausência de mobiliário interno, que influencia na distribuição de luz interna. Assim, sugere-se que pesquisas futuras estudem a influência destas variáveis aplicadas ao que já foi discutido neste trabalho.

Além disso, o estudo não considerou a ventilação e o conforto térmico do poço de luz. As escolhas para as dimensões adotadas para as janelas se fundamentaram apenas na análise lumínica, desconsiderando as questões que envolvem conforto térmico. A justificativa se dá em função do escopo da pesquisa e limitações de hardware.

Torna-se necessário analisar ainda outras latitudes e climas a fim de comparar os resultados em diferentes regiões. Aplicar diferentes configurações do poço, como geometria circular, retangular, inclinação de paredes, especularidade das superfícies e cobertura do topo da cavidade. Todas estas configurações são limitadas ao tempo de execução do método e capacidade de hardware. Nesta pesquisa, o método foi simplificado para que as simulações ocorressem de forma otimizada.

Esta pesquisa reconhece que as discussões sobre o tema ainda não se esgotaram, embora o trabalho tenha avançado nas discussões existentes sobre melhorias no poço de luz. O estudo atende ao objetivo geral ao comparar diferentes configurações arquitetônicas no poço de luz e analisar a influência na iluminação natural do ambiente. Os objetivos específicos são atendidos e reforçam pesquisas anteriores, assim como, respaldam possíveis pesquisas futuras. Espera-se que os métodos e resultados contidos neste trabalho possam contribuir com a investigação da iluminação natural de outros objetos zenitais além do poço de luz, como claraboias, átrios, lanternins, tubos de luz.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15215-3: Iluminação Natural Parte 3: Procedimentos para avaliação de iluminação natural em ambientes internos: Rio de Janeiro. ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-1: Edificações Habitacionais Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro. ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15575-1: Edificações Habitacionais Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro. ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15215-3: Iluminação Natural Parte 3: Procedimentos para avaliação de iluminação natural em ambientes internos: Rio de Janeiro. ABNT, 2024.
- ACOSTA, I., Navarro, J. & Sendra, J. J. Towards an analysis of the performance of lightwell skylights under overcast sky conditions. *Energy and Buildings*, 64, 10-16, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.009>
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.005>
- 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. 220-244. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.03.016>
- ALBUQUERQUE, M. S. C, AMORIM, C. N. D. 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, 2012.
- BALABEL, A., Alwetaishi, M., Abdelhafiz, A., Issa, U., Sharaky, I. A., Shamseldin, A. K., Al-Surf, M. & Al-Harhi, M. Potential of solatube technology as passive daylight systems for sustainable buildings in Saudi Arabia. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 339-353, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.001>
- BEDAQUE, P., BRETONES, P.S. Variação da posição de nascimento do Sol em função da latitude. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 38(3), 1-11, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1590/1806-926-RBEF-2015-0023>
- BELLIA, L., Fragliasso, F. & Stefanizzi, E. Daylit offices: A comparison between measured parameters assessing light quality and users' opinions. *Building and Environment*, 113, 92-106, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.014>

BOLSSONI, G. C., LARANJA, A. C. & Alvarez, C. Disponibilidade de iluminação natural em ambiente interno orientado para poço de iluminação. Caderno PROARQ, 31, 101-117, 2018. Disponível em:
<https://cadernos.proarq.fau.ufrj.br/public/docs/Proarq31%20ART%2005.pdf>

BOYCE, P., Hunter, C., & Howlett, O. New York: The Benefits of Daylight through Windows. Rensselaer Polytechnic Institute. 2003.

BUGEAT, A., Bernoit, B. & Fernandez, E. Improving the daylighting performance of residential light wells by reflecting and redirecting approaches. Solar Energy, 207, 1434-1444, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.099>

CARPINETTI, L.C.R.; FILHO, E.V.G.; PORTO, A.J.V.; JASINEVICIUS, R.G. Rugosidade Superficial Conceitos e princípios de medição. São Carlos: 2020.

