

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Elementos de controle solar: a interação entre forma e desempenho em
processos de projeto computacionais**

Kelly Diniz de Souza
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

KELLY DINIZ DE SOUZA

**Elementos de controle solar: a interação entre forma e desempenho em
processos de projeto computacionais**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Andressa C Pena Martinez

Coorientadora: Joyce Correna Carlo

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729e
2024

Souza, Kelly Diniz de, 1983-

Elementos de controle solar: a interação entre forma e
desempenho em processos de projeto computacionais / Kelly
Diniz de Souza. – Viçosa, MG, 2024.

1 tese eletrônica (232 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Andressa Carmo Pena Martinez.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Arquitetura e Urbanismo, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.812>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Iluminação natural. 2. Otimização estrutural. 3. Luz na
arquitetura. 4. Arquitetura - Projeto auxiliado por computador.
5. Brise-soleil. I. Martinez, Andressa Carmo Pena, 1982-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDD 22. ed. 729.28

KELLY DINIZ DE SOUZA

Elementos de controle solar: a interação entre forma e desempenho em processos de projeto computacionais

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 7 de outubro de 2024.

Assentimento:

Kelly Diniz de Souza
Autora

Andressa Carmo Pena Martinez
Orientadora

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 12/12/2024 às 06:43:32 e pela orientadora em 12/12/2024 às 17:04:19. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **X1US.9V56.9GSX** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Ao longo do percurso trilhado nestes últimos anos, algumas pessoas contribuíram significativamente para o delineamento e o conteúdo da pesquisa ora apresentada, merecendo uma palavra de sincero agradecimento. Agradeço, desse modo, à minha família. Ao Gustavo, meu companheiro eterno, pela ajuda, pelo apoio e discussões sobre estruturas que me ajudaram a definir a proposta deste trabalho. Por estar comigo durante as medições, nas situações mais inusitadas, sob sol e sob chuva. E foi muita chuva! Acima de tudo, por continuar acreditando mais em mim do que eu mesma e dividir comigo seus melhores sonhos. Ao Bernardo e à Carolina, meus filhos e maiores amores desta vida, meus “atrapalhantes” nas medições e que, mesmo tão novos, souberam entender a mãe que estava sempre ocupada e cansada. E à minha mãe, que jogou na minha cara que eu não podia desistir, durante uma das muitas crises de desespero que eu vivi nesta jornada.

Aos meus colegas de trabalho, da Diretoria de Projetos e Obras da Universidade Federal de Viçosa, que não tiveram escolha e foram incorporados nesta trajetória. Um agradecimento especial ao Nilton, José Marcelo, Taylone e Célio que me auxiliaram tanto durante as medições. Agradecimento especial ao Giovani, que tanto me auxiliou com o desenvolvimento do código.

Tenho muito a agradecer a todos os servidores dos prédios em que as medições foram realizadas, àqueles que autorizaram minha pesquisa, àqueles que me disponibilizaram suas salas e que me receberam tão bem em seus espaços de trabalho. Meu muito obrigada ao pessoal da Diretoria de Projetos e Obras, do Departamento de Ciências Sociais, do Departamento de Biologia (Prédio das Licenciaturas) e do Departamento de Medicina e Enfermagem desta Universidade. Agradecer, ainda, ao Caio Castriotto que, mesmo sem me conhecer, foi capaz de me ajudar com o processo de avaliação estrutural, tendo sido essencial para que eu pudesse finalizar esta Tese. E ao Ericson, pelo apoio nas medições.

Ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa e aos seus professores, aos laboratórios NÓ.Lab e Latecae. À minha orientadora, professora Andressa Carmo Pena Martinez e à minha coorientadora Joyce Correna Carlo pelas orientações e contribuições a este estudo. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

SOUZA, Kelly Diniz de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2024. **Elementos de controle solar: a interação entre forma e desempenho em processos de projeto computacionais.** Orientadora: Andressa Carmo Pena Martinez. Coorientadora: Joyce Correna Carlo.

A função básica da iluminação é prover as condições visuais adequadas ao desempenho das atividades. Deste modo, a importância do uso adequado da luz natural nas edificações requer o planejamento entre o balanço da carga térmica, o controle do ofuscamento e ajustes para se adequar à disponibilidade de luz natural. Estratégias de projeto passivas são de grande importância para melhoria da qualidade ambiental das edificações, com destaque para a função de dispositivos de proteção solar. Esta pesquisa tem o objetivo de investigar um fluxo de trabalho baseado em um código para obtenção e otimização de elementos de controle solar com geometrias desenvolvidas a partir de simulações que adicionam o desempenho estrutural a critérios de desempenho luminoso. Partimos da hipótese de que a integração do material, de sua estrutura e de sua forma durante a proposição de elementos de controle solar gerados a partir de processos *form-finding* impacta o desempenho da luz do dia. A pesquisa está dividida em revisão de literatura, avaliação de desempenho luminoso de dispositivos de sombreamento já instalados em contexto real e proposição de novos elementos de proteção a partir da integração entre concepção e modelagem paramétrica, simulações computacionais e otimização. A análise de dispositivos existentes é o objeto de pesquisa do primeiro experimento, voltado para investigação de dispositivos do tipo *brise-soleil* e painel microperfurado, instalados em edificações da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais. Na fase seguinte, o segundo experimento incorpora a avaliação do desempenho estrutural da peça às investigações do desempenho luminoso de dispositivos de sombreamento do tipo *brise-soleil*. Como resultado principal, é possível apontar que a integração do material, de seu desempenho estrutural e de sua forma durante a proposição de elementos de controle solar gerados a partir de processos *form-finding* pode contribuir positivamente no desempenho da luz do dia, embora ainda seja necessária uma investigação que conduza a um melhor aproveitamento da capacidade do material.

Palavras-chave: processos *form-finding*; iluminação natural; desempenho estrutural; desempenho luminoso ; *brise-soleil*; painel microperfurado

ABSTRACT

SOUZA, Kelly Diniz de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2024. **Shading devices: interaction between shape and performance in computational design.** Adviser: Andressa Carmo Pena Martinez. Co-adviser: Joyce Correia Carlo.

The basic function of lighting is to provide adequate visual conditions for the performance of activities. Therefore, the importance of adequate use of natural light in buildings requires planning between the thermal load balance, glare control and adjustments to adapt to the availability of natural light. Passive design strategies are of great importance for improving the environmental quality of buildings, with emphasis on the function of solar protection devices. This research aims to investigate a workflow based on a code for obtaining and optimizing solar control elements with geometries developed from simulations that add structural performance to lighting performance criteria. We start from the hypothesis that the integration of the material, its structure and its shape during the proposal of solar control elements generated from form-finding processes impacts the performance of daylight. The research is divided into a literature review, evaluation of the luminous performance of shading devices already installed in a real context and the proposal of new protection elements based on the integration of design and parametric modeling, computational simulations and optimization. The analysis of existing devices is the research objective of the first experiment, aimed at investigating devices of the *brise-soleil* type and micro perforated panel, installed in buildings of the Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais. In the next phase, the second experiment incorporates the structural performance of the element into the investigations of the luminous performance of shading devices of the *brise-soleil* type. As a main result, it is possible to point out that the integration of the material, its structural performance and its shape during the proposal of solar control elements generated from form-finding processes can contribute positively to the daylight performance, although further research is still needed to lead to a better use of the material's capacity.

Keywords: form-finding processes; daylighting; structural performance; daylighting performance; *brise-soleil*; micro perforated panel

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	14
1.2	RESUMO DAS ABORDAGENS METODOLÓGICAS	16
1.2.1	Definição e caracterização das etapas experimentais	16
	Primeira etapa experimental	19
	Segunda etapa experimental	20
1.2.2	Processos <i>form-finding</i> na concepção e avaliação de desempenho de elementos de controle solar	23
1.3	ESTRUTURA DA TESE	23
	REFERÊNCIAS	24
2	PROCESSOS <i>FORM-FINDING</i> NAS ANÁLISES DE DESEMPENHO DO EDIFÍCIO – UMA REVISÃO	27
2.1	INTRODUÇÃO	27
2.2	MÉTODO	30
2.3	RESULTADOS	32
2.3.1	<i>Form-finding</i> : conceitos e aplicabilidade	32
2.3.2	Visão geral das abordagens	35
	Busca da forma aplicada à volumetria da edificação	35
	Busca da forma aplicada a estudos que abordam emissão de gás carbono	36
	Busca da forma aplicada a componente da edificação – coberturas	37
	Busca da forma aplicada a envoltórias e elementos de controle solar	38
	Busca da forma aplicada a estudos que abordam integração de sistemas de geração de energia	39
2.4	DISCUSSÃO	48
2.4.1	Sistematização dos resultados	49
	Modelagem do edifício e simulação de desempenho	49

	Validação	52
	Otimização da forma	53
2.5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57
3	CONCEPÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR EXTERNOS FIXOS – UMA REVISÃO	65
3.1	INTRODUÇÃO	65
3.1.1	Ferramentas computacionais no processo de projeto	67
3.1.2	Elementos de controle solar	68
3.2	MÉTODO	70
3.3	RESULTADOS: VISÃO GERAL DAS ABORDAGENS	72
3.3.1	Análises de desempenho que relacionam o contexto	72
3.3.2	Análises de desempenho que avaliam fachadas com dispositivos para controle solar	73
3.3.3	Estudos que abordam integração de sistemas de geração de energia	73
3.3.4	Avaliação de desempenho em um ambiente de análise	73
	Indicadores para avaliação do desempenho da iluminação natural	77
	Indicadores para avaliação do desempenho da ventilação natural	78
	Indicadores de desempenho térmico	78
	Indicadores de desempenho energético	78
3.4	DISCUSSÃO	82
3.5	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	89
4	INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ DO DIA EM ENVOLTÓRIAS COM DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO ESTÁTICOS	97
4.1	INTRODUÇÃO	97
4.2	MÉTODO	100

4.2.1	Estudo de caso	100
4.2.2	Validação do modelo e verificação de sua geometria através de medições	104
4.2.3	Simulação de desempenho e definição dos indicadores	107
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
4.3.1	Qualidade do modelo validado	110
4.3.2	Admissão e distribuição da luz do dia e exposição à luz solar	113
4.3.3	Proteção contra ofuscamento	117
4.3.4	Vista externa	119
4.4	CONCLUSÃO	122
	REFERÊNCIAS	125
5	ANÁLISE DOS EFEITOS DA INTEGRAÇÃO ENTRE MATERIAL, DESEMPENHO ESTRUTURAL E FORMA NA PROPOSIÇÃO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR ESTÁTICOS	129
5.1	INTRODUÇÃO	129
5.1.1	O desempenho estrutural do elemento	132
5.2	MÉTODO	133
5.2.1	Estudo de caso	134
5.2.2	Concepção formal do dispositivo de proteção	136
5.2.3	Análise do desempenho estrutural do elemento	137
5.2.4	Investigação do desempenho luminoso do elemento de proteção	138
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	141
5.3.1	A geometria da aleta	141
5.3.2	O desempenho luminoso verificado	145
5.4	CONCLUSÃO	150
	REFERÊNCIAS	152
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES DA TESE	156
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	156
6.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	157

6.3	CONCLUSÕES FINAIS	159
6.4	LIMITAÇÕES DA PESQUISA E CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	161
	APÊNDICES	163
	APÊNDICE A. Caracterização dos modelos de elementos de controle solar instalados na Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais	164
	APÊNDICE B. Caracterização dos ambientes avaliados	166
	APÊNDICE C. Propriedades ópticas dos materiais de revestimento: determinação da refletância e absorvância solares	172
	APÊNDICE D. Caracterização e resultados das medições e simulações	175
	APÊNDICE E. Resultados das simulações do modelo proposto	223

1. INTRODUÇÃO GERAL

A partir da segunda metade do século XX, os meios de concepção arquitetônica através de tecnologias digitais e a proposição de demandas por edificações mais sustentáveis passaram a ter maior influência nos debates da arquitetura. Neste contexto, o entendimento dos conceitos e práticas que guiaram os processos de projeto na arquitetura contemporânea a partir dos anos de 1960 tornaram possíveis a compreensão e a sistematização do ato projetivo. Ao invés da afirmação de fundamentos, como os tratados de arquitetura expuseram ao longo da história, ocorre, desde então, tentativas de questionamentos, ampliação de relações e estudos dos limites interdisciplinares que envolvem a arquitetura (Sykes, 2013).

O caráter conceitual então experimentado traduz o crescente interesse na metodologia do projeto que busca reconstituir a disciplina arquitetônica por meio de conceitos mediadores derivados de outras áreas - como filosofia e linguística, que ligam a arquitetura a outros campos sociais e, ao mesmo tempo, buscam um território próprio para a arquitetura (Hays, 2000; Nesbitt, 2006). O contexto discursivo deste período conformou-se, desde modo, a partir da relação da arquitetura com a teoria, marcado inicialmente pela aplicação de procedimentos teóricos autoconscientes, até a ideia de campo expandido da arquitetura e as concepções pós-teóricas que indicam uma guinada para a ação pragmática na aplicação de processos de projeto (Hays, 2000; Vidler, 2000¹).

Como apontado por Papamichael e Protzen (1993), a teoria resultante via o processo de projeto arquitetônico como uma atividade racional, ou seja, como pensar antes de agir que, conforme Caetano e Leitão (2020), lidava com os problemas de processo de projeto de uma maneira argumentativa.

Se em um primeiro momento, a tradução de conceitos linguísticos e filosóficos engendrou um período de alta produtividade intelectual, crítica e de geração de processos experimentais, a partir dos anos de 1990, pôde-se verificar um deslocamento do campo teórico interdisciplinar para um campo de conceitos e teorias da própria área, no qual o uso de certas representações, técnicas e tecnologias computacionais predominaram. Este período marcou a

¹ As análises de Anthony Vidler inauguram um campo metodológico em que a história das ideias, a história da linguagem e a história das ciências se cruzam e se misturam com a história da arquitetura. Ao lado de algumas outras, cada qual à sua maneira, as ideias de Vidler contribuíram significativa e continuamente para que “as coisas possuam, no grau máximo possível, uma qualidade ou atributo”, para que redefinam constantemente os limites que influenciam o desenvolvimento do pensamento arquitetônico, de modo a não “levá-lo a um fim” (Tschumi, 2006, p. 177).

tentativa de caracterização da nova arquitetura que estava sendo produzida e a preocupação em aplicar corretamente as técnicas de processo de projeto computacional na arquitetura, estimulando seu uso (Caetano; Leitão, 2020).

Como apresentado em Oxman (2006), o surgimento de um discurso teórico que passou a refletir a crescente importância do papel dos processos de projeto na prática arquitetônica se tornou uma questão disseminada na década de 1990. Esta produção serviu como catalisador durante este período para propiciar o desenvolvimento das tecnologias digitais e de novas técnicas de representação gráfica e de simulação, característicos dos anos 2000.

Esta evolução das ferramentas de processo de projeto desencadeou, portanto, uma revolução na teoria arquitetônica, resultando em uma nova percepção do processo de projeto como pesquisa (Oxman; Oxman, 2014). Isto tornou possível seu entendimento como um meio para produção de conhecimento, promovendo uma mudança teórica seguindo uma direção mais científica e baseada em computação (Caetano; Leitão, 2020). Segundo Kolarevic (2009), novas arquiteturas foram originadas desta revolução, indicando uma multiplicidade de abordagens habilitadas e conduzidas digitalmente.

Nos anos 2000, o avanço tecnológico e as técnicas de uso das ferramentas computacionais potencializaram a dimensão experimental e a investigação projetual. Nesse período, conceitos foram gerados ou apropriados por meio da exploração da lógica do funcionamento computacional, estabelecendo grande parte do discurso teórico. Como apontado em Kolarevic (2009), a arquitetura abandonou o discurso do estilo e passou a se caracterizar pela sua capacidade de tirar proveito das inovações oferecidas pela ciência e pela tecnologia.

Segundo Oxman (2006), talvez o maior desafio trazido pelas condições criadas a partir do surgimento das novas tecnologias de processos de projeto tenha sido o surgimento simultâneo de novas estruturas teóricas e filosóficas que constituíram seus fundamentos intelectuais. Se inicialmente os processos de projeto ditos convencionais se desenvolviam a partir de um fluxo mais linear de trabalho e com maior dispêndio de tempo, a incorporação de tecnologias digitais permitiu novas relações entre a concepção e o desenvolvimento dos elementos projetados.

As abordagens emergentes de processos de projeto baseados em computação diferem significativamente das anteriores, pois fundamentam a representação do processo de projeto em sua lógica computacional em detrimento de seus aspectos geométricos (Caetano; Leitão, 2020). Isto possibilita que os projetos arquitetônicos tirem vantagens destes métodos,

empregando o desempenho para guiar a definição da forma final. Este contexto permitiu que a forma fosse encontrada através das relações entre o material, sua estrutura e o desempenho verificado (*form-finding*). Esta abordagem projetiva fazia uma oposição às metodologias clássicas, nas quais a forma, idealizada pelo arquiteto através de processos aditivos, era representada por desenho (*form-making*).

A concepção da geometria de um elemento a partir de processos *form-finding* apresenta um viés, originalmente, estrutural, ou seja, voltada ao modo como o elemento é construído ou está disposto. Contudo, ao inserir outros critérios além dos estruturais, tornou-se possível outras abordagens que expandiram a noção destes processos.

A interação entre a geometria e o desempenho em processos de projeto computacionais sintetiza o eixo norteador desta pesquisa, para a qual importa explorar a concepção da forma centrada no material e no comportamento estrutural do elemento. Este desempenho é aqui abordado a partir da relação entre a geometria, a massa e o desempenho estrutural do dispositivo de controle solar. Esta abordagem permite uma avaliação do dispositivo de sombreamento que vai além de uma análise do elemento de controle solar como simples superfície.

Deste modo, para este trabalho é proposta a incorporação de tecnologias digitais como meio para o desenvolvimento e avaliação dos projetos e de seus condicionantes de desempenho que tratam especificamente da iluminação natural e de elementos de controle solar. Para tanto, emprega-se modelagem algorítmica para o desenvolvimento de um fluxo de trabalho baseado em processo de projeto paramétrico.

Em processos de projeto computacionais, a modelagem algorítmica é possível através de interfaces de códigos de programação que permitem uma sequência de ações e relações lógicas explícitas. Esta abordagem insere uma modificação nos processos tradicionais, uma vez que possibilita que as partes do projeto se relacionem e se modifiquem de forma conjunta, além de garantir maior domínio sobre a geometria.

Esta vertente de modelagem, combinada às ferramentas de simulações computacionais e métodos de otimização, vem tornando possível criar soluções arquitetônicas que correspondam a um melhor desempenho do edifício em determinados quesitos. Isto permite uma ampla exploração no processo de projeto, que vai além da capacidade generativa de uma geometria.

Segundo Frazer (1995), o termo paramétrico tem origem na matemática e se refere ao uso de certos parâmetros ou variáveis, que podem ser modificados para alterar os resultados da equação. O princípio do projeto paramétrico da forma pode ser, então, definido como projeto matemático, em que as relações entre os elementos de projeto são mostradas como parâmetros que podem ser reformulados para gerar geometrias complexas, baseadas em métodos algorítmicos que, ao serem alterados, dão origem a novas formas (Eltaweel; Su, 2017). Nesse processo, o foco são as regras que geram o modelo e a construção lógica das relações entre parâmetros. A arquitetura não é projetada, portanto, pensando no resultado, mas possibilitada pelas regras, parâmetros e condições do sistema. O projeto é resultado desta relação.

Se, por um lado o princípio do projeto paramétrico da forma se beneficia da matemática, por outro, os princípios do processo baseado em desempenho têm sua origem a partir do repertório da física, que tornou possível o estudo e análise dos efeitos da força sobre a concepção da forma (Kaczynski; McGee; Pigram, 2011).

No contexto da iluminação, as edificações deveriam ser projetadas para o desempenho, tanto pela melhoria das condições de conforto ambiental, quanto pela redução dos impactos relacionados ao uso excessivo de sistemas artificiais de iluminação e climatização.

A função básica da iluminação é prover as condições visuais adequadas ao desempenho das atividades. Neste sentido, a importância do uso adequado da luz natural nas edificações requer o planejamento entre o balanço da carga térmica, o controle do ofuscamento e ajustes para se adequar à disponibilidade de luz natural nos diversos horários e épocas do ano. Nos estudos de iluminação natural, destacam-se tanto abordagens qualitativas – recorrentemente baseada na percepção do usuário, quanto abordagens quantitativas – que têm por referência critérios e índices já estabelecidos.

Como abordagem quantitativa, processos de projeto computacionais são empregados na concepção e avaliação de desempenho do edifício, possibilitando uma ampla exploração de soluções arquitetônicas. Desse modo, as simulações de iluminação natural possibilitam prever a disponibilidade de luz natural, além de viabilizarem a interpretação dos resultados, convertendo-os em métricas de desempenho significativas (Reinhart, 2019).

Partindo desta explanação, esta pesquisa foi desenvolvida com a finalidade de responder ao questionamento de **como propor um fluxo de trabalho para concepção e avaliação do desempenho de elementos de controle solar com geometrias obtidas a partir**

de processos *form-finding* que considera o desempenho estrutural do elemento nas simulações luminosas?

Assim, este trabalho investiga a hipótese de que **a integração do material, do desempenho estrutural do elemento e de sua forma durante a proposição de elementos de controle solar gerados a partir de processos *form-finding* otimiza o desempenho da luz do dia**. Pretende-se comprová-la a partir da análise comparativa entre um modelo de dispositivo de sombreamento, concebido parametricamente a partir de um dispositivo do tipo *brise* instalado em edificações da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa – MG e aqueles obtidos a partir da otimização deste elemento.

De modo geral, esta pesquisa tem o objetivo de propor um fluxo de trabalho baseado em processos *form-finding*, a partir de um código para obtenção e otimização de elementos de controle solar com geometrias desenvolvidas por meio de simulações que adicionam o desempenho estrutural da peça.

Para tanto, são apontados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar as principais abordagens do conceito *form-finding* e os efeitos de sua aplicabilidade em processos de investigação de desempenho de elementos de controle solar;
- Investigar a concepção de dispositivos de sombreamento externos fixos e as metodologias de processo de projeto aliadas à modelagem, à simulação, à otimização da geometria e a validação dos estudos;
- Propor e aplicar um método de trabalho que analisa o comportamento de elementos de proteção solar já instalados, para modelos computacionais validados por medições em contexto real; e
- Avaliar os efeitos da inclusão de critérios de desempenho estrutural na concepção e na avaliação de elementos de controle solar.

1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Como apontado por Caetano e Leitão (2020), o crescimento da teoria arquitetônica está intimamente ligado a questões sociais e tecnológicas. Estas têm evoluído constantemente e, ao mesmo tempo, influenciado o campo do processo de projeto. Os anos 2000 trouxeram,

assim, novas preocupações sociais e ambientais, motivando a necessidade de análise e otimização de desempenho.

Neste contexto, a difusão das tecnologias digitais incorporou ao repertório arquitetônico a possibilidade de ampliação das soluções geométricas, o que permite conceber e avaliar a forma proposta em detrimento da utilização de elementos construtivos com padrões pré-definidos. Nesse contexto, os processos de projeto computacionais possibilitam métodos de trabalho orientados ao desempenho, tornando possível a criação e avaliação de soluções arquitetônicas que correspondam a uma melhor eficiência do edifício.

Inicialmente observa-se um efeito positivo da admissão da luz natural no desempenho energético das edificações, à medida que o emprego desta estratégia possibilita redução direta do uso de iluminação artificial e do consequente consumo de energia elétrica e emissão de gás carbono. Contudo, não se trata de uma estratégia com relação direta, na qual se tem o aumento do desempenho dos ambientes quanto maior for a iluminância no plano de trabalho; uma vez que a admissão excessiva da luz natural usualmente resulta em ganhos térmicos e luminosos indesejáveis.

Considerando uma avaliação integrada do comportamento ambiental de um edifício, é possível melhorar suas condições de iluminação natural por meio de estratégias adequadas, como inserção de elementos de proteção solar, que possibilitam uma maior uniformidade da luz, com a diminuição das altas iluminâncias que ocorrem próximo às aberturas e do controle do ofuscamento, além da possibilidade de controle térmico.

Especificamente quanto aos elementos de controle solar, estudos recentes têm trazido, majoritariamente, análises focadas na avaliação do desempenho luminoso baseadas na geometria e forma de instalação destes dispositivos. Nestas pesquisas, pôde-se verificar duas linhas mais recorrentes de trabalho: (1) análises que se pautam em processos de projeto mais convencionais de concepção da forma ou até mesmo em verificação da eficiência de dispositivos já instalados em contexto real (Leitzke *et al.*, 2017; Carvalho; Cabús, 2020) e (2) análises de elementos de controle cuja forma é concebida e otimizada a partir de processos de projeto paramétricos (Zani *et al.*, 2017; Cartana; Pereira; Mayer, 2018; Mariano; Pereira; Vaz, 2018; Venâncio, 2020; De Luca; Sepúlveda; Varjas, 2022).

Ainda que o modo de se conceber a forma do elemento de controle solar varie nos trabalhos apontados, o que esses estudos vêm apresentando em comum é a concepção e, por vezes, otimização da geometria do dispositivo baseada apenas em simulações computacionais

voltadas ao seu desempenho térmico e/ou luminoso, sem considerar a relação entre o desempenho estrutural da peça e a forma final obtida. Além disso, trata-se de análises realizadas apenas em ambiente de simulação computacional e, em alguns casos, a partir de medições em protótipos em escala reduzida, desse modo, não aplicadas em contexto real. Situação esta que não se limita aos trabalhos mencionados, mas que reflete a realidade de parcela significativa deste tipo de estudo.

O interesse por este tema surgiu a partir da demanda de usuários de edifícios da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa – MG por intervenções nestes prédios que pudessem garantir melhores condições luminosas e térmicas em seus ambientes de trabalho. O que se pôde averiguar no atendimento destas solicitações é a recorrente utilização de elementos de controle solar disponíveis no mercado - com características formais segundo modelos padronizados. Nestes casos, a escolha do dispositivo acontece em um processo linear de produção arquitetônica não embasada por avaliações do desempenho obtido para estes elementos nos contextos de instalação propostos. Este método de trabalho, na maioria das vezes, é justificado pelo custo e tempo dispendido para concepção, simulação e otimização do desempenho de elementos de controle solar individualizados e, possivelmente, mais adequados a cada edificação.

Neste contexto, a originalidade científica desta pesquisa é o delineamento e aplicação de um fluxo de trabalho para concepção de elementos de controle solar que incorpore critérios qualitativos e quantitativos de desempenho estrutural da peça às simulações de desempenho luminoso destes dispositivos. Além disso, este trabalho avalia elementos de controle solar em clima tropical de baixa latitude, para ambientes naturalmente ventilados.

1.2. RESUMO DAS ABORDAGENS METODOLÓGICAS

Esta seção apresenta abordagens gerais e particularidades da pesquisa por meio de dois aspectos principais que são discutidos a seguir: definição e caracterização dos experimentos; e processos *form-finding* na concepção e avaliação de desempenho de elementos de controle solar.

1.2.1. Definição e caracterização das etapas experimentais

Esta tese apresenta duas revisões integrativas de literatura e dois experimentos destinados à avaliação do desempenho da luz do dia em ambientes com dispositivos de

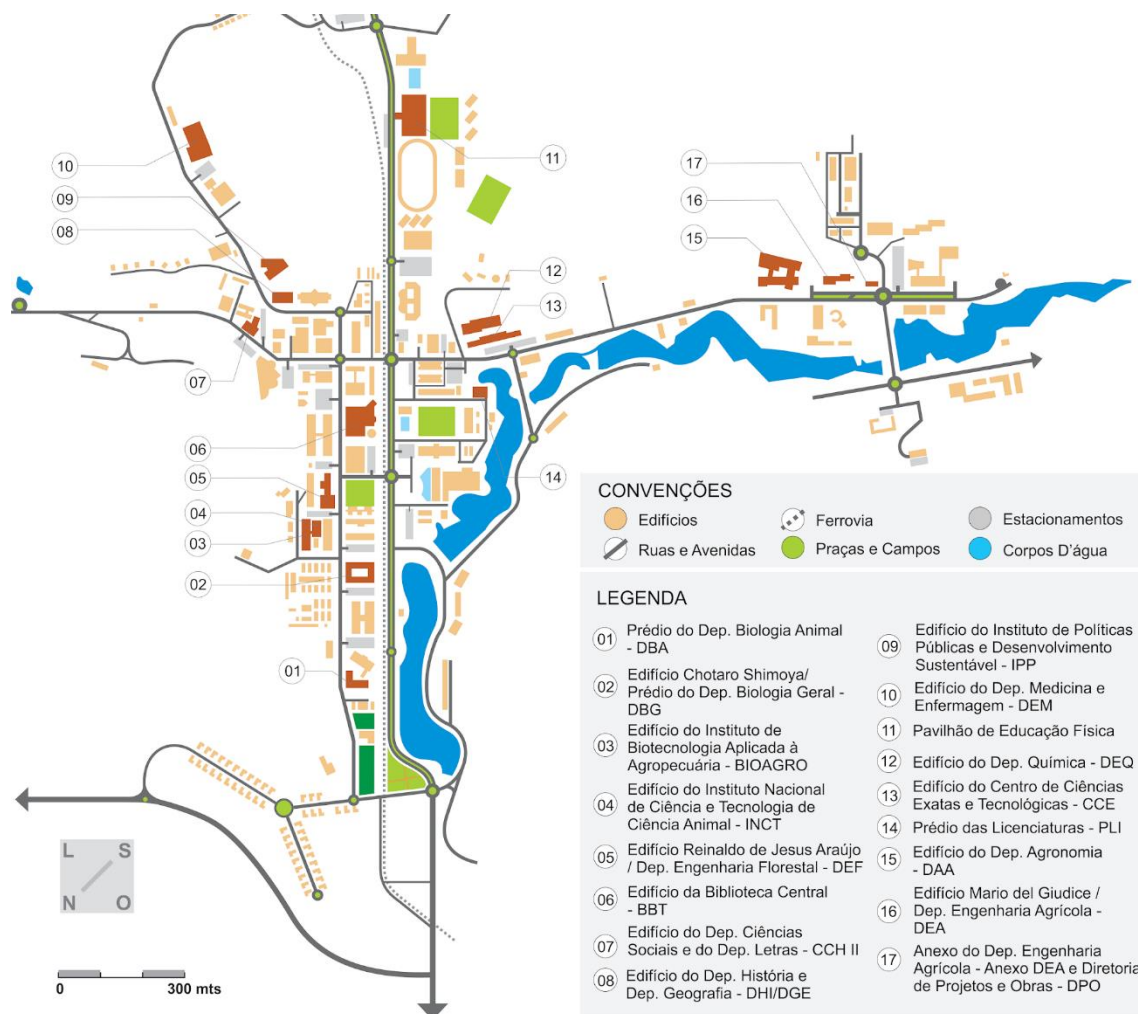
sombreamento. As revisões de literatura exibem o embasamento teórico acerca das práticas de processos de projeto computacionais. A primeira tem o objetivo de investigar as aplicações dos processos *form-finding* em estudos de desempenho de edifícios naturalmente iluminados; por sua vez, a segunda mapeia os processos de projeto para concepção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento para controle da iluminação natural em ambientes internos.

Nas seções experimentais, o primeiro trabalho aborda elementos de controle solar que caracterizam o cenário arquitetônico verificado em edificações da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais, apresentados como Modelos de referência. Para o segundo, juntamente com o desempenho luminoso, é investigado o desempenho estrutural dos dispositivos de sombreamento propostos.

A partir da coleta de dados, obtida em levantamento de campo e pesquisa documental no acervo da Diretoria de Projetos e Obras (DPO), em dezembro de 2020 e julho de 2022, foram identificados 16 modelos de elementos de controle solar instalados. Destes, três apresentam dois padrões de instalação, totalizando 41 dispositivos, identificados na Figura 1. Estes modelos foram classificados conforme sistematização proposta por Al-Masrani *et al.* (2018). Todos os elementos identificados se enquadram em sistemas de sombreamento solar do tipo Passivo - com sistemas ajustados manualmente (sete edificações) ou sistemas fixos (dez edificações), projetados a partir de processos de projeto convencionais. Os padrões identificados seguem representados no Apêndice A.

As informações apresentadas no Quadro 1 sintetizam esses padrões de dispositivos de sombreamento. Considerando os valores totais, há um predomínio de elementos de controle solar instalados em fachadas orientadas a noroeste (NO), com nove ocorrências, a sudoeste (SO), com oito ocorrências e a nordeste (NE), com sete ocorrências. Esta incidência foi considerada para a seleção dos ambientes de análise.

Figura 1 - Universidade Federal de Viçosa: Mapa esquemático com identificação dos edifícios com elementos de controle solar



Fonte: Elaborado a partir de mapa do acervo da Diretoria de Projetos e Obras (DPO), 2022.

Quadro 1 - Sistematização da ocorrência e orientação solar predominante dos modelos de elementos de controle solar instalados na Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais

Recurso do sistema	Edificações	Número de edificações	Ocorrência dos modelos	Orientação solar predominante
Sistema ajustado manualmente	7 (CCB; BBT; PLI; CCH II; DHI/DHG; IPP; DEA)	8 modelos / 10 padrões	17	NO (5 ocorrências) 29,4% do total dos sistemas manuais
Sistema fixo	10 (Biologia II; DEM; BIOAGRO; CCE; INCT; DEF; Pavilhão de Educação Física; DEQ; DFT; Anexo DEA)	8 modelos / 9 padrões	24	NE (5 ocorrências) 20,8% do total dos sistemas fixos
Valores totais	17 edificações	16 modelos / 19 padrões de instalação	41	NO (9) – 22,0% do total SO (8) – 19,5% do total NE (7) – 17,1% do total

Fonte: a autora.

Para a definição dos elementos de controle solar identificados como Modelos de referência foi eleita uma amostra representativa da tecnologia construtiva mais recorrente – *brise-soleil* (elemento laminar - aletas) e daquela que vem sendo empregada atualmente – painel metálico microperfurado. No primeiro caso, foram selecionados dispositivos instalados a sudoeste (SO) e norte (N) e, para a segunda avaliação, elementos de sombreamento instalados nas orientações noroeste (NO), norte (N) e leste (L). Para cada um dos modelos foram selecionadas três salas e a caracterização dos seis ambientes de análise é apresentada no Apêndice B.

Primeira etapa experimental

O primeiro experimento diz respeito à análise dos dispositivos da UFV e compreendeu a realização de medições *in loco* para validação do modelo computacional, modelagem dos ambientes e dos elementos de controle solar e simulações computacionais.

Para a validação, foram realizadas coletas *in loco* relativas à admissão da radiação solar e admissão e distribuição da luz do dia, para cada uma das salas selecionadas. As condições estabelecidas para instrumentação dos ensaios (quantidade e posicionamento dos sensores) foram determinadas pelo número de equipamentos disponível. Assim, para quantificar a admissão da radiação solar, adotou-se dois pontos de localização dos sensores, sendo um ponto interno e outro externo. Em relação à admissão e distribuição da luz natural, adotou-se cinco pontos de localização dos sensores, sendo quatro pontos internos e um ponto externo. Os sensores externos foram posicionados próximos ao dispositivo de sombreamento; à exceção daqueles instalados no Departamento de Ciências Sociais, onde foi necessário a realização destas medições na cobertura devido à impossibilidade de sua instalação nas fachadas.

A coleta de dados foi realizada durante o período de novembro/2022 a fevereiro/2023, para o período do verão e necessitou ser realizada ao longo de alguns meses em virtude do período chuvoso atípico vivenciado. As medições foram repetidas no mês de junho/2023, para caracterização das condições de iluminação e irradiação típicas de inverno. Para determinação dos valores representativos das medições instrumentais foi empregada a média dos índices obtidos em três dias de medição, para cada ambiente. A avaliação da correspondência entre os dados medidos e simulados, foi avaliada por meio do erro de viés médio relativo (*Relative mean bias error* – MB_{Erel}) e do erro quadrático médio relativo (*Relative root mean square error* – RMSE). Os indicadores medidos e os equipamentos utilizados estão discriminados no Quadro 2.

Quadro 2 - Critérios de desempenho medidos e equipamentos utilizados nas medições

Critérios externos	Equipamentos utilizados
Irradiação solar (W/m^2)	Solarímetro portátil, KIMO INSTRUMENTS, Solarimeter SL 200, com intervalo de medição de radiação de 1 W/m^2 a 1300 W/m^2 (95% de precisão).
Iluminância (lx)	HOBO <i>onset</i> . Pendant temp/light UA-002-64, <i>data logger</i> , com intervalo de medição de intensidade luminosa de 0 a 320000 lx
Critérios internos	Equipamentos utilizados
Irradiação solar (W/m^2)	Piranômetro portátil, OMNI INSTRUMENTS, Pyranometer CMP 3, com intervalo de medição de radiação de 0 a 2000 W/m^2
Iluminância (lx)	HOBO/ONSET U12 Temp/RH/Light External, modelo U12-012 <i>data loggers</i> , com intervalo de medição de intensidade luminosa de 1 a 3000 lx, com valores máximos entre 1500 a 4500 lx.

Fonte: a autora.

Os ambientes foram modelados e simulados utilizando a suíte de modelagem parametricamente acoplada Rhinoceros + Grasshopper, com o emprego dos *plug-ins* de análise ambiental Ladybug e Honeybee. Nesta avaliação foram empregados métodos de cálculo baseados em modelagem de luz natural dinâmica, utilizando-se a base de dados climáticos horários de Viçosa, Minas Gerais, referente ao período de 2017-2021, desenvolvido no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Latecae, do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV.

A investigação foi realizada por meio do modelo base (sem obstrução) e do modelo de referência (modelo existente), para condições climáticas de verão e inverno. Para as simulações computacionais, foram consideradas as dimensões reais dos ambientes e dos elementos de controle solar. Para caracterizar os espaços e dispositivos avaliados, as propriedades ópticas dos materiais de revestimento foram obtidas conforme metodologia apresentada no Apêndice C.

Tendo em vista que os elementos identificados se enquadram tanto em sistemas ajustados manualmente (móveis), quanto em sistemas fixos, todos os elementos foram avaliados em posição fixa. Adotou-se o ângulo de 45° para aqueles originalmente móveis, tendo por referência o eixo da estrutura de sustentação do dispositivo de sombreamento. Os resultados obtidos podem ser visualizados no Apêndice D.