CASTRO, A. P. A. S., Labaki, L. C., Caram, R. M., Basso, A. & Fernandes, M. R. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. Ambiente Construído, 3(2), 69-76, 2003. Disponível em:
<https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/3452/1871>

CHOW, T.T., LIN, Z., WANG, Q.W. Flow analysis of condenser cooling air delivery via building light well. Applied Thermal Engineering, Hong Kong, v. 21, n. 8, p. 831-843, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00084-3](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00084-3)

CIBSE-Chartered Institution of Building Services Engineers. Code for Lighting. 16ª edição. Londres: The Society of Light and Lighting, 2002.

DONG, L.; He, Y.; QI, Q.; WANG, W. Optimization of daylight in atrium in underground commercial spaces. Energy & Buildings, v. 202, p. 1-12, 2022.

DOMINGUEZ-AMARILO, S., Campano, M.A., Acosta, I., Díaz-Borrego, J., Aguilar-Carrasco, M.T. Validation of lighting parametric workflow tools of Ladybug and Solemma using CIE test cases. Journal of Building Engineering, v. 64, p. 1-25, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105608>

DUBOIS, M. Solar Shading and Building Energy Use. Suécia: Lund University. 2001. Disponível em:
<https://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/BKL/publications/TABK-3000/Report3049.pdf>

DUFFY, J. F. & Czeisler, C.A. Effect of Light on Human Circadian Physiology. Sleep Medicine Clinics, 4(2), 165-177, 2009. Doi:
<https://doi.org/10.1016/j.jsmc.2009.01.004>

EDWARDS, L., & TORCELLINI, P. A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants. National Renewable Energy Laboratory, 2002.

ELBATRAN, Raghda, M.; ISMAEEL, Walaa, S.E. Applying a parametric design approach for optimizing daylighting and visual comfort in office buildings. *Ain Shams Engineering Journal*, Cairo, v. 12, n. 3, p. 3275-3284, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.014>

FAREA, T. F., Ossen, D. R., Alkaff, S. & Kotani, H. CFD modeling for natural ventilation in a lightwell connected to outdoor through horizontal voids. *Energy and Buildings*, 86, 502-513, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.030>

FIGUEIREDO, C.R. & Cavalcanti, M.C. Validação do desempenho lumínico de um edifício habitacional em Brasília através de simulação computacional e de medições, 2022.

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>

GOUDING, J., Lewis, J.O., Bastsford, T.C.S.B.T. (1992). *Energy in architecture : the European passive solar handbook*. Environmental Science Engineering.

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>

HESCHHONG, L. (2002). Daylighting and Human Performance. *ASHRAE Journal*, 44(8), 65-67. <https://www.livingdaylights.nl/wp-content/uploads/2016/12/Heschong-2002.-Daylighting-and-Human-performance..pdf>

HOPKINSON, R. G., PETHERBRIDGE, P., & LONGMORE, J. *Daylighting*. Heinemann, London, 1966.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. IES LM-83-12 Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). Illuminating Engineering Society of North America, 2012.

INMET-Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil, período: 1991-2020. 20122. Disponível em: <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>

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

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>

KOEPPEL, W. Las zonas de clima. In: W. Koeppen (Ed.), *Climatologia: Con un estudio de los climas de la Tierra* p. 145-227. Fondo de Cultura Económica., 1948.

KOTANI, H., Narasaki, M., Sato, R., Yamanaka, T. Environmental assessment of light well in high-rise apartment buildings. *Building and Environment*, 38(2), p. 283-289, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00033-1)

KRISTL, Z. & KRAINER, A. Light wells in residential building as a complementary daylight source. *Solar Energy*, 65(3), 197-206, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00127-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00127-3)

LAMBERTS, Roberto.; DUTRA, Luciano.; Pereira. PEREIRA, Fernando, O.,R. Eficiência energética na arquitetura. 3ª edição. Rio de Janeiro: Procel, 2014.