Segunda etapa experimental

O segundo experimento investigou um fluxo de trabalho, baseado em processo *form-finding*, que empregou um código para obtenção e otimização do elemento de proteção, cuja geometria foi desenvolvida a partir de simulações que adicionaram o desempenho

estrutural da peça ao processo de análise do desempenho luminoso do dispositivo de sombreamento. Para tanto, foram propostos e simulados, para as condições climáticas de verão e inverno, dispositivos para o Ambiente de análise DEM-403, do Departamento de Medicina e Enfermagem, com fachada orientada a norte. O método aplicado nesta etapa integrou concepção e modelagem paramétrica do elemento de controle solar e avaliação do desempenho estrutural do elemento. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice E.

A concepção da forma de referência se baseou em um dispositivo de sombreamento do tipo *brise-soleil*, com aleta opaca. No processo de proposição e análise do dispositivo de sombreamento, a aleta foi abordada como uma casca, concebida como uma curva de forma livre a partir de uma NURBS (*Non-uniform rational basis spline*). A geometria inicial do modelo de referência reproduziu as condições de contorno de *brises* já instalados em outras edificações da UFV.

A partir deste elemento, foram seguidas duas linhas de trabalho para proposição de novas peças. Inicialmente, a aleta foi perfurada, integrando as duas tipologias de elementos de controle solar mais recorrentes nesta Universidade. Pretendia-se fundir estes padrões considerando o modelo de curva do *brise* e a taxa de perfuração do painel microperfurado (16%); contudo, os recursos computacionais disponíveis não foram suficientes para a realização do trabalho nestas condições. Adotou-se, então, uma taxa de perfuração de 1% que, embora inferior ao valor alvo inicial, pôde exemplificar os efeitos deste padrão de geometria no desempenho luminoso do dispositivo de sombreamento.

Na segunda linha de trabalho, foram analisadas formas otimizadas para a aleta opaca. O desempenho estrutural da peça foi avaliado a partir da forma assumida pelo dispositivo de sombreamento e de sua espessura, por meio da otimização estrutural da forma, na qual a geometria é definida em um domínio variável de projeto (Bendsøe; Sigmund, 2003). Para sua otimização, utilizou-se o *plugin* de análise de elementos finitos Karamba3D. A proposta da análise do desempenho estrutural da peça teve por foco a integração entre estrutura e forma; deste modo, não foi realizada uma análise de desempenho completa no sistema de sombreamento, que incluía sua estrutura de sustentação e conexões.

O método proposto para essa etapa experimental, bem como para o anterior e os indicadores empregados seguem sintetizados nos Quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Síntese das etapas experimentais propostos

	Modelos de referência	Modelos projetados
Modelo computacional	Dois tipos de dispositivos de sombreamento (<i>brise-soleil</i>) e painel microperfurado, instalados em três salas cada. Total de seis ambientes avaliados.	Dispositivo de sombreamento do tipo <i>brise-soleil</i> opaco e elementos otimizados propostos para o Ambiente de análise DEM-403.
Simulação	Desempenho luminoso.	Desempenho estrutural da peça e desempenho luminoso.
Calibração do modelo computacional	Dados medidos de iluminância e irradiação.	-
Otimização	-	Otimização estrutural da forma - geometria do dispositivo.
Resultados esperados	Quantificação do desempenho verificado em medições em contexto real e por meio da análise do dispositivo de sombreamento como simples superfície.	Quantificação dos efeitos da inclusão de critérios de desempenho estrutural da peça na avaliação do desempenho luminoso de dispositivos de sombreamento. Comprovação da hipótese da pesquisa.

Fonte: a autora.

Quadro 4 - Métricas de desempenho empregadas

Aspecto	Foco	Indicadores
Desempenho luminoso	Quantidade e distribuição da luz natural	sDA _{300/50%} Preferencial: sDA _{300/50%} deve atender, no mínimo, 75% da área do ambiente Aceitável: sDA _{300/50%} deve atender, no mínimo, 55% da área do ambiente UDI _{100-2000lx}
	Ofuscamento	Não percebido: DGP ≤ 0,34; Percebido, mas na maioria das vezes não perturba: 0,34 < DGP ≤ 0,38; Percebido e, muitas vezes, perturba: 0,38 < DGP ≤ 0,45; Percebido e, na maioria das vezes, é intolerável: DGP > 0,45 (ABNT, 2024)
	Quantidade da radiação egressa a partir do dispositivo de sombreamento	ASE _{1000lx/250h}
	Vista externa (apenas no primeiro experimento)	Acesso à vista: Mínimo: ângulo de visão horizontal ≥ 14°, distância externa da vista ≥ 6,0m e, no mínimo, a camada de paisagem é vista em pelo menos 75% da área utilizada; Médio: ângulo de visão horizontal ≥ 28°, distância externa da vista ≥ 20,0m e a camada de paisagem mais outra camada é vista em pelo menos 75% da área utilizada; e Máximo: ângulo de visão horizontal ≥ 54°, distância externa da vista ≥ 50,0m e inclui todas as camadas na mesma abertura de visualização, em pelo menos 75% da área utilizada. CEN (2018); ABNT (2023b; 2024).
Desempenho estrutural da peça	Otimização da forma (apenas no segundo experimento)	Grau da NURBS Largura da aleta (mm) Amplitude de curvatura da aleta (mm) Espessura (mm)

Legenda: ASE - Exposição anual à luz solar; DGP - Probabilidade de ofuscamento pela luz do dia; sDA - Autonomia da luz do dia espacial e UDI - Iluminância útil da luz do dia.

Fonte: a autora.

1.2.2. Processos *form-finding* na concepção e avaliação de desempenho de elementos de controle solar

Para esta pesquisa, o processo *form-finding* é abordado como a investigação do projeto arquitetônico com vistas ao atendimento de critérios predeterminados de desempenho da edificação, por meio de otimização computacional e com a finalidade de gerar informações suficientes para subsidiar as tomadas de decisão (Ekici *et al.*, 2019). Neste sentido, as técnicas de *form-finding* são aqui entendidas como estratégias baseadas em regras e princípios físicos que permitem a transformação do objeto por meio da relação entre sua forma, material e estrutura. Essas regras são algoritmos formados por uma entrada, um processo de variáveis controladas e uma saída ou resultados.

Buscou-se sintetizar este processo através de um fluxo de trabalho que empregou técnicas de otimização estrutural da forma, utilizando o método dos elementos finitos. Para tanto, integrou-se a modelagem geométrica, a análise do desempenho estrutural do elemento e a otimização da forma em um processo de projeto computacional. Esta análise foi sucedida pela simulação do desempenho luminoso do dispositivo de sombreamento, considerando os indicadores Autonomia da luz do dia espacial (sDA), Iluminância útil da luz do dia (UDI), Exposição anual à luz solar (ASE) e Probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP).

1.3. ESTRUTURA DA TESE

Esta pesquisa está estruturada em seis capítulos, sendo que os capítulos dois a cinco estão escritos na forma de artigo. O primeiro capítulo, já apresentado, é composto de texto com dados introdutórios da pesquisa e o último é dedicado às conclusões finais.

O capítulo dois aborda a aplicação dos processos *form-finding* nos processos de projeto computacionais, com foco na concepção do edifício e de suas partes constituintes. Esta revisão bibliográfica subsidia o desenvolvimento desta pesquisa, para investigação dos critérios de desempenho estrutural da peça e otimização que foram empregados na busca da forma (*form-finding*) aplicada a elementos de controle solar.

O capítulo três apresenta uma revisão que trata da concepção e avaliação de desempenho de elementos de controle solar em processos de projeto computacionais. Com foco na iluminação natural e em métodos de avaliação dinâmica dos dispositivos de sombreamento, neste capítulo estão compiladas as principais métricas de desempenho luminoso, térmico, de ventilação natural e energéticas identificadas.

O capítulo quatro aborda a análise dos Modelos de referência que representam os elementos de controle solar instalados em edificações da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Campus Viçosa. Nele são realizadas a caracterização, modelagem algorítmico-paramétrica e avaliação do desempenho luminoso dos dispositivos – para condições climáticas típicas de verão e de inverno, a partir de modelo computacional e medições em contexto real. Esta análise tem por objetivo criar subsídios para a comparação do desempenho verificado em análises luminosas que avaliam o elemento de controle solar como superfície e o desempenho obtido a partir de análises que integram o material, sua estrutura e sua forma.

O capítulo cinco expande a análise de desempenho apresentada no capítulo anterior, incorporando avaliação de desempenho estrutural da peça a partir de otimização estrutural da forma direcionada, exclusivamente, às aletas. Aqui é apresentada a proposta e avaliação de um elemento de controle solar projetado a partir do código desenvolvido e seu desempenho simulado computacionalmente. Neste capítulo são investigados os efeitos da integração do material, do desempenho estrutural do elemento e de sua forma no desempenho luminoso de dispositivos de proteção solar.

O capítulo seis exhibe as conclusões dos capítulos anteriores, com discussão sobre os desempenhos obtidos em cada etapa experimental. Trata, ainda, das contribuições da pesquisa, limitações do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AL-MASRANI, S. M. *et al.* Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, [s. l.], v. 170, p. 849–872, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**. Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023a.

_____. **ABNT NBR 15215-4**. Iluminação natural. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2023b.

_____. **ABNT NBR 15215-3**. Iluminação natural. Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods and applications**. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2003.

CAETANO, I.; LEITÃO, A. Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. **Architectural Science Review**, [s. l.], 63:2,

p. 164-174, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1680524>. Acesso em 20 out. 2024.

CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: defining parametric, generative and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], 9, p. 287-300, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>. Acesso em 20 out. 2024.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 67–82, 2018. Acesso em: 29 jan. 2023.

CARVALHO, M. L. S.; CABÚS, R. C. Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 191–209, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000200395>. Acesso em 30 jan. 2022.

CEN. EN 17037:2018 - Daylight of Buildings. **Comité Européen de Normalisation**, [s. l.], p. 1–62, 2018.

DE LUCA, F.; SEPÚLVEDA, A.; VARJAS, T. Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. **Building and Environment**, [s. l.], v. 217, n. April, p. 1-17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109110>. Acesso em 30 jan. 2022.

EKICI, B. *et al.* Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. **Building and Environment**, [s. l.], v. 147, n. October 2018, p. 356–371, 2019. Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.023>. Acesso em 30 jan. 2022.

ELTAWHEEL, A.; SU, Y. Parametric design and daylighting: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 73, p. 1086–1103, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>. Acesso em 30 jan. 2022.

FRAZER, J. Parametric computation: history and future. **Archit Des**, [s. l.], v. 86, p. 18-23, 1995.

HAYS, M. (Ed.). **Architecture Theory since 1968**. Cambridge: MIT Press, 2000.

KACZYNSKI, M. P.; MCGEE, W.; PIGRAM, D. Robotically fabricated thin-shell vaulting. A method for the integration of multi-axis fabrication processes with algorithmic form-finding techniques. In: Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), 31., 2011, Banff. **Proceedings...** Banff: Editora, 2011, p. 114-121.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the digital age**. Design and manufacturing. London and New York: Spon Press, 2. ed., 2009.

LEITZKE, R. K. *et al.* Avaliação de dispositivos de proteção solar fixos e automatizados para edifício residencial. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 59-72, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v8i1.8649657>. Acesso em 30 jan. 2022.

MARIANO, P. O. P.; PEREIRA, A. T. C.; VAZ, C. V. Avaliação luminosa de elementos de fachada com características fractais. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s. l.], v.

9, n. 1, p. 3–18, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i1.8650255>. Acesso em 30 jan. 2022.

NESBITT, K. Introdução. *In: Uma nova agenda para a arquitetura*. Antologia teórica 1965-1995. São Paulo: Cosac Naify, 2006. p. 15-87.

OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, v. 27, n. 3, p. 229-265, maio 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.002>. Acesso em 30 jan. 2022.

OXMAN, R.; OXMAN, R. **Theories of the digital in Architecture**. New York: Routledge, 2014.

PAPAMICHAEL, K.; PROTZEN, J. P. The limits of intelligence in design. *In: COMPUTER-ASSISTED BUILDING DESIGN SYSTEMS: THE FOURTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SYSTEM RESEARCH, INFORMATICS AND CYBERNETICS*, 40., 1993, Baden-Baden. **Proceedings** [...]. Baden-Baden: International Symposium on System Research, Informatics and Cybernetics, 1993, p. 1–10.

REINHART, C. Daylight performance predictions. *In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (org.) Building performance simulation for design and operation*. New York: Taylor & Francis Group, 2019, cap. 7, p. 221–269.

SYKES, A. K. (Org). **O campo ampliado da arquitetura**. Antologia teórica 1993-2009. São Paulo: Cosac Naify, 2013, p. 13-24.

TSCHUMI, B. Arquitetura e limites II. *In: NESBITT, K. (Org.). Uma nova agenda para arquitetura*. Antologia teórica 1965-1995. São Paulo: Cosac Naify, 2006.p.173-177.

VENÂNCIO, R. Sombreamento com iluminação: desenvolvimento e teste de modelo paramétrico para facilitar o projeto de proteções solares. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 59–77, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400460>. Acesso em 30 jan. 2022.

VIDLER, A. Architecture's expanded Field. **Artforum**, New York, abr. 2004, p. 242-251.

ZANI, A. *et al.* Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 180, p. 1473–1483, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.310>. Acesso em 30 jan. 2022.

2. PROCESSOS *FORM-FINDING* NAS ANÁLISES DE DESEMPENHO DO EDIFÍCIO – UMA REVISÃO

Resumo: Processos *form-finding* abordam a exploração geométrica de soluções para determinar uma forma construtiva ótima, tendo por referência seu desempenho. O objetivo deste trabalho é investigar as aplicações destes métodos dentro dos processos de projetos auxiliados por ferramentas computacionais, com foco em estudos de simulações de desempenho de edifícios naturalmente iluminados. Em particular, esta revisão lida com a proposição da geometria da edificação, de suas envoltórias, bem como a concepção de elementos de controle solar. Neste trabalho foi realizada uma revisão integrativa de literatura, a partir da qual foi possível entender os limites e aplicações de métodos *form-finding* nos processos de modelagem e simulação. A metodologia aplicada se baseia em fluxo que considera as etapas de protocolo, pré-seleção, seleção, exclusão e resultados, conduzido pela combinação entre palavras-chave “alvo”, “escala de estudo” e “critérios de trabalho”. Como resultado, são apresentados conceitos e aplicabilidade dos processos *form-finding*, cinco categorias de trabalhos, configurações e metodologias de estudos que relacionam distintas perspectivas sobre o tema. Esta contribuição sintetiza uma nova relação da geometria com o material e a estrutura, que pôde ser verificada na associação de diferentes análises de desempenho do edifício. Neste sentido, estabelece uma base inicial para trabalhos futuros sobre o tema.

Palavras-chave: Processos *form-finding*. Iluminação natural. Desempenho estrutural. Desempenho luminoso. Desempenho térmico. Processo de projeto computacional.

2.1. INTRODUÇÃO

A complexidade das atividades da arquitetura tem se intensificado com o surgimento de novos meios de concepção possibilitados pelo crescente desenvolvimento de tecnologias digitais incorporadas ao processo de projeto. Neste cenário, as ferramentas computacionais ampliam sua atuação para além do representar a forma e passam, também, a participar de seu processo de criação. Esta dinâmica favorece novas abordagens para a definição de geometrias através de sua relação com o material e a estrutura, contrapondo-se aos processos de projeto clássicos, nos quais o conceito formal é inicialmente concebido (Oxman; Oxman, 2010).

Esta associação designou o afastamento do formalismo em direção a uma prática material, em que o projeto arquitetônico é motivado por conceitos estruturais e materiais a priori. Este contexto permitiu que a forma fosse, assim, encontrada através das relações entre o material, sua estrutura e o desempenho verificado, típicas dos processos *form-finding*. Esta abordagem projetiva faz oposição às metodologias anteriores, nas quais a forma, idealizada através de processos aditivos, era representada por desenho (*form-making*).

Como processo formalizado, é recorrente atribuir as origens dos métodos *form-finding* aos trabalhos experimentais com modelos de correntes suspensas de Antoni Gaudí, que abordaram a geração de geometrias funiculares e aos experimentos com bolhas de sabão de Frei

Otto, que propiciaram estudos de modelos de superfícies mínimas (Alic; Persson, 2016; Agirbas, 2019; Chèraud, 2020; Torreblanca-Díaz *et al.*, 2020).

Como métodos de pesquisa analógicos, estes modelos restringiam interações no processo de projeto. Contudo, a partir da introdução gradativa de ferramentas computacionais de modelagem e de simulação de desempenho, foi possível a ampliação desta investigação formal (Ramilo; Embi, 2014). Esta inserção possibilitou, ainda, a proposição de geometrias cada vez mais complexas, tanto pela integração do processo de concepção, quanto pelas possibilidades de representação do objeto projetado.

No campo da arquitetura, os processos *form-finding* vertem para a investigação do projeto arquitetônico com vistas ao atendimento de critérios predeterminados de desempenho da edificação, por meio de otimização computacional e com a finalidade de gerar informações suficientes para subsidiar as tomadas de decisão (Ekici *et al.*, 2019a). Para tanto, consistem em estratégias baseadas em regras e princípios físicos que permitem a transformação do objeto por meio da relação entre sua forma, material e estrutura. Essas regras são algoritmos formados por uma entrada, um processo de variáveis controladas e uma saída ou resultados.

A partir desta revisão foi possível observar que trabalhos anteriores se concentraram em abordagens pontuais. Hu *et al.* (2017) utilizaram folhas de etileno tetrafluoroetileno (ETFE) como material de construção, avaliada a partir de seu desempenho arquitetônico e comportamento estrutural. ETFE foi empregada, ainda, em pesquisa destinada à fabricação e aplicação de envelopes têxteis integrados a sistemas fotovoltaicos flexíveis (Li; Zanelli, 2021). A conceituação de uma forma de fachada adaptável foi abordada por Hosseini *et al.* (2019), para reconhecimento de disciplinas relevantes para a arquitetura cinética, conforto visual e térmico dos ocupantes, biomimética e microclima. A arquitetura computacional performativa foi foco de pesquisa que avaliou variações geométricas de edificações e métodos de otimização para análise de sustentabilidade, custo, funcionalidade e análise estrutural (Ekici *et al.*, 2019b). Du *et al.* (2020) avaliaram o desempenho e a otimização da configuração de ambientes, baseado no desempenho energético otimizado, a partir de métodos de representação e variáveis de processo de projeto.

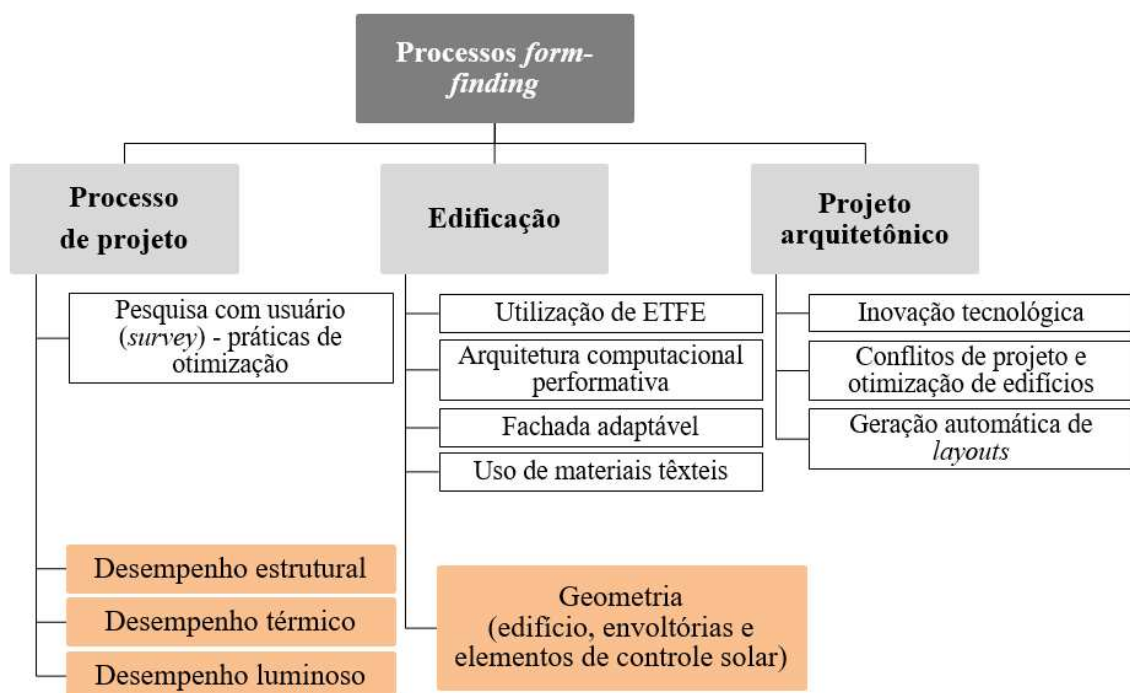
Embora não sejam o foco da revisão, processos *form-finding* foram abordados, ainda, como exemplo de estudos que o utilizaram na análise da forma do edifício e sistemas de sombreamento, no contexto da sustentabilidade (Li; Liu; Peng, 2020) e em investigação da adoção de tecnologias no processo de projeto (Ramilo; Embi, 2014; Wortmann; Cichocka;

Waibel, 2022). Wortmann, Cichocka e Waibel (2022) conduziram uma pesquisa na qual abordaram processos *form-finding* nas práticas reais de otimização de projeto arquitetônico e nas experiências dos usuários. Este trabalho não se enquadra como uma revisão de literatura e foi destinado a profissionais ativos que utilizam processos de otimização na indústria e na academia.

Com uma proposta mais ampla, o objetivo desta revisão integrativa de literatura é investigar as aplicações dos processos *form-finding* dentro dos processos de projeto auxiliados por ferramentas computacionais, com foco em estudos de simulações de desempenho de edifícios naturalmente iluminados. Desta forma, concentramo-nos no atendimento das seguintes questões: Quais as principais abordagens do conceito *form-finding*, os limites deste conceito e sua aplicabilidade nos dias atuais? Quais são as metodologias de avaliação e indicadores de desempenho mais recentes? Quais são as novas perspectivas nas simulações de desempenho?

Neste sentido, este estudo aborda as sínteses destes processos para definição da geometria do edifício e de suas partes constituintes e apresenta a relação entre a concepção da forma do edifício e o desempenho estrutural, térmico e luminoso obtidos a partir de abordagens que empregam processos *form-finding*, como apontado na Figura 1.

Figura 1 - Abordagens das pesquisas anteriores e da revisão corrente

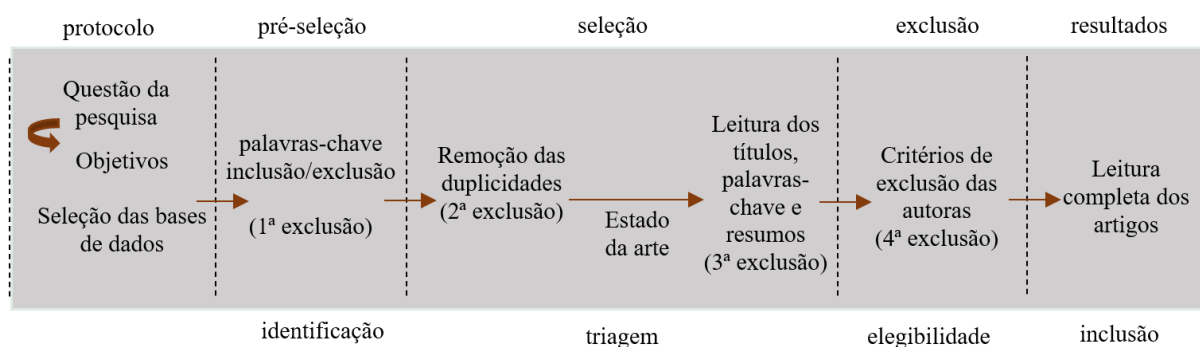


Fonte: a autora.

2.2. MÉTODO

Este trabalho é uma revisão integrativa de literatura, cujo fluxo, embasado na *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), segue representado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxo da revisão de literatura



Fonte: a autora.

A primeira etapa se orientou a partir da seguinte pergunta de pesquisa: qual a aplicabilidade de processos *form-finding* em simulações de desempenho térmico, luminoso e estrutural para proposição da geometria da edificação, de suas envoltórias e elementos de controle solar? Buscou também a identificação das potencialidades, limitações e abordagens metodológicas retratadas nestas análises. Foram adotadas as fontes bibliográficas *ScienceDirect*, biblioteca virtual Periódicos Capes, *Scopus* e *CumInCAD*, utilizando-se os termos de busca em inglês. Para Periódicos Capes, adicionou-se estes termos em português, mas não foram obtidos resultados. A pesquisa foi finalizada em janeiro de 2024, abrangendo o período de 2014 a 2023.

Na pré-seleção, as palavras-chave foram categorizadas em três grupos com base no alvo, nos critérios de trabalho e na escala de estudo (Quadro 1).

Quadro 1 - Lista das palavras-chave e condições de pesquisa

Categoria	Palavras-chave
Alvo	<i>Form-finding</i>
Critérios de trabalho	Iluminação natural, <i>daylighting</i> , processo de projeto computacional, <i>computational design</i>
Escala de estudo	Edifício, <i>building</i> , fachada, envoltória, <i>facade</i>
Termos da pesquisa: “Alvo” AND/E “Método” AND/E “Escala do estudo”	
Fontes bibliográficas: <i>Scopus</i> , <i>Science Direct</i> e Periódicos Capes	
Período da pesquisa: 2014 – 2023	

Fonte: a autora.

Para a busca inicial, utilizou-se o termo alvo “*form-finding*”, sem aplicação de filtros de pesquisa, obtendo-se 54.664 resultados, distribuídos por base de dados (Quadro 2). A seguir, considerou-se apenas artigos de periódicos, revisados por pares, para as seguintes áreas: *Scopus* e *ScienceDirect* – *Engineering* e *Energy* e Periódicos Capes – Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas e Multidisciplinar. Foi verificado um total de 5.456 trabalhos. Para a base *CumInCAD* foram elegidos todos os artigos obtidos na verificação inicial tendo em vista se tratar de uma área de conhecimento especializada e que retornou poucos resultados.

Ainda nesta etapa, os dois primeiros termos de pesquisa foram combinados para verificação do impacto de cada palavra-chave na busca. A partir dos resultados obtidos, definiu-se que apenas o termo “*building*” seria adotado, uma vez que os termos restritos a envoltória ou fachada restringiram significativamente os resultados da pesquisa. Posteriormente, a busca foi conduzida utilizando a estratégia “alvo AND/E critérios de trabalho AND/E escala do estudo”, contudo, houve uma redução expressiva dos trabalhos retornados. Neste contexto, optou-se pela seleção da amostra mais representativa, que considerou apenas os termos de busca “*form-finding*” AND “*building*”.

Na etapa de seleção, a identificação dos trabalhos duplicados se deu por triagem manual – no momento em que os artigos eram salvos e através do *software Mendeley Reference Manager*. Obteve-se 206 estudos que foram verificados com base em seus títulos e palavras-chave e depois reduzidos a partir de seus resumos. Desta análise resultaram 136 artigos que foram avaliados conforme critérios de exclusão relativos ao tipo de geometria avaliada e ao objetivo das análises. Por fim, 76 trabalhos foram lidos, dos quais 36 foram incluídos no conjunto amostral.

Quadro 2 - Parâmetros adotados para seleção dos artigos e resultados encontrados, por base de dados pesquisada

		<i>ScienceDirect</i>	<i>Scopus</i>	<i>Periódicos Capes</i>	<i>CumInCAD</i>
Pré-seleção (1ª exclusão)	Modo de busca	Título, resumo e palavra-chave			
	Termo de busca	“ <i>form-finding</i> ”			
	Resultados iniciais	52.081	1622	874	87
	Resultados filtrados por área de conhecimento	4.010	752	607	87
	“ <i>form-finding</i> ” AND “ <i>building</i> ”	378	105	119	Sem aplicação de filtro
	“ <i>form-finding</i> ” AND “ <i>façade</i> ”	30	17	13	
	“ <i>form-finding</i> ” AND “ <i>envelope</i> ”	37	10	7	
	“ <i>form-finding</i> ” AND “ <i>building</i> ” AND “ <i>daylighting</i> ”	18	4	3	
	“ <i>form-finding</i> ” AND “ <i>building</i> ” AND “ <i>computational design</i> ”	9	12	34	
	“ <i>form-finding</i> ” AND “ <i>building</i> ” AND “ <i>daylighting</i> ” AND “ <i>computational design</i> ”	2	2	1	
Seleção	Resultados elegidos	378	105	119	87
	Remoção das duplicidades (2ª exclusão)	Manual e <i>Software Mendeley Reference Manager</i>			
		206			
	Verificação de títulos, palavras-chave e resumos (3ª exclusão)	Manual			
Exclusão		136			
	Elegibilidade (4ª exclusão) –	Critérios: geometrias avaliadas sem relação com o edifício, análises que não incluem avaliações de desempenho térmico ou luminoso e trabalhos com foco na avaliação da geometria de sistemas estruturais			
Resultado		76			
	Leitura completa dos artigos	Critério de inclusão: trabalhos que abordam métodos de desempenho estrutural, térmico e luminoso aplicados ao edifício			
	Resultado final	36 – 5 artigos de revisão e 31 artigos de análise de componentes do edifício			

Fonte: a autora.

2.3. RESULTADOS

Nas subseções a seguir são apontados os conceitos, as metodologias, as ferramentas e parâmetros aplicados.

2.3.1. *Form-finding*: conceitos e aplicabilidade

Os processos *form-finding* se baseiam na exploração de soluções para determinar uma forma construtiva originada a partir da relação entre sua geometria e suas características materiais. Historicamente, a origem deste método envolve modelos físicos em escala, como os de Frei Otto e Antoni Gaudí (Pigram, 2011; Dourtnie *et al.*, 2012; Veenendaal; Block, 2012; Huang; Lewis, 2014; Yazici, 2014; Kaczynski; McGee; Naboni, 2016; Symeonidou, 2016; Rynska *et al.*, 2020; Van Ameijde *et al.*, 2022) e está diretamente relacionada ao desempenho

estrutural da geometria analisada. Neste contexto, os processos de projeto *form-finding* são aqueles por meio dos quais é determinada a geometria de estruturas de forma ativa e sistemas (Veenendaal; Block, 2012).

Adriaenssens *et al.* (2014b) apontam que *form-finding* é um método direto no qual os parâmetros são explicitamente controlados para se obter a melhor geometria de uma estrutura que está em equilíbrio estático com as cargas de projeto. A forma final não tem origem em um conceito abstrato, mas é o resultado do equilíbrio entre as forças externas e as propriedades inerentes do próprio material, para certas condições de contorno (Naboni, 2016; Symeonidou, 2016; Suzuki; Knippers, 2017; Sulpizio *et al.*, 2020).

Form-finding vinculado ao desempenho estrutural foi verificado a partir de conceitos como “*analytical form-finding*” (Koohestani, 2017; Zhang *et al.*, 2018), “*structural form-finding*” (Adriaenssens *et al.*, 2014a; Veenendaal; Block, 2012; Descamps, 2014) e “*numerical form-finding*” (Suzuki; Knippers, 2017; Yang *et al.*, 2018; Koohestani, 2020). Estas conceituações apontam a forma de equilíbrio estático para um sistema sob um conjunto específico de cargas como o principal objetivo do método.

Ampliando a utilização deste método para outros campos de pesquisa, Zboinska (2015), Dixit, Stefańska e Musiuk (2021), Zheng e Yuan (2021), Yan *et al.* (2022) e van Ameijde *et al.* (2022) trabalham o conceito de “*architectural form-finding*”, entendido como um processo de projeto baseado em movimento, em modelagem algorítmica de formas livres, com vistas ao desempenho e ao processo de projeto generativo por meio de otimização.

A noção de *form-finding* além do desempenho estrutural é objeto, ainda, do trabalho de Ekici *et al.* (2019b), no qual os autores definem o método como a investigação do projeto arquitetônico com vistas ao atendimento de critérios de desempenho da edificação predeterminados, por meio de otimização computacional e com a finalidade de gerar informações suficientes para subsidiar as tomadas de decisão.

Como processo empírico, Gengnagel *et al.* (2018) apontam que

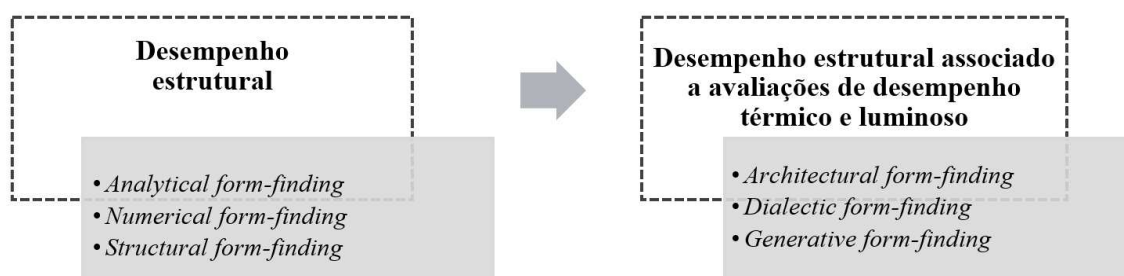
Form-finding no processo de projeto arquitetônico significa, em última análise, uma superposição de formas teóricas e empíricas de conhecimento que estão ligadas por indução e dedução. Na prática, significa uma busca por formas de sistemas estruturais híbridos que surgem por meio de uma interação entre experimentos físicos e digitais, descrições geométricas e matemáticas e também experiências ou considerações estéticas individuais (Gengnagel *et al.*, 2018, p. 94, tradução nossa).

Adriaenssens *et al.* (2014a) trabalham o conceito de “*dialectic form-finding*” como extensão do processo tradicional de busca de formas estruturais, integrando restrições de

sombreamento relacionadas à energia. Segundo os autores, esta abordagem permite a exploração do espaço de projeto enquanto a forma estrutural, conforto térmico e luz natural são alterados. Agkathidis (2016) apresenta o conceito de “*generative form-finding*” que, dentre muitas definições, pode ser entendido como método de processo de projeto em que a concepção da forma é possível a partir de regras ou algoritmos, frequentemente derivados de ferramentas computacionais. Essas regras são algoritmos formados por uma entrada, um processo de variáveis controladas e uma saída ou resultados.

Como apresentado, essa combinação de critérios foi descrita pelos autores com nomenclaturas variadas, sintetizadas na Figura 3.

Figura 3 - Nomenclaturas atribuídas a processos *form-finding* na literatura analisada



Fonte: a autora.

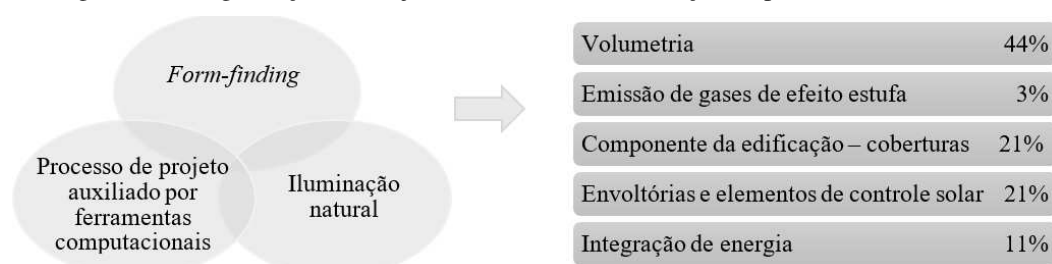
Ao inserir outros critérios além dos estruturais, essas últimas abordagens expandem a noção de *form-finding* em direção ao processo de projeto performativo, definido por Oxman (2008) como uma abordagem caracterizada pela aplicação de simulações digitais de forças externas para impulsionar a geração das formas. Nesse sentido, ao associar desempenho com concepção formal, o desempenho configura-se como mais um parâmetro em um desenvolvimento algorítmico da arquitetura, no qual a geração da forma implica no emprego de vários critérios (Anton; Tănase, 2016).

Neste contexto, verifica-se que a incorporação de indicadores estruturais se volta tanto para a definição da geometria, em uma fase inicial do processo, quanto para a otimização da forma já definida. No primeiro cenário, esta inserção tem por foco a avaliação do desempenho estrutural desta geometria. Nos casos de otimização, as métricas estruturais na condição de genoma ou parâmetros, unem-se aos indicadores luminosos, térmicos, entre outros, inseridos como objetivos.

2.3.2. Visão geral das abordagens

Com a finalidade de entender a aplicação de processos *form-finding* em análises de desempenho de edifícios naturalmente iluminados, foram identificados cinco conjuntos de abordagens, como apresentado na Figura 4. Estas categorias distribuem os achados literários a partir de uma visão macro da edificação, considerando seu contexto urbano e seu impacto ambiental, até um enfoque mais específico voltado para os componentes do edifício e sistemas integrados a eles.

Figura 4 – Categorização do conjunto amostral, com indicação do percentual de trabalhos



Fonte: a autora.

No primeiro, a busca da forma se direciona à volumetria da edificação, tanto para casos que consideram seu contexto urbano quanto para outros que trazem análises de configuração interna e a própria concepção da geometria do edifício. No segundo enfoque, a análise engloba pesquisas que avaliam emissão de gás carbono. Na sequência, são avaliadas as coberturas e, posteriormente, as envoltórias e os elementos de controle solar. Por fim, a última abordagem é direcionada para estudos que integram produção de energia ao elemento proposto.

Busca da forma aplicada à volumetria da edificação

As abordagens adotadas pelos autores trazem, de modo geral, concepção do edifício a partir de modelagem paramétrica. As simulações são aplicadas a edifícios com múltiplos pavimentos, com volumes de geometrias euclidianas e com baixa complexidade formal.

Estudos que incorporam o contexto da edificação se concentraram em métodos de análise do acesso solar em conjuntos urbanos, com interesse na melhoria da disponibilidade da luz e ventilação naturais e radiação alcançáveis por ajustes na geometria do edifício, na orientação solar e nas configurações das aberturas. A ênfase destes trabalhos mostra a importância da forma construtiva em relação ao seu entorno, na determinação das alturas máximas e na distribuição de massa.