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>

LEITE, A.G., Souza, J.P.M., Barbosa, S.A., Alberto, K.C. (2024) Desempenho da iluminação natural em poços de luz de edifícios residenciais. *Oculum Ensaios*, 21, 1-12. DOI: <https://doi.org/10.24220/2318-0919v21e2024a5560>

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>

LITTLEFAIR, P. Daylight prediction in atrium buildings. *Solar Energy*, v. 73, n. 2, p. 105-109, 2002.

MARTIN, 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>

MADAN, Ö. K., Chamilothoni, K., Duijnhoven, J.V., Aarts, M.P.J., Kort, Y.A.W.D. (2024). Restorative effects of daylight in indoor environments – A systematic literature review. *Journal of Environmental Psychology*, 97, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2024.102323>

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, Setembro 10-11). Daylighting Metrics: Is there a relation between useful daylight iluminância and daylight glare probability. [Conference Paper]. First Building Simulation and Optimization Conference, Loughborough, Reino Unido. <https://www.researchgate.net/publication/267556994>

MOHSENIN, M.; HU, J. Assessing daylight performance in atrium buildings by using Climate Based Daylight Modeling. *Solar Energy*, v. 119, p. 553-560, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.011>

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.

NABIL A, & Mardaljevic J. (2005). Useful Daylight Illuminance: A New Paradigm to Access Daylight in Buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-59. <https://doi.org/10.1191/1365782805li128oa>

NABIL, A., Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905-913. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>

NADA, S.A.; SAID. M.A. Solutions of thermal performance problems of installing AC outdoor units in buildings light wells using mechanical ventilations. *Applied Thermal Engineering*, Hong Kong, v. 131, p. 295-310, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.016>

PHILLIPS, Derek. *Daylighting: Natural Light In Architecture*. 1ª edição. Londres: Architectural Press, 2004.

RASTEGARI, M., Pournaseri, S., Sanaieian, H. (2023). Analysis of daylight metrics based on the daylight autonomy (DLA) and lux illuminance in a real office building atrium in Tehran. *Future Batteries*, 263(b), p. 01-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125707>

REINHART, C. F., & Walkenhorst, O. (2001). Validation of Dynamic RADIANCE-Based Daylight Simulations for a Test Office with External Blinds. *Energy and Buildings*, 33(7), 683-697.

SHEN, H. e Tzempelikos, A. (2012). Daylighting and energy analysis of private offices with automated interior roller shades. *Solar Energy*, 86(2), p. 681-704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.016>

SITOIE, C.L. (2019). TRÓPICO DE CAPRICÓRNIO E LINHA DO EQUADOR COM A SOMBRA ZERO. *Revista Terceira Margem Amazônia*, 5(13), 165-192. <https://www.revistaterceiramargem.com/index.php/terceiramargem/article/view/314/221>

SOLLEMA inc. (2022). DIVA users: Try ClimateStudio today! ClimateStudio is the Successor to DIVA-for-Rhino. <https://www.sollemma.com/blog/diva-users-start-climatestudio-today>

SOUZA, J.P.M., Alberto, K.C., Barbosa, S.A. (2024). Investigando a influência das variáveis arquitetônicas na iluminação natural do poço de luz residencial. *Revista de Arquitetura* 26(1), 91-106. DOI: 10.14718/RevArq.2024.26.4599

SOUZA, J.P.M., Alberto, K.C., Barbosa, S.A. (2022). Lightwell in residential building: Architectural solutions to the daylighting performance through parametric simulation. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 38, 65-71. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.38.0065>

SREELAKSHMI, Kavuthimadathil; RAMAMURTHY, K. Location-specific optimization of free conic dome daylight collector for improved light pipe performance. *Building and Environment*, v. 256, p. 1-16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111497>

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>

TALEAEL, Maryam; SANGIN, Hamed. Thermal comfort, daylight, and energy performance of envelope-integrated algae-based bioshading and static shading systems through multi-objective optimization. *Journal of Building Engineering*, v.90, n.1, p. 1-32, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.109435>

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>

WIR-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>