Para ilustrar estas estratégias, os trabalhos de Konis, Gamas e Kensek (2016) e Javanroodi, Nik e Mahdavinejad (2019), por exemplo, propuseram novas estruturas de otimização de desempenho. De Luca (2017) explorou o uso de métodos de envelope solar e isossuperfície de coleta solar para investigar as potencialidades da geometria de edificações altas em áreas densas e ambientes urbanos fragmentados. Como continuidade desta proposta, De Luca, Dogan e Sepúlveda (2021) propuseram o método de envelope solar reverso que consistiu na eliminação de células de uma matriz tridimensional, por meio da discretização do volume. Ekici *et al.* (2019a) trabalharam a segmentação do volume da edificação em zonas, para avaliação dos requisitos de desempenho da luz natural em cada nível de piso. O estudo desenvolvido por Szentesi-Nejur, De Luca e Nejur (2021) avaliou a proposição da geometria relacionada à investigação de soluções de urbanização.

Diferente dos trabalhos anteriores, Khidmat, Fukuda e Kustiani (2022) avaliaram formas mais complexas, utilizando processos de projeto generativo para obtenção de formas estruturais responsivas. Nestas pesquisas, a estrutura enfatizou a geometria, a forma e os aspectos arquitetônicos do edifício ou do projeto urbano. Os principais resultados obtidos relacionaram o desempenho verificado ao volume da edificação e à sua quantidade de faces, que variou conforme as características climáticas locais e indicaram a correlação direta entre o aumento da demanda de energia e o adensamento urbano.

Outras pesquisas foram conduzidas para avaliação da geometria da edificação sem a inclusão de seu contexto nos modelos simulados. Estas abordagens podem estar associadas à otimização das configurações internas (Su; Yan, 2015) ou externas dos ambientes (Zhang *et al.*, 2023), à representação da geometria como uma extensão da análise de dados convencionais e métodos de visualização (Turrin *et al.*, 2016) ou uso de redes neurais complexas (He *et al.*, 2021) e à integração de processos de projeto e produção, que podem estar associados a customizações em massa como no trabalho de Bianconi, Filippucci e Buffi (2019). Melhores desempenhos foram verificados para edifícios com telhados com curvaturas expressivas. De modo geral, observou-se a redução do consumo de energia e dos custos de construção e melhoria na estabilidade estrutural.

Busca da forma aplicada a estudos que abordam emissão de gás carbono

Ainda na escala do edifício, o segundo enfoque se concentra em método que amplia a análise de desempenho, incorporando a variação das emissões de gases de efeito estufa aos diferentes parâmetros da edificação. Esta abordagem foi verificada em apenas um trabalho.

Lobaccaro *et al.* (2018) demonstraram a adequação de um projeto paramétrico para minimizar estes efeitos em um edifício de emissão zero (*Zero emissions building*), cuja estratégia foi maximizar a radiação solar global através da otimização da forma da edificação. Os componentes foram investigados e otimizados com o foco nas emissões incorporadas, nas emissões operacionais, na iluminação natural e na irradiação global. Neste cenário, a diminuição das áreas envidraçadas possibilitou que as perdas de energia e as emissões de carbono incorporadas e operacionais fossem reduzidas.

Busca da forma aplicada a componente da edificação - coberturas

Partindo para análises focadas nas partes constituintes do edifício, as investigações destinadas às coberturas, de modo geral, desenvolvem-se majoritariamente em duas etapas: manipulação da forma e controle das aberturas. Em alguns casos, somam-se a estas, avaliação das propriedades de materiais não convencionais (Ayoub; Ragheb, 2023) e processos de fabricação (Gutierrez; Wanner, 2016), sobretudo vinculados a soluções alternativas de tecnologia.

Estas abordagens se orientam pelo controle da iluminância e da radiação solar e pela eficiência estrutural, desenvolvidas a partir de topologia, forma e dimensionamento, com o emprego de modelos físicos e computacionais. Enquanto o primeiro fornece informações sobre a mudança de forma e uma prova de conceito, o segundo é empregado para descrever exatamente a geometria e seu comportamento estrutural.

De modo geral, estes estudos contemplaram coberturas de telhados de grande extensão, com estruturas curvas e materiais mais convencionais (Emami, 2019, 2021; Emami; Giles; von Buelow, 2020). Contudo, também foram verificadas soluções direcionadas ao acesso solar de edificações em contexto urbano (Anton; Tănase, 2016), a mobiliário urbano (van Ameijde *et al.*, 2022) e associadas a invólucros de sombreamento integrados (Adriaenssens *et al.*, 2014a). Estas pesquisas demonstraram que o aumento da complexidade do telhado pode melhorar o seu desempenho, tanto no que se refere a critérios luminosos e térmicos, quanto estruturais.

Busca da forma aplicada a envoltórias e elementos de controle solar

As fachadas do edifício atuam como uma interface e, cada vez mais, vêm sendo pensadas de modo a responder às mudanças climáticas e às demandas dos usuários. As pesquisas com esta abordagem são, em sua maioria, direcionadas para estruturas desenvolvidas

a partir de geometrias não-euclidianas e com sistemas de atuação dinâmicos. Neste contexto, Adriaenssens *et al.* (2014a) desenvolveram uma casca, para controle da radiação solar. Flor *et al.* (2018) propuseram a construção de uma estrutura multicamada a partir de folhas de etileno-tetrafluoroetileno, para investigar o desempenho óptico da envoltória e seu impacto no desempenho energético do edifício em termos de aquecimento, resfriamento e iluminação. Kahramanoğlu e Alp (2023) desenvolveram um modelo de fachada baseado em princípios de origami. Em outras pesquisas, as abordagens de trabalho estão associadas à natureza e à biologia, cujos fundamentos são aplicados aos processos de projeto (Agirbas, 2019; Khosromanesh; Asefi, 2019; Hosseini *et al.*, 2021).

Estas abordagens demonstraram que os sistemas propostos são capazes de manter um alto nível de desempenho através do controle da forma, quando as condições de operação ou os requisitos funcionais (como programa arquitetônico) mudam de maneira previsível ou não. Indicaram, ainda, que as fachadas responsivas foram capazes de aproveitar ao máximo a luz natural, sem prejudicar o acesso à vista externa.

Os trabalhos de Zani *et al.* (2017), Khidmat *et al.* (2022) e Pouyanmehr *et al.* (2022), por sua vez, focaram na concepção e avaliação de elementos de controle solar, em investigações direcionadas ao desempenho da luz do dia e energético e no acesso da vista externa. Avaliações de desempenho estrutural consideraram, principalmente, a espessura do material empregado. Nestas pesquisas são investigados dispositivos passivos (fixos ou ajustados manualmente) e ativos ou híbridos (sistemas biomiméticos), a partir de um fluxo de trabalho que envolve a modelagem e a simulação de desempenho, muitas vezes associadas a otimização da geometria. Em alguns casos, o método incorpora a validação do modelo ou processo propostos. Outros campos de pesquisa foram também incorporados a estes estudos, como a comprovação do desempenho de um material específico como dispositivo de sombreamento (Zani *et al.*, 2017; Khidmat *et al.*, 2022) e a combinação de métodos de avaliação (Pouyanmehr *et al.*, 2022).

Como resultado, estas pesquisas demonstraram a viabilidade da metodologia proposta e melhorias em termos de desempenho da luz do dia, redução das horas de ofuscamento e de demandas energéticas. Pouyanmehr *et al.* (2022) apontou, ainda, que o ângulo de altitude é mais influente em fornecer um desempenho luminoso adequado do que o ângulo das lâminas do dispositivo de sombreamento e que os melhores resultados foram verificados em análises nas quais os níveis de desempenho da luz do dia coincidem com uma maior qualidade de visualização.

Busca da forma aplicada a estudos que abordam integração de sistemas de geração de energia

A integração de sistemas de geração de energia à edificação foi proposta em variações de estudos com enfoque nas coberturas e envoltórias. Estes trabalhos buscam a forma geométrica adequada visando à máxima incidência de radiação solar, a partir do equilíbrio entre as restrições da arquitetura, da estrutura e dos sistemas energéticos. Block *et al.* (2017) apresentaram o desenvolvimento de um edifício experimental, no qual a integração de sistemas de energia foi prevista através de energia fotovoltaica de filme fino flexível aplicado à cobertura e painéis fotovoltaicos. Como continuidade desta pesquisa, Jayathissa *et al.* (2018) conduziram um estudo baseado em metodologia aplicada no contexto da fachada solar adaptativa para proposição de uma envoltória fotovoltaica, a partir de sua resistência estrutural.

Bomfim e Tavares (2019) exploraram a viabilidade de implementação de tecnologia de energia solar em uma fachada de edifício, buscando a forma adequada para uma fachada fotovoltaica, a partir de grades de sustentação triangulares e quadrilaterais. Zhang *et al.* (2023) inseriram sistemas fotovoltaicos em fachadas de arranha-céus de alto desempenho, com o propósito de ampliar o potencial de energia solar e eólica e reduzir o deslocamento estrutural. Os principais resultados demonstraram que a otimização dos painéis fotovoltaicos garantiu melhor desempenho luminoso e estrutural, apesar da redução na produção de energia.

O Quadro 3 sintetiza as abordagens empregadas nestes estudos, juntamente com os anteriormente apresentados. No Quadro 4 estão sintetizados os principais resultados e geometrias obtidos nestes trabalhos.

Quadro 3 - Resumo das configurações e metodologias dos estudos elencados, por ano de publicação

Referência	Foco	Aplicação	Metodologia e ferramentas	Parâmetros	Limitações
Adriaenssens <i>et al.</i> (2014a)	Processo <i>form-finding</i> dialético em projetos de sistemas arquitetônicos de alto desempenho	EUA	Estudo experimental baseado em FEM-NL. SiP / E-RD. Ferramentas: EC; EF. Otimização numérica	Geometria; comportamento estrutural e comportamento cinético	Limitações não indicadas.
Su e Yan (2015)	Distância de deslocamento de enfermeiros e desempenho da iluminação natural nos quartos	EUA	Estudo experimental baseado em MSO. EsC; SiP. Ferramentas: D/GH; R/GH. Otimização: Galapagos	Tamanho e localização do quarto; tamanho das aberturas; localização do edifício	Limitações dos métodos de simulação abordados.
Anton e Tănase (2016)	Implicações da modelagem paramétrica e análise de energia no projeto arquitetônico	Não identificada	Estudo experimental baseado em MRD. Ferramentas: EP; DYN; HB; OS; RD; R/GH. Otimização: Galapagos	Menor energia solar absorvida; área de sombra máxima	Avaliação focada em artefatos arquitetônicos, com baixa aplicação prática na edificação.
Gutiérrez e Wanner (2016)	Soluções alternativas de tecnologia de iluminação natural feitas de argila, a partir de tecnologias emergentes	Não identificada	Estudo experimental baseado em simulação. EsC / E-RD. Ferramentas: D/GH; G-EC; R/GH; SkUp.	Fixo: área de superfície. Variáveis: seção, textura e refletância da superfície	Limitações das propriedades do material empregado.
Konis, Gamas e Kensek (2016)	Utilização de estratégias ambientais passivas no processo de projeto, para fluxo de trabalho baseado em simulação de iluminação e energia	EUA	Estudo experimental. SiP. Ferramentas: EP; RD; R/GH. Otimização: Octopus	Geometria urbana; geometria do edifício (altura, largura e área total do piso, PAF)	Desconsidera elementos de sombreamento operáveis e sistemas de aberturas complexos. Possibilidade de resultados sobrestimados para locais com vegetação significativa.
Turrin <i>et al.</i> (2016)	Projeto de edifícios esportivos com condições climáticas adequadas, tanto quanto possível passivamente	Não identificada	Estudo experimental baseado em CFD. EsC; SiP. Ferramentas: DeB; HB; LB; mF; PYT; R/GH.	Altura do telhado; dimensões das janelas; propriedades dos materiais; número de claraboias operáveis; rotação do edifício	Fluxo de trabalho limitado a avaliação de geometrias simples ou com pouca variabilidade.
Block <i>et al.</i> (2017)	Construção leve e sistemas adaptativos de energia, para demonstrar a energia ideal no ciclo de vida	Suíça	Estudo experimental baseado em CFD e FEM-NL. EsC / E-RD. Ferramentas: ANS; TNA	Piso funicular; telhado sanduíche (casca de concreto); fachada solar adaptativa; sistema de controle automatizado	Necessidade de análises mais detalhadas dos componentes propostos.
De Luca (2017)	Método para geração da forma do envelope de edifícios altos localizados em ambientes urbanos	Estônia	Estudo experimental baseado em estratégias de subtração. EsC. Ferramentas: D/GH; LB; PYT; R/GH	Trajetória solar; análise das horas de iluminação natural; ferramentas de seleção de visibilidade solar; direção dos vetores solares	Limitações não indicadas.

Quadro 3 - Resumo das configurações e metodologias dos estudos elencados, por ano de publicação (continuação)

Referência	Foco	Aplicação	Metodologia e ferramentas	Parâmetros	Limitações
Zani <i>et al.</i> (2017)	Sistema de sombreamento estático de concreto de alto desempenho	Itália	Estudo experimental baseado em simulação. EsC; SiP. Ferramentas: HB; LB; R/GH. Otimização: Octopus.	Controle de radiação; índices de vista externa e luz do dia; desempenho energético	Fluxo de trabalho limitado a avaliação de geometrias simples ou com pouca variabilidade.
Flor <i>et al.</i> (2018)	Comportamento ambiental de construções em EFE em mecanismos de sombreamento dinâmico	Reino Unido; Espanha	Estudo experimental baseado em simulação. EsC; SiP / E-RD. Ferramentas: EP.	Volume da zona; densidade de ocupação; densidade de ganho de calor sensível do equipamento; densidade de potência da iluminação; iluminância; taxa de infiltração; pontos de ajuste de resfriamento e aquecimento	Limitações das propriedades do material empregado. Necessidade de adequação das dimensões do elemento analisado. Fluxo de trabalho limitado a um tipo de edificação.
Jayathissa <i>et al.</i> (2018)	<i>Design</i> performativo para modelagem de fachadas, avaliação da resistência estrutural, desempenho energético e as condições de iluminação	Suíça	Estudo experimental baseado em FEM. SiP / E-RD. Ferramentas: KAR; LB; PYT; R/GH	Dimensão e perfil geral da estrutura; dimensão do painel fotovoltaico; espaçamento; <i>layout</i> ; amplitude do movimento	Limitações dos métodos de simulação abordados.
Lobaccaro <i>et al.</i> (2018)	Abordagem para investigação das emissões de gases de efeito estufa incorporadas e operacionais em ZEBs	Noruega	Estudo experimental baseado em LCA. EsC; SiP. Ferramentas: DeB; D/GH; LB; R/GH. Otimização: Galapagos e Octopus	Materiais; tecnologia; componentes; forma; posição e tamanho das aberturas	Limitações na acessibilidade e simulações solares e uso da terra. Limitações no procedimento da avaliação do ciclo de vida.
Agirbas (2019)	Investigar processos de inteligência de enxame (<i>swarm intelligence</i>) para possível uso no projeto arquitetônico e na construção de fachadas.		Estudo experimental baseado em algoritmos de inteligência de enxame (multi-agentes). EsC; SiP; Swl. Ferramentas: EP; HB; OS; RD; R/GH.	Regras matemáticas: separação, alinhamento; coesão, para trabalho com geometrias não-euclidianas	Baixo grau de complexidade do modelo avaliado. Desconsidera contexto urbano da edificação.
Bianconi, Filippucci e Buffi (2019)	Processo integrado de <i>design</i> e produção baseado na customização em massa, interface de usuário na web e direcionada a construções em madeira	Itália	Estudo experimental baseado em simulação. SiP; MoG; PrV. Ferramentas: EP; D/GH; OS; RD; R/GH. Otimização: Octopus	Orientação do edifício; tamanho das aberturas; tipo de teto; inclinação do telhado; posição dos elementos envidraçados	Baixo grau de complexidade do modelo avaliado.
Bomfim e Tavares (2019)	Gerar a forma geométrica adequada para fachadas, buscando a máxima incidência de radiação solar	Brasil	Estudo experimental baseado em CBDM. Ferramentas: ETo; LB; PYT. Otimização: Galapagos	Variações de isocurvas; condições iniciais; fixação de suas bordas	Baixo grau de complexidade do modelo avaliado. Limitações na aplicabilidade da proposta em contexto real.

Quadro 3 - Resumo das configurações e metodologias dos estudos elencados, por ano de publicação (continuação)

Referência	Foco	Aplicação	Metodologia e ferramentas	Parâmetros	Limitações
Ekici <i>et al.</i> (2019a)	Metodologia para otimizar o desempenho da luz natural de edifício alto localizado em distrito urbano denso	Não identificada	Estudo experimental baseado em simulação. Ferramentas: D/GH; R/GH	Zoneamento da envoltória; tipo de material de envidraçamento	Baixo grau de complexidade do modelo avaliado.
Emami (2019)	Parâmetros de projeto estrutural e de iluminação natural e implementação dos mesmos em um modelo paramétrico	Não identificada	Estudo experimental baseado em FEM. SiP. Ferramentas: D/GH; KAR; PYT; R/GH	Estrutural: topologia; forma; dimensionamento. Processo de projeto: conceito; desenvolvimento; detalhamento. Geometria: curvatura; orientação da superfície; alteração do tamanho e número de aberturas; orientação da luz norte; elemento de controle solar externo e interno; revestimento; vidro translúcido; soluções híbridas.	Fluxo de trabalho limitado a avaliação de geometrias simples ou com pouca variabilidade.
Javanroodi, Nik e Mahdavinejad (2019)	Estrutura de otimização baseada em <i>design</i> para reduzir a demanda anual de energia e desconforto térmico em edifícios de escritórios altos	Irã	Estudo experimental baseado em <i>Energy Efficient Form-Finder</i> . SiP / E-ER. Ferramentas: D/GH; EP; LB; R/GH Otimização: Octopus	Densidade urbana: cobertura do sítio; densidade de construção; proporção da área de plotagem; razão da área de volume	Fluxo de trabalho limitado a avaliação de forma inicial com geometria retangular. Simplificação dos dados para as áreas urbanas e microclima.
Khosromanesh e Asefi (2019)	Processo de implementação de conceitos bio-inspirados para concepção de fachadas	Não identificada	Estudo experimental baseado em FEM. SiP / E-RD. Ferramentas: R/GH.	Conceitos: movimento; crescimento; mudança. Fachadas: adaptabilidade; hierarquia; multifuncionalidade; heterogeneidade; deformabilidade	Necessidade de investigação da proposta em estudo experimental. Limitações na aplicabilidade da proposta em contexto real.
Emami, Giles e von Buelow (2020)	Desempenho estrutural, de iluminação natural e de energia de estruturas de casca perfurada	EUA	Estudo experimental baseado em FEM. SiP. Ferramentas: AR; D/GH; KAR; PYT; R/GH	Elevação dos pontos das bordas; aumento da curva da borda; inclinação da curva da borda	Desconsidera as propriedades dos materiais. Simplificação e/ou limitação das análises estatísticas.
Rynska <i>et al.</i> (2020)	Modelos de otimização de edifícios, níveis de radiação solar em escala urbana, análises de sombra e vento	Polônia	Estudo experimental baseado em CFD. EsC; SiP. Ferramentas: DeB; LB; RD; R/GH; RV	Características do local, dados climáticos e geográficos	Necessidade de estudos complementares para comprovação da precisão do método. Dados de entrada simplificados e incertos.

Quadro 3 - Resumo das configurações e metodologias dos estudos elencados, por ano de publicação (continuação)

Referência	Foco	Aplicação	Metodologia e ferramentas	Parâmetros	Limitações
De Luca, Dogan e Sepúlveda (2021)	Geração de envelopes solares de edificações mais altas, considerando diferentes domínios do ambiente urbano	Estônia	Estudo experimental baseado em <i>Reverse Solar Envelope</i> . EsC. Ferramentas: D/GH; HB; LB; PYT; R/GH	Discretização do volume/fachada; geração e seleção de raios solares; análise de acerto ou erro; geração de envelope solar reverso	Limitações não indicadas.
Emami (2021)	Conceituar espaço de busca qualitativo antes de construir um modelo paramétrico para entendimento dos limites e limitações deste espaço	Não identificada	Estudo experimental baseado em FEM. EsC; MoG; SiP. Ferramentas: AR; D/GH; KAR; PYT; R/GH	Topologia; forma; dimensionamento	Simplificação e/ou limitação das métricas utilizadas.
He <i>et al.</i> (2021)	Método para previsão de desempenho da luz natural com base em CNNs e GANs para projetos e otimização de edifícios	China	Estudo experimental baseado em simulação. CNN; GAN; MoP. Ferramentas: HB; MOO; RD; R/GH; SkUp	Largura; profundidade da sala, PAF; orientação da janela	Resultado insatisfatório para avaliação dinâmica da iluminação natural. Fluxo de trabalho limitado a avaliação de geometrias simples ou com pouca variabilidade.
Hosseini <i>et al.</i> (2021)	Fachada interativa de sombreamento cinético para melhoria do conforto visual, inspirada em movimentos cinéticos e comportamento de plantas	Irã	Estudo experimental baseado em Abordagem morfológica biomimética. SiP. Ferramentas: D/GH; R/GH	Divisão de grade; área transitória-sensível; persiana deformável; posições do sol e dos ocupantes; orientações	Necessidade de investigação da proposta em estudo experimental.
Szentesi-Nejur, De Luca e Nejur (2021)	Metodologia e resultados de técnicas de criação generativa do objeto arquitetônico	Canadá	Estudo experimental baseado em simulação. EsC; SiP. Ferramentas: LB; R/GH. Otimização: Galapagos	Urbanos; coeficiente máximo de densidade. Arquitetônicos: altura máxima do volume	Simplificação e/ou limitação das métricas utilizadas.
van Ameijde <i>et al.</i> (2022)	Concepção de coberturas personalizadas de espaços públicos e análise da visibilidade urbana e condições ambientais nestes ambientes	China	Estudo experimental baseado em simulação. EsC; SiP. Ferramentas: DeCodingSpaces; KAN; KAR; LB; R/GH. Otimização: Galápagos; Wallacei	Deformação; carga de vento; peso; área da superfície; controle de radiação	Limitações dos métodos de simulação abordados.
Khidmat, Fukuda e Kustiani (2022)	Potencial dos processos paramétricos na construção de uma casa de madeira hiperboloide	Japão	Estudo experimental baseado em FEM. SiP / E-ER. Ferramentas: HB; KAR; LB; R/GH. Otimização: Octopus	Raio inferior; distância de deslocamento; componentes de madeira; torção; altura; raio superior 1 e 2; inclinação do telhado	Simplificação e/ou limitação das métricas utilizadas.

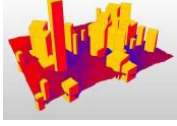
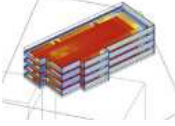
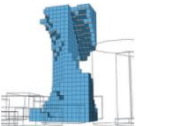
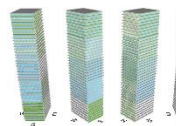
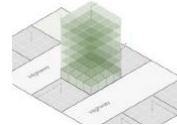
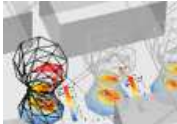
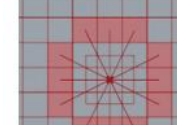
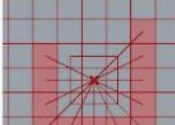
Quadro 3 - Resumo das configurações e metodologias dos estudos elencados, por ano de publicação (continuação)

Referência	Foco	Aplicação	Metodologia e ferramentas	Parâmetros	Limitações
Khidmat <i>et al.</i> (2022)	Utilização do metal expandido como um material de construção ecologicamente correto, para modelagem de dispositivo de sombreamento	Japão	Estudo experimental baseado em FEM. SiP; MoG / E-ER. Ferramentas: HB; LB; R/GH. Otimização: Octopus	Fixos: altura; comprimento; porcentagem de vitrificação. Metal expandido: altura e comprimento do diamante modular; <i>bond</i> ; <i>strand</i> ; <i>angle</i>	Desconsidera espessura do elemento de controle solar. Necessidade de ampliar o número de gerações das simulações de otimização.
Pouyanmehr <i>et al.</i> (2022)	Determinação das características de persianas externas que garantam melhor desempenho da iluminação natural e qualidade de vista externa	Irã	Estudo experimental baseado em simulação. Si. Ferramentas: ClimateStudio; R/GH.	PAF; ângulo de altitude e ângulo das lâminas das persianas	Simplificação e/ou limitação do <i>software</i> utilizado.
Ayoub e Ragheb (2023)	Pesquisa sobre as propriedades térmico-solares não convencionais de telhados de membrana elástica	Egito	Estudo experimental baseado em simulação. SiP. Ferramentas: R/GH; EP; KAN; PYT	Variáveis internas: largura, comprimento e ângulo de orientação. Variáveis externas: intervalos de tempo	Simplificação e/ou limitação do <i>software</i> utilizado.
Kahramanoğlu e Alp (2023)	Desenvolvimento de modelo de fachada responsiva baseado em princípios de origami	Turquia	Estudo experimental baseado em simulação. SiP. Ferramentas: CSt; KAN; R/GH	Movimento das geometrias; parâmetros cinemáticos	As avaliações desconsideram a ocupação por usuários
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Diminuição do uso anual de energia, aumento do potencial de energia solar e redução do deslocamento estrutural	China	Estudo experimental baseado em simulação. SiP. Ferramentas: R/GH; EP; KAR. Otimização: NSGA-II; RBFMOpt.	Raio da geometria do plano; raio do plano horizontal; altura	Simplificação e/ou limitação do <i>software</i> utilizado.

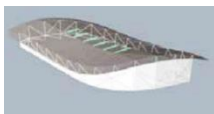
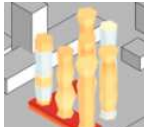
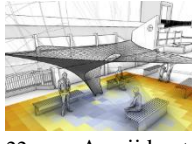
Legenda. METODOLOGIA - AnS: Análise de simulação; CBDM: Modelagem da luz do dia baseada no clima; CFD: Dinâmica dos Fluidos Computacional; E-ER: Experimento (escala real); E-RD: Experimento (escala reduzida); EsC: Estudo de caso; FEM: Método dos elementos finitos; FEM-NL: Método dos elementos finitos não lineares; LCA: Métodos de avaliação do ciclo de vida; MIC: Coeficiente de Informação Máximo; MoG: Modelo generativo; MPHI: Método de pesquisa heurístico e interpolação; MMC: Modelo de Monte Carlo; MRD: Método de relaxamento dinâmico; MSO: Método de “simulação *offline*”; RNE: Redes neurais; SiP: Simulação paramétrica. FERRAMENTAS – ABQ: Abaqus; ANS: ANSYS Fluent 14; AR: Archsim; CSt: ClimateStudio; DeB: DesignBuilder; D/GH: Diva-for-Grasshopper; DYN: Dynamo; EC: Ecotect; EP: EnergyPlus; EF: EFEN; ETo: Evolute Tools; G-EC: Geco-Ecotect; HB: Honeybee; KAN: Kangaroo; KAR: Karamba; LD: Ladybug; LOC: Locust add-on; mFR: modeFrontier; MOO: Moosas; MTL: Matlab; OS: Open Studio; PYT: Scripts Python; RD: Radiance; R/GH: Rhinoceros/Grasshopper; RV: Autodesk Revit; SAP: SAP2000; SkUp: SketchUp; TNA: Thrust Network Analysis. PARÂMETROS: PAF: Percentual de abertura na fachada.

Fonte: a autora.

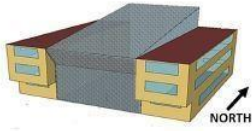
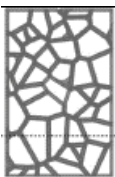
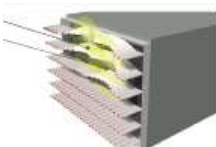
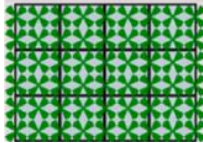
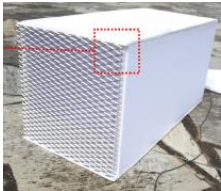
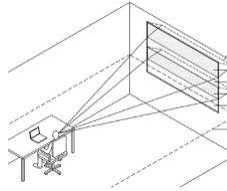
Quadro 4 - Principais resultados obtidos e geometrias resultantes

Classificação	Principais resultados / geometrias
Volumetria inserida em seu contexto urbano	 1- Anton e Tănase (2016)  2- Konis, Gamas e Kensek (2016)  3- De Luca (2017) – Caso 3  4- Ekici <i>et al.</i> (2019)
	1- Menor energia solar absorvida e máxima área de sombreamento. 2- Melhores desempenhos combinados foram verificados para climas mais quentes e resultados variaram conforme características locais: Heisinki - aumento do volume da edificação e redução da quantidade de faces; New York - aumento do volume da edificação e da quantidade de faces; Los Angeles - redução da quantidade de faces; Mexico City - aumento da quantidade de faces. 3- Melhor desempenho luminoso e maior área de piso, se comparado a método aditivo. 4- Baseado no zoneamento da edificação, para cada faixa de altura: desempenho obtido a partir da variabilidade do percentual de envidraçamento por zona.  5- Javanroodi, Nik e Mahdavinejad (2019)  6- Rynska <i>et al.</i> (2020)  7- De Luca, Dogan e Sepúlveda (2021)  8- Szentesi-Nejur, De Luca e Nejur (2021)
	5- Melhores desempenhos para demanda de energia verificados em propostas com pátio ou semi- pátios e melhor desempenho térmico verificado em edificações em formato de U, com articulação com geometria cuboide; maior demanda de energia em contextos urbanos mais adensados. 6- Caso 1 – maior incidência de radiação solar no verão, menor incidência no Solstício de Primavera (maiores índices em Sul e Oeste). 7- Maiores distâncias entre as faces mais externas e núcleo central resultam em volumes com piores desempenhos luminosos; evidências mostram que os melhores envelopes solares reversos de compensação são aqueles caracterizados pelo número próximo ao centro da parcela. 8- Melhor desempenho térmico, referente à otimização da radiação solar.  9- Khidmat, Fukuda e Kustiani (2022) 9- Melhor desempenho luminoso verificado para valores máximos de UDI e área envidraçada; proporção de envidraçamento influencia diretamente na área envidraçada.
Volumetria obtida a partir da configuração de ambientes	 10- Su e Yan (2015). C1  Caso 2 (Boston). C2 10- Baseado na variabilidade da conformação do ambiente segundo o peso atribuído à distância percorrida e o desempenho da iluminação natural. Melhor desempenho verificado para o Caso 1 – C1 (Peso 1:1): existência de pátio; Caso 2 – C2 (Peso 1:2): Volume em forma de U.

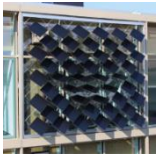
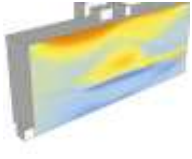
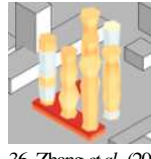
Quadro 4 - Principais resultados obtidos e geometrias resultantes (continuação)

Classificação	Principais resultados / geometrias			
Geometria do edifício				
	11- Turrin <i>et al.</i> (2016)	12- Bianconi, Filippucci e Buffi (2019)	13- He <i>et al.</i> (2021)	14- Zhang <i>et al.</i> (2023)
	11- A combinação de pequenas/grandes claraboias, sem envidraçamento na fachada e telhado pouco expressivo resulta em edificações com piores desempenhos; telhados com curvaturas expressivas apresentam melhores desempenhos; a combinação de pequenas claraboias e fachada envidraçada e grandes claraboias com menor espaçamento entre elas resulta em edificações com piores desempenhos. 12- Grande variabilidade de desempenhos entre as formas otimizadas, com soluções mais eficientes atingindo redução do consumo de energia em 380%/m² e redução nos custos de construção de 240%/m². 13 - Baseado na codificação da informação geométrica em imagens: CNNs para prever o desempenho da luz natural para construção de geometrias diversas e os resultados da visualização do pix2pix validam a eficiência e a eficácia na previsão da distribuição de iluminância. 14- Aumento de 12% na eficiência do uso de energia e melhoria de 23% na estabilidade estrutural. Contudo houve uma redução de 32% no potencial de energia solar.			
Emissão de gás carbônico				
	15- Lobaccaro <i>et al.</i> (2018)			
	15- Otimização da orientação das fachadas aumenta a incidência de radiação solar nas envoltórias da edificação; redução das áreas envidraçadas em até 70% ainda mantém os níveis mínimos de iluminação natural, reduz as perdas de energia do edifício e as emissões de carbono incorporadas e operacionais; exposição e distribuição otimizadas das aberturas aumentaram a incidência de luz natural.			
Componente da edificação - cobertura				
	16- Adriaenssens <i>et al.</i> (2014)	17- Gutiérrez e Wanner (2016) – Superfície de hélice cruciforme	18- Anton e Tănase (2016) - Inflado	19- Emami (2019)
	16- A forma construída forneceu proteção de sombreamento adequada, com bloqueio da radiação solar direta, redução da temperatura interna, sem prejuízo da iluminação natural. 17- Superfície sinuosa do cone: a cobertura propiciou controle de iluminação durante o ano, com piores resultados para o solstício de verão 18- Menor energia solar absorvida e máxima área de sombra. 19- Aumento do peso com o aumento da espessura da estrutura; aumento dos valores de iluminância interna com o aumento da taxa de perfuração; iluminância excessiva em conchas de grade aberta, com necessidade de instalação de envidraçamento translúcido.			
				
	20- Emami, Giles e von Buelow (2020) – Superfície sinclástica	21- Emami (2021)	22- van Ameijde <i>et al.</i> (2022)	23- Ayoub e Ragheb (2023)
	20- Baseado na correlação entre taxa de perfuração e critérios de desempenho: Correlações positivas – iluminância interna; excesso de oferta de luz; energia operacional e custos de energia. Correlações negativas: peso e custos estruturais. A espessura afeta o desempenho estrutural e energético, mas não o desempenho luminoso. 21- Baseado na comparação entre uma estrutura base e modelos otimizados: estruturalmente a casca original apresenta melhor desempenho de deflexão do que a proposta otimizada. 22- A estrutura otimizada é mais eficaz em resposta às forças de reação do dossel e às forças do vento do que a versão original. 23- O aumento da complexidade e da inclinação do telhado pode melhorar o seu desempenho.			

Quadro 4 - Principais resultados obtidos e geometrias resultantes (continuação)

Classificação	Principais resultados / geometrias			
Envoltórias				
	24- Adriaenssens <i>et al.</i> (2014)	25- Flor <i>et al.</i> (2018)	26- Agirbas (2019) - Voroni	27- Khosromanesh e Asefi (2019) – <i>Flectofin</i>
	24- Otimização atingiu alto nível de desempenho através do controle da forma, quando as condições de operação ou requisitos funcionais mudam de forma previsível ou não. 25- Almofadas de folha de ETFE comutáveis melhoram o desempenho energético (redução da demanda de energia em até 48,5%) e luminoso do edifício, com melhores resultados dos que os obtidos com soluções comuns de envidraçamento. 26- Baseado na comparação entre caso de Geometria Euclidiana (relação sólido-vazio) e fachadas paramétricas (<i>Voronoi</i> e <i>Metaball</i>): a forma da fachada está diretamente relacionada com a entrada da luz natural (maiores valores obtidos para geometria <i>Voronoi</i>); dispersão e entrada da luz são muito influenciadas pela orientação da forma e por sua região (para geometria euclidiana e <i>Metaball</i>). 27- Trabalha fachada de inspiração biocinética para abertura inteligente e fachada estática bioinspirada (plantas): o controle da iluminação e da ventilação naturais gerou economia de energia.			
Elementos de controle solar				
	28 - Hosseini <i>et al.</i> (2021)	29 - Kahramanoğlu e Alp (2023)		
	28- Baseado na comparação entre um caso de referência (janela simples) e o modelo proposto (fachada cinética interativa bioinspirada): modelo proposto apresentou melhora significativa no conforto visual e desempenho da luz natural, com melhor desempenho verificado para fachada Sul. 29 – Os resultados mostraram que a fachada responsiva proposta, baseada em origami, foi capaz de aproveitar ao máximo a luz do dia sem prejudicar a visibilidade.			
Elementos de controle solar				
	30- Zani <i>et al.</i> (ZANI <i>et al.</i> , 2017)	31- Khidmat <i>et al.</i> (2022)	32- Pouyanmehr <i>et al.</i> (2022)	
	30- Otimização atingiu melhorias em termos de desempenho da iluminação natural; redução das horas de ofuscamento; pequena redução na demanda total de energia. 31- Baseado na comparação entre um caso de referência (modelo sem dispositivo de sombreamento) e o modelo proposto: para desempenho luminoso, apenas as relações entre $ASE_{1000,250}$ e $UDI_{100-2000lx}$, $View$ e $UDI_{100-2000lx}$ e $View$ e $ASE_{1000,250}$ mostraram correlação significativa; <i>strand</i> e altura foram os parâmetros mais influentes para atingir os objetivos de sombreamento. 32- Os resultados demonstram que o ângulo de altitude é mais influente em fornecer um desempenho de iluminação natural adequado do que ângulo das lâminas das persianas e que os resultados ideias ocorrem em avaliações que os níveis aceitáveis de desempenho da iluminação natural coincidem com uma maior qualidade da visualização.			

Quadro 4 - Principais resultados obtidos e geometrias resultantes (continuação)

Classificação	Principais resultados / geometrias			
Integração de energia				
	33- Block <i>et al</i> (2017)	34- Jayathissa <i>et al.</i> (2018)	35- Bomfim e Tavares (2019)	36- Zhang <i>et al.</i> (2023)
	33- Aumento na rigidez do piso, se comparado a pisos de concreto tradicionais; aumento na rigidez da cobertura garante melhor isolamento acústico; otimização da geometria da edificação e dos sistemas construtivos propiciaram redução das emissões de gases de efeito estufa. 34- A otimização do <i>layout</i> do painel fotovoltaico garante melhor desempenho luminoso e estrutural, ainda que haja alguma perda na produção de energia. 35- Baseado na comparação entre um caso de referência (superfície plana) e modelos de malhas curvas: para as diferentes malhas de fachada avaliadas, as células solares não se distribuem com os mesmos desempenhos (maior taxa de radiação solar verificada para curvas sinusoidais); inserção de células solares na fachada é limitada ao tipo de malha avaliada. 36- Aumento de 12% na eficiência do uso de energia e melhoria de 23% na estabilidade estrutural. Contudo houve uma redução de 32% no potencial de energia solar.			

Fonte: a autora.

2.4. DISCUSSÃO

A aplicação de processos *form-finding* investigada nesta revisão demonstra sua transformação ao longo do tempo, partindo de uma abordagem de cunho exclusivamente estrutural até a incorporação de outros critérios de desempenho do edifício. Ao contrário de métodos tradicionais, estes processos adicionam o material e a intenção estrutural à modelagem (Maxwell *et al.*, 2014; Xia *et al.*, 2017), o que possibilita que as pesquisas se aprofundem na exploração e viabilidade da geometria avaliada. Esta evolução ocorre em diferentes escalas, desde o processo de projeto até as avaliações de desempenho que, majoritariamente, dão-se por meio de simulação computacional. Ainda assim, estes processos permitem um avanço dos trabalhos para além do campo estritamente experimental.

A forma arquitetônica não é mais diretamente definida pelas escolhas dos projetistas, mas o resultado é obtido em um processo dinâmico, no qual as mudanças de configurações dos dados de entrada conduzem as mudanças na geometria final. Neste contexto, identificar e sintetizar as etapas de um fluxo de trabalho pode servir como base para novas pesquisas. Como abordagem quantitativa, estes processos de projeto auxiliados por ferramentas computacionais contemplam um processo de trabalho que envolve a modelagem do objeto a ser analisado e simulação de seu desempenho, muitas vezes associadas à otimização da geometria. Em alguns casos, incorpora a validação do modelo ou processo propostos, previamente a estas avaliações.

Embora as abordagens investigadas demonstrem êxito na melhoria do desempenho verificado, ainda apresentam limitações, sobretudo relacionadas ao baixo grau de complexidade do modelo avaliado, à simplificação do fluxo de trabalho ou de dados de entrada e aos processos de validação limitados ou sua baixa aplicabilidade em contexto real.

2.4.1. Sistematização dos resultados

Partiu-se da sequência observada nos fluxos de trabalho destas pesquisas para apresentar a síntese dos resultados verificados para cada etapa de concepção e avaliação da geometria proposta. Esta sistematização resultou em três aspectos: (i) Modelagem do edifício e simulação de desempenho, (ii) validação e (iii) otimização da forma.

Modelagem do edifício e simulação de desempenho

Na condição de processos de projeto assistidos por ferramentas computacionais, a concepção dos objetos de estudo ocorreu por meio de dois diferentes métodos de modelagem: estático - a partir de ferramentas computacionais com base na concepção *Computer-aided design (CAD)* e abordagens numéricas, e dinâmico - *Building Information Modeling (BIM)* e processos algorítmico-paramétricos. Para estes estudos há predomínio desta última abordagem, com destaque para a suíte de modelagem parametricamente acoplada Rhinoceros + Grasshopper, algumas vezes associados a *scripts* Python. A predominância desta plataforma de simulação também foi verificada nas práticas reais de simulação e otimização de projeto arquitetônico, como apontado por Wortmann, Cichocka e Waibel (2022).

Por demandarem mais tempo para edição da geometria avaliada, abordagens estáticas foram menos representativas nesta amostra, exemplificadas pela utilização do *software* SketchUp, nos trabalhos de Gutiérrez e Wanner (2016) e He *et al.* (2021) e abordagem numérica, no trabalho de Adriaenssens *et al.* (2014a). Os critérios definidos nestas abordagens seguem sintetizados no Quadro 5.

Quadro 5 – Principais critérios empregados para a modelagem do edifício e de suas partes constituintes, para cada categoria do conjunto amostral

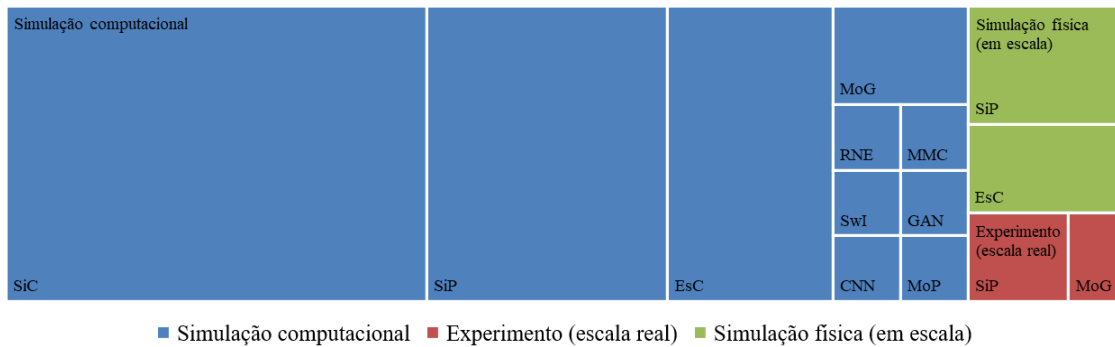
Classificação	Abordagem	Principais dados de entrada empregados
Volumetria inserida em seu contexto urbano	Algorítmico-paramétrica	Dimensões do edifício; dimensões das aberturas; sistemas de sombreamento externos; topografia e contexto urbano; orientação solar e características dos materiais empregados
Volumetria obtida pela configuração de ambientes	Algorítmico-paramétrica	Quantidade e dimensões de células, posto de enfermagem e quartos de pacientes; localização das salas; dimensões das aberturas
Geometria do edifício	Estática + BIM	Dimensões do ambiente; dimensões e localização das aberturas
	BIM + Algorítmico-paramétrica	Orientação das fachadas; dimensões da edificação; tipo de cobertura; inclinação do telhado; posicionamento dos elementos envidraçados
	Algorítmico-paramétrica	Orientação das fachadas; forma e dimensões da edificação; tipo de cobertura; dimensões do telhado; dimensões dos elementos envidraçados; propriedades térmicas dos materiais; rotação do edifício; discretização do volume e da fachada; geração e seleção de raios solares, PAF; dimensões e torção dos materiais
Componente da edificação - cobertura	Estática	Dimensões da estrutura; orientação; condições do suporte; orientação do elemento
	Algorítmico-paramétrica	Inclinação, orientação, perfuração e textura das superfícies; disposição, orientação, superfície e dimensões das aberturas; posicionamento dos vértices; dimensões e inclinação da curva das arestas; índice padrão de subtração; espessura da borda; índice de combinação de zona
Integração de energia	BIM + Algorítmico-paramétrica	Dimensões e perfil geral da estrutura; dimensões, espaçamento, layout e amplitude de movimento do painel fotovoltaico
	Algorítmico-paramétrica	Dimensões e inclinação do telhado; características dos materiais empregados; características das fachadas; sistema de controle automatizado; pontos, curvas e superfície da fachada
Envoltórias	Estática	Dimensões da estrutura; orientação
	Algorítmico-paramétrica	Dimensões das superfícies; relações mecânicas; profundidade da casca; largura da seção principal; deslocamento máximo da curvatura; proporção; força de direção; distância máxima, valor de deslocamento; geometria desenvolvida: centro, forma e faixa de raio do TSA; profundidade e rotação de elementos cinéticos; relação entre espessura e rigidez entre a viga e as aletas
Elementos de controle solar	Algorítmico-paramétrica	Inclinação das superfícies; dimensão da abertura entre aletas

Legenda. PAF: Percentual de abertura na fachada.

Fonte: a autora.

A maioria destas pesquisas se baseou somente em simulação computacional, contudo, para alguns poucos casos incorporou-se a simulação física em escala reduzida (Adriaenssens *et al.*, 2014a; Block *et al.*, 2017; Gutiérrez; Wanner, 2016; Khosromanesh; Asefi, 2019) e experimentos em escala real (Javanroodi; Nik; Mahdavinejad, 2019; Khidmat *et al.*, 2022). A aplicabilidade dos ensaios de desempenho, para as pesquisas avaliadas, segue sintetizada no gráfico da Figura 5.

Figura 5 - Aplicabilidade dos ensaios de desempenho, para o conjunto amostral avaliado

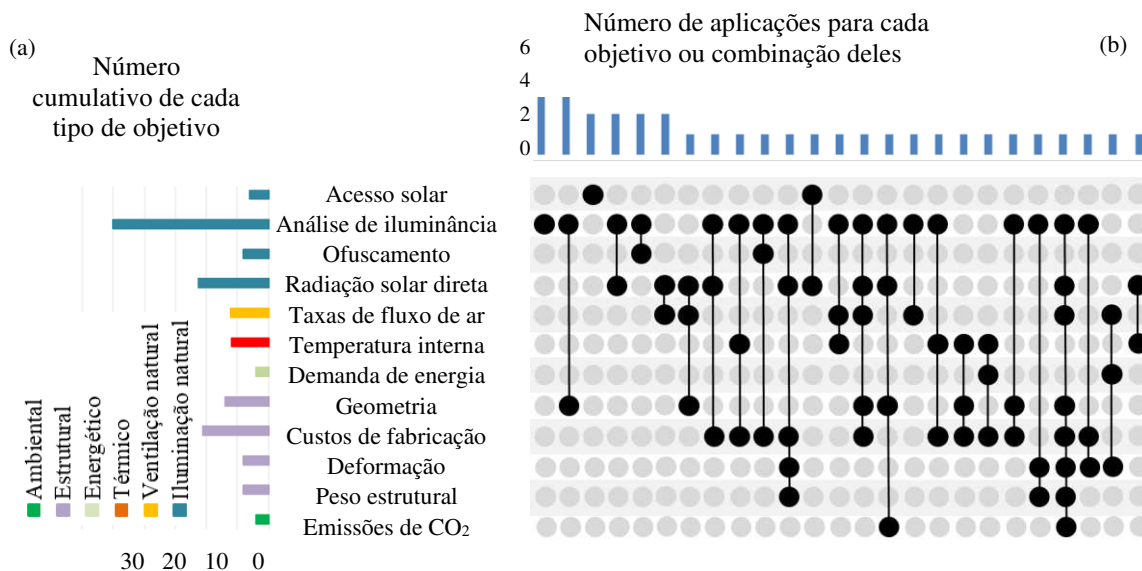


Legenda. SiC: Simulação computacional não paramétrica; SiP: Simulação paramétrica; EsC: Estudo de caso; MoG: Modelo generativo; PrV: Protótipo virtual; MoP: Modelo de proxy; CNN: Rede neural convolucional; GAN: Rede contraditória generativa; SwI: *Swarm Intelligence*; RNE: Rede neural e MMC: Modelo de Monte Carlo.

Fonte: a autora.

Destacam-se análises de desempenho da luz do dia (37%) e a associação destas análises ao desempenho estrutural, com 16% de ocorrências. A relação entre os objetivos de desempenho elencados e as principais métricas estabelecidas segue apresentada na Figura 6(a). Para estas métricas, a combinação entre elas e suas frequências de aplicação nos estudos revisados estão relacionadas na Figura 6(b).

Figura 6 – Condição de aplicação dos principais objetivos das pesquisas avaliadas



Considerando os *softwares* de simulação térmica, luminosa e energética de modo autônomo, o Ladybug Tools, incluindo o Honeybee, é o *software* mais empregado; destacando-se, ainda, o uso do EnergyPlus. No contexto arquitetônico, sobressaem as ferramentas de análise estrutural disponibilizadas na suíte de modelagem anteriormente citada, a partir do emprego do *plugin* Kangaroo para métodos de avaliação baseados em relaxamento dinâmico e Karamba, para aqueles baseados em elementos finitos.

Quanto aos indicadores empregados nestes trabalhos predominam, sobretudo, métricas de avaliação dinâmica para análise dos valores de iluminância interna; temperatura interna e demanda de energia para avaliação do desempenho térmico e energético, respectivamente. Análises do desempenho estrutural englobam, prioritariamente, peso estrutural, custos de fabricação e deformação (Quadro 6).

Quadro 6 – Métricas avaliadas nas simulações de desempenho, para cada categoria do conjunto amostral

Classificação	Principais métricas
Volumetria inserida em seu contexto urbano	Luminoso: Acesso solar; ASE; DA; sDA; sUDI; UDI Térmico: Temperatura operativa interna Energético: EUI
Volumetria obtida a partir da configuração de ambientes	Luminoso: UDI
Geometria do edifício	Luminoso: ASE; DA; DF; sDA; UDI Térmico: Temperatura operativa interna Energético: Consumo de energia
Componente da edificação - cobertura	Luminoso: Valores de iluminância; contraste visual; DA; Dav; sDA; UDI Energético: Consumo de energia
Integração de energia	Luminoso: Modelo de iluminação natural linear baseado na metodologia de fluxo total; Taxa de irradiação horizontal global Energético: Produção de energia elétrica
Emissão de gás carbono	Luminoso: DF Ambiental: Emissões de CO ₂
Envoltórias	Luminoso: cDA; DA; DF; DGP; EUDI; sDA; UDI Térmico: Temperatura externa
Elementos de controle solar	Luminoso: ASE; DA; DPG; sDA; UDI Energético: Demanda de energia

Legenda. ASE: *Annual Sunlight Exposure*; cDA: *Continuous Daylight Autonomy*; DA: *Daylight Autonomy*; Dav: *Dayglith availability*; DF: *Daylight Factor*; DGP: *Daylight Glare Probability*; EUDI: *Exceed Useful Daylight Illuminance*; EUI: *Energy Use Intensity*; sDA: *Spatial Daylight Autonomy*; SHCG: *Solar Heat Gain Coefficient*; sUDI: *Spatial Useful Dayglith Illuminance*; UDI: *Useful Daylight Illuminance*.

Fonte: a autora.

Validação

Na literatura avaliada, apenas oito pesquisas (23,5%) apresentam etapa de validação (Quadro 7). Este processo ocorre, majoritariamente, a partir da comparação entre os índices de desempenho obtidos para a edificação avaliada e os resultados extraídos de avaliações em *softwares* distintos; ou os resultados de simulações do próprio objeto avaliado, para diferentes contextos e parâmetros de análise. Em menor escala, validações foram realizadas a partir da comparação dos resultados de simulação da edificação em estudo e os dados reais monitorados por meio de medições de campo, tanto para amostra construída em escala real (Javanroodi; Nik; Mahdavinejad, 2019), quanto para protótipos em escala reduzida (Adriaenssens *et al.*, 2014; Jayathissa *et al.*, 2018).

Quadro 7 - Critérios empregados na etapa de validação, para o conjunto amostral avaliado

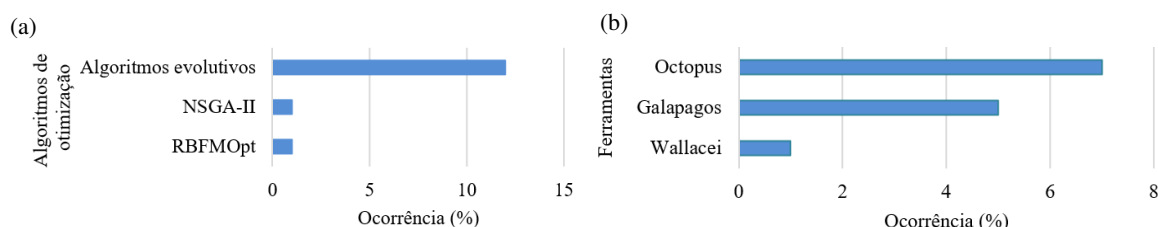
Classificação	Referência	Principais critérios empregados
Volumetria inserida em seu contexto urbano	Konis, Gamas e Kensek (2016)	Comparação dos resultados obtidos com desempenho de modelos de referência
	Javanroodi, Nik e Mahdavinejad (2019)	Comparação dos resultados obtidos com desempenho de uma sala de amostra construída em escala real
Volumetria obtida pela configuração de ambientes	Su e Yan (2015)	Medição e identificação de relações e a força das correlações entre variáveis em um conjunto de dados, por meio do Coeficiente Máximo de Informação (MIC)
Geometria do edifício	Turrin <i>et al.</i> (2016)	Comparação dos valores obtidos com resultados de desempenho verificados em outro <i>software</i> , para o comportamento geral do projeto e para um nível detalhado de comparação
	He <i>et al.</i> (2021)	Comparação entre conjuntos de dados da própria simulação: conjunto de treinamento (70%), conjunto de validação (15%) e conjunto de teste (15%)
Componente da edificação - cobertura	Adriaenssens <i>et al.</i> (2014b)	Comparação de resultados obtidos com desempenho verificado em protótipo construído em escala reduzida (Caso 1)
Envoltórias	Adriaenssens <i>et al.</i> (2014b)	Comparação dos valores obtidos com resultados de desempenho verificados em <i>softwares</i> distintos (Caso 2)
Integração de energia	Jayathissa <i>et al.</i> (2018)	Comparação entre conjuntos de dados da própria simulação: conjunto de treinamento (70%), conjunto de validação (15%) e conjunto de teste (15%)

Fonte: a autora.

Otimização da forma

Processos de otimização foram conduzidos em 42% dos trabalhos avaliados, destacando-se otimizações multiobjetivo. Para estas otimizações, algoritmos evolutivos são os mais populares (Figura 7a), com maior incidência de uso do algoritmo Octopus (53,8 %) (Figura 7b). Além dos algoritmos evolutivos, o algoritmo relacionado ao aprendizado de máquina RBFMOpt foi aplicado em um estudo, assim como o NSGA-II. Junta-se ao Octopus, o algoritmo Wallacei para otimização multiobjetivo, enquanto otimizações de objetivo único foram conduzidas a partir da ferramenta Galapagos.

Figura 7 - Frequência de aplicação de algoritmos e ferramentas de otimização entre os estudos revisados



Fonte: a autora.

Sob a ótica da otimização estrutural, esta abordagem foi apresentada somente em nove trabalhos (Block *et al.*, 2017; Jayathissa *et al.*, 2018; Bianconi; Filippucci; Buffi, 2019; Khosromanesh; Asefi, 2019; Emami, 2019, 2021; Emami; Giles; Von Buelow, 2020; Van

Ameijde *et al.*, 2022; Khidmat; Fukuda; Kustiani, 2022), para os quais foram realizadas, majoritariamente, avaliações de otimização da forma, direcionadas a coberturas. Neste tipo de análise o objetivo é encontrar a forma ótima em um domínio variável de projeto. Otimizações topológicas, ou seja, aquelas que têm por objetivo estabelecer a distribuição ótima de material (Bendsøe; Sigmund, 2003), foram menos recorrentes no conjunto amostral, tendo sido verificadas nos trabalhos de Emami (2019, 2021); Emami, Giles e Von Buelow (2020).

Considerando os processos de otimização, o conjunto amostral pode ser avaliado a partir de três grupos principais. O primeiro grupo representa estudos nos quais o objetivo principal foi prever o melhor conforto térmico. Estes trabalhos incluem, sobretudo, pesquisas cuja proposição da forma da edificação ocorre a partir de seu contexto urbano e artigos que exploraram formas de energia associadas à edificação e a emissões de gases de efeito estufa. O segundo grupo envolve a otimização dos parâmetros de projeto com o objetivo de maximizar a atuação da iluminação natural; exemplificado pela pesquisa que abordou a concepção da forma a partir de análises de conformação e distribuição dos ambientes. O terceiro grupo de estudos visa determinar os projetos ótimos que maximizam simultaneamente a disponibilidade da luz do dia e outros aspectos como conforto térmico, conforto visual e custos da edificação. Estes critérios foram abordados nos trabalhos que avaliaram a geometria da edificação e suas partes constituintes e nos artigos direcionados às pesquisas com envoltórias e elementos de controle solar. Os principais critérios empregados nos processos de otimização estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Critérios empregados nos processos de otimização, para cada categoria do conjunto amostral

Classificação	Principais critérios empregados
Volumetria inserida em seu contexto urbano	Algoritmo genético (ferramenta não explicitada): Relações hierárquicas entre pontos; tipo de módulos de vidro; tipo de parede Algoritmo genético (Galapagos): Redução da radiação solar absorvida; aumento da área sombreada Otimização multiobjetivo (Octopus): Dimensionamento das fachadas; existência ou não de pátio interno; percentual de aberturas nas fachadas; existência ou não de dispositivo de sombreamento; orientação do edifício; número de pavimentos; densidade urbana; células modulares Algoritmo de evolução diferencial auto adaptativa de objetivo único: Fixação dos valores máximos para parâmetros de iluminância
Emissão de gás carbono	Otimização multiobjetivo (Octopus): Otimização da orientação; otimização das aberturas; minimização da energia incorporada; maximização da radiação solar
Integração de energia	Otimização multiobjetivo (ferramenta não explicitada): Energia elástica interna; fator de carga de flambagem; desvio da forma para a geometria desejada; área da superfície envidraçada Espaçamento entre painéis fotovoltaicos Algoritmo genético (Galapagos): Incidência de radiação solar

Quadro 8 - Critérios empregados nos processos de otimização, para cada categoria do conjunto amostral (continuação)

Classificação	Principais critérios empregados
Volumetria obtida a partir da configuração de ambientes	Algoritmo genético (Galapagos): Redução das distâncias de deslocamento posto de enfermagem-quartos; adequação dos níveis de iluminância dos quartos
Volumetria inserida em seu contexto urbano	Algoritmo genético (Galapagos): Ampliação do acesso solar Otimização multiobjetivo (Octopus): Variabilidade de dimensionamento da construção; flexibilidade do valor da altura da edificação em relação à distribuição dos ambientes; otimização da organização interna do edifício; redução do consumo de energia; otimização dos fatores estruturais Algoritmos de análise multivariada: Maximização do valor médio da iluminância útil; minimização da necessidade de energia (resfriamento e aquecimento); maximização da produção de energia fotovoltaica; minimização dos custos de construção Otimização multiobjetivo (Colibri): Otimização da luz natural; definição da taxa de envidraçamento
Componente da edificação - cobertura	Otimização numérica: Redução dos ganhos térmicos Algoritmo genético (Galapagos): Redução da radiação solar absorvida Otimização multiobjetivo (ferramenta não explicitada): Topologia, forma e dimensões da estrutura; geometria do telhado; escala da taxa de perfuração; espessura; posicionamento dos vértices; proporção vão-levantamento em largura; deflexões e peso da estrutura Método de busca heurística: Abertura uniforme; máxima luz solar direta; luz difusa; luz solar incidente; híbrido (baixa incidência + luz solar difusa)
Envoltórias	Otimização multiobjetivo (ferramenta não explicitada): Proporção sólido-vazio; entrada de luz natural; número de partições nos parâmetros de seleção de fachada e geometria; espessura; deslocamento das aletas; tamanho e forma das aberturas
Elementos de controle solar	Otimização multiobjetivo (Octopus): Espessura da aleta; ângulo e profundidade da incisão; dimensionamento, ângulo e ligação dos componentes

Fonte: a autora.

2.5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma revisão das investigações recentes sobre a concepção da geometria do edifício e de suas partes constituintes, a partir do emprego de processos *form-finding*, apontando metodologias, ferramentas e parâmetros de avaliação. Estas pesquisas demonstram que a aplicação de processos *form-finding* vai além de uma mudança de procedimentos e possibilita um novo contexto espacial e temporal para explorações da forma do edifício. As principais contribuições deste estudo seguem listadas:

- Embora o cenário da literatura avaliada tenha sido limitado, os trabalhos exemplificam uma nova relação da geometria com o material e a estrutura, contrapondo-se aos processos de projeto convencionais de análise do desempenho da edificação. A inserção de restrições estruturais às pesquisas trouxe um avanço ao permitir uma descrição mais precisa da geometria em todas as fases do processo de mudança da forma, com vistas a um processo de projeto iterativo. Além disso,

possibilitou o equilíbrio entre as restrições de arquitetura e estruturas, gerando soluções viáveis em um intervalo de limites mínimo e máximo em que os parâmetros podem variar.

- Como esperado para análises de desempenho da luz do dia, os critérios mais recorrentemente utilizados na modelagem do edifício e de suas partes constituintes foram a orientação das fachadas, as dimensões da edificação e as dimensões e localizações das aberturas.
- Os trabalhos elencados apresentam, sobretudo, estudos de simulação computacional, com avaliações destinadas, em sua maioria, ao desempenho luminoso das edificações (37%), destacando-se indicadores relacionados a análises de iluminância. No conjunto amostral, apenas oito trabalhos avaliam o desempenho estrutural (26%), com foco, sobretudo, em processos de otimização da forma direcionados à concepção de coberturas do tipo casca.
- A incorporação do desempenho estrutural ocorreu tanto para a definição da geometria, em uma fase inicial do processo, quanto para a otimização da forma já definida. No primeiro caso, caracterizou-se como um processo de trabalho mais linear. Nos casos de otimização, os indicadores estruturais na condição de genoma ou parâmetros se uniram aos indicadores luminosos, térmicos, entre outros, inseridos como objetivos.
- Abordagens que trazem, simultaneamente, avaliação quantitativa do desempenho estrutural, térmico e luminoso foram aplicadas em estudos que avaliaram coberturas e sistemas de energia fotovoltaicos e representaram apenas 7% das pesquisas. Nestes trabalhos, destacam-se como critérios de desempenho estrutural, peso e deslocamento máximo e como parâmetros para avaliação do desempenho luminoso e térmico, Autonomia da luz do dia espacial (sDA), excesso de oferta da luz do dia, energia total e custos operacionais totais.
- Estes trabalhos refletem o predomínio de análises de edificações, ou de suas partes constituintes, cuja forma é concebida e otimizada sobretudo em ambiente de modelagem e simulação computacionais. Para tanto, sobressaem como principais *software* a suíte de modelagem parametricamente acoplada Rhinoceros + Grasshopper, DesignBuilder e SketchUp para desenvolvimento da geometria avaliada. A este primeiro, soma-se Ecotect Analysis, EnergyPlus, OpenStudio e

Radiance, para as simulações de desempenho luminoso e térmico. As simulações de desempenho estrutural empregaram a plataforma Rhinoceros + Grasshopper, a partir dos *plug-ins* Kangaroo e Karamba, além de Abaqus, ANSYS Fluent, DesignBuilder e SAP2000. Destaca-se o emprego de otimização evolutiva multiobjetivo, com utilização do algoritmo Octopus.

Além disso, os artigos revisados apontam que, usualmente, as pesquisas tendem a focar em tipologias construtivas específicas, sistemas instalados ou materiais de construção. Abordagens desta natureza tendem a apresentar análises mais aprofundadas para o caso avaliado, contudo, possuem a desvantagem de não possibilitar a generalização dos resultados para um conjunto amostral maior. Uma investigação extensiva a partir de uma abordagem comparativa, com o devido controle de variáveis, seria de grande interesse, pois permitiria visualizar as melhores soluções de geometria para diferentes contextos.

Os resultados das investigações conduzidas, para todas as categorias do conjunto amostral, retrataram melhorias no desempenho verificadas com a aplicação das metodologias de trabalho propostas. Contudo, estas pesquisas ainda apresentam limitações, sobretudo, relacionadas ao baixo grau de complexidade do modelo avaliado, à simplificação do fluxo de trabalho ou dos dados de entrada, aos processos de validação pouco abrangentes e à sua baixa aplicabilidade em contexto real.

Deste modo, estas pesquisas mostram que os processos de projeto capazes de se transformar continuamente têm se destacado, cada vez mais, dos métodos estáticos dos processos convencionais, permitindo a exploração de novas geometrias a partir de seu desempenho. Contudo, considerando que, para a maioria destes estudos, a investigação tenha sido realizada apenas em ambiente de simulação computacional, conduzir um processo de projeto que aborde a aplicabilidade das soluções ótimas em contexto real é uma área para exploração de pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

ADRIAENSSENS, S. *et al.* Dialectic form finding of passive and adaptive shading enclosures. **Energies**, [s. l.], v. 7, n. 8, p. 5201–5220, 2014a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en7085201>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ADRIAENSSENS, S. *et al.* **Shell Structures for Architecture**. Form finding and optimization. 1. ed. London and New York: Routledge, 2014b.

AGIRBAS, A. Façade form-finding with swarm intelligence. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 99, p. 140–151, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.12.003>. Acesso em: 20 jan. 2022.

AGKATHIDIS, A. **Generative design**: Form-finding techniques in architecture. London: Laurence King Publishing Ltd, 2016.

ALIC, V.; PERSSON, K. Form finding with dynamic relaxation and isogeometric membrane elements. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s. l.], v. 300, p. 734–747, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2015.12.009>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ANTON, I.; TĂNASE, D. Informed geometries. Parametric modelling and energy analysis in early stages of design. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 85, n. November 2015, p. 9–16, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.269>. Acesso em: 20 jan. 2022.

AYOUB, M.; RAGHEB, S. A. Parametric investigation of the solar-thermal performance of tensile membrane roofs in hot-desert climates. **Energy and Buildings**, v. 297, p. 1–22, 2023.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization**: theory, methods and applications. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2003.

BIANCONI, F.; FILIPPUCCI, M.; BUFFI, A. Automated design and modeling for mass-customized housing. A web-based design space catalog for timber structures. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 103, n. January, p. 13–25, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.002>. Acesso em: 20 jan. 2022.

BLOCK, P. *et al.* NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 12, n. March 2016, p. 332–341, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.06.013>. Acesso em: 20 jan. 2022.

BOMFIM, K.; TAVARES, F. Building facade optimization for maximizing the incident solar radiation. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE (eCAADe), 37., 2019, Porto. **Proceedings** [...]. Porto: eCAADe, 2019. p. 171–182.

CHÈRAUD, F. Beyond design freedom. Providing a set-up for material modelisation within Kangaroo Physics. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE (eCAADe), 38., 2020, Berlin. **Proceedings** [...]. Berlin: eCAADe, 2020. p. 459–468.

DE LUCA, F. Solar form finding. Subtractive solar envelope and integrated solar collection computational method for high-rise buildings in urban environments. In: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 37., 2017, Cambridge. **Proceedings** [...]. Cambridge: ACADIA, 2017. p. 212–221.

DE LUCA, F.; DOGAN, T.; SEPÚLVEDA, A. Reverse solar envelope method. A new building form-finding method that can take regulatory frameworks into account. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 123, n. March 2020, p. 1–18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103518>. Acesso em: 20 jan. 2022.

DESCAMPS, B. **Computational design of lightweight structures**. Form finding and optimization. London: ISTE Ltd, 2014.

DIXIT, S.; STEFAŃSKA, A.; MUSIUK, A. Architectural form finding in arboreal supporting structure optimisation. **Ain Shams Engineering Journal**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 2321–2329, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.022>. Acesso em: 20 jan. 2022.

DOURTME, S. et al. Digital plaster: a prototypical design plaster. In: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 32., 2012, San Francisco. **Anais [...]**. San Francisco: ACADIA, 2012. p. 217–230.

DU, T. et al. Gaps and requirements for automatic generation of space layouts with optimised energy performance. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 116, n. June 2019, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103132>. Acesso em: 20 jan. 2022.

EKICI, B. et al. A Methodology for daylight optimisation of high-rise buildings in the dense urban district using overhang length and glazing type variables with surrogate modelling. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1343, n. 1, p. 1-6, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012133>. Acesso em: 20 jan. 2022.

EKICI, B. et al. Performative computational architecture using swarm and evolutionary optimisation: A review. **Building and Environment**, [s. l.], v. 147, n. October 2018, p. 356–371, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.023>. Acesso em: 20 jan. 2022.

EMAMI, N. Untangling parameters: A formalized framework for identifying overlapping design parameters between two disciplines for creating an interdisciplinary parametric model. **Advanced Engineering Informatics**, [s. l.], v. 42, n. June, p. 1-13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100943>. Acesso em: 20 jan. 2022.

_____. Disregarded solution spaces: A proposed approach to draw connections between computationally generated solution spaces and actual built case studies. **International Journal of Architectural Computing**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 273–290, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1478077120969928>. Acesso em: 20 jan. 2022.

EMAMI, N.; GILES, H.; VON BUELOW, P. Structural, daylighting, and energy performance of perforated concrete shell structures. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 117, n. January 2019, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103249>. Acesso em: 20 jan. 2022.

FLOR, J. F. et al. Optical aspects and energy performance of switchable ethylene-tetrafluoroethylene (ETFE) foil cushions. **Applied Energy**, [s. l.], v. 229, n. July, p. 335–351, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.046>. Acesso em: 21 jan. 2022.

GENGNAGEL, C. et al. Shaping hybrids – Form finding of new material systems. **International Journal of Architectural Computing**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 91–103, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/147807711877>. Acesso em: 21 jan. 2022.

GUTIÉRREZ, R. U.; WANNER, A. Innovations in the production of ceramic luminous environments: Where craftsman meets computer. **Informes de la Construcción**, [s. l.], v. 68, n. 544, p. 1-13, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/ic.15.167.m15>. Acesso em: 21 jan. 2022.

HE, Q. *et al.* Predictive models for daylight performance of general floorplans based on CNN and GAN: A proof-of-concept study. **Building and Environment**, [s. l.], v. 206, n. April, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108346>. Acesso em: 21 jan. 2022.

HOSSEINI, S. M. *et al.* A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. **Building and Environment**, [s. l.], v. 153, n. November 2018, p. 186–204, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>. Acesso em: 21 jan. 2022.

HOSSEINI, S. M. *et al.* Bio-inspired interactive kinetic façade: Using dynamic transitory-sensitive area to improve multiple occupants' visual comfort. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 821–837, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.07.004>. Acesso em: 21 jan. 2022.

HU, J. *et al.* Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 131, p. 411–422, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.062>. Acesso em: 21 jan. 2022.

HUANG, A.; LEWIS, S. Nearly minimal how intuition and analysis inform the minimal surface geometries in the pure tension pavilion. *In: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA)*, 34., 2014, Los Angeles. **Proceedings** [...]. Los Angeles: ACADIA, 2014. p. 209–218.

JAVANROODI, K.; NIK, V. M.; MAHDAVINEJAD, M. A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 49, n. February, p. 1-21, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101597>. Acesso em: 21 jan. 2022.

JAYATHISSA, P. *et al.* Performative design environment for kinetic photovoltaic architecture. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 93, n. June, p. 339–347, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.013>. Acesso em: 21 jan. 2022.

KACZYNSKI, M. P.; MCGEE, W.; PIGRAM, D. Robotically fabricated thin-shell vaulting. A method for the integration of multi-axis fabrication processes with algorithmic form-finding techniques. *In: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA)*, 31., 2011, Banff. **Proceedings** [...]. Banff: ACADIA, 2011. p. 114–121.

KAHRAMANOĞLU, B.; ALP, N. Ç. Enhancing visual comfort with Miura-ori-based responsive façade model. **Journal of Building Engineering**, v. 69, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106241>. Acesso em: 21 dez. 2022.

KHIDMAT, R. P. *et al.* Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, n. November 2021, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104241>. Acesso em: 21 dez. 2022.

KHIDMAT, R. P.; FUKUDA, H.; KUSTIANI. Design optimization of hyperboloid wooden house. **Buildings**, [s. l.], p. 1–31, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12020110>. Acesso em: 21 dez. 2022.

KHOSROMANESH, R.; ASEFI, M. Form-finding mechanism derived from plant movement in response to environmental conditions for building envelopes. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 51, n. April, p. 1-13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101782>. Acesso em: 10 fev. 2022.

KONIS, K.; GAMAS, A.; KENSEK, K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support. **Solar Energy**, [s. l.], v. 125, p. 161–179, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.020>. Acesso em: 10 fev. 2022.

KOOHESTANI, K. On the analytical form-finding of tensegrities. **Composite Structures**, [s. l.], v. 166, p. 114–119, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.059>. Acesso em: 10 fev. 2022.

_____. Innovative numerical form-finding of tensegrity structures. **International Journal of Solids and Structures**, [s. l.], v. 206, p. 304-313, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.09.034>. Acesso em: 10 fev. 2022.

LI, S.; LIU, L.; PENG, C. A review of performance-oriented architectural design and optimization in the context of sustainability: Dividends and challenges. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 1-36, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12041427>. Acesso em: 10 fev. 2022.

LI, Q.; ZANELLI, A. A review on fabrication and applications of textile envelope integrated flexible photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 139, n. September 2020, p. 1-17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110678>. Acesso em: 10 fev. 2022.

LOBACCARO, G. *et al.* Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 167, p. 106–123, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.025>. Acesso em: 10 fev. 2022.

MAXWELL, I. *et al.* Fabrication aware form-finding a combined quasi-reciprocal timber and discontinuous post-tensioned concrete structure. *In*: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 34., 2014, Los Angeles. **Proceedings** [...]. Los Angeles: ACADIA, 2014. p. 375–384.

NABONI, R. Form-finding to fabrication of super-thin anisotropic gridshell. *In*: CONGRESO DE LA SOCIEDADE IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGraDi), 20., 2016, Buenos Aires. **Proceedings** [...]. Buenos Aires: SIGraDi, 2016. p. 418–425.

OXMAN, R. Performance-based design: current practices and research issues. **International Journal of Architectural Computing**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 1–17, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/147807708784640090>. Acesso em: 10 fev. 2022.

OXMAN, R. Introduction. In: OXMAN, R. (org.). **The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies**. London: Editorial Offices, 2010, p. 14–23.

POUYANMEHR, M. *et al.* External shading form-finding: simulating daylighting and dynamic view access assessment. **Journal of Building Performance Simulation**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 398–409, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2058089>. Acesso em: 10 out. 2022.

RAMILO, R.; EMBI, M. R. Bin. Critical analysis of key determinants and barriers to digital innovation adoption among architectural organizations. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 431–451, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.005>. Acesso em: 10 fev. 2022.

RYNSKA, E. *et al.* Smart energy solutions as an indispensable multi-criteria input for a coherent urban planning and building design process-two case studies for smart office buildings in warsaw downtown area. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 15, p. 1-24, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13153757>. Acesso em: 10 fev. 2022.

SU, Z.; YAN, W. Creating and improving a closed loop: Design optimization and knowledge discovery in architecture. **International Journal of Architectural Computing**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 123–142, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1260/1478-0771.13.2>. Acesso em: 10 fev. 2022.

SULPIZIO, C. *et al.* Optimal design criteria for form-finding of double-curved surfaces. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 44, n. 2019, p. 28–35, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.201>. Acesso em: 10 fev. 2022.

SUZUKI, S.; KNIPPERS, J. A. N. Topology-driven form-finding. Implementation of an evolving network model for extending design spaces in dynamic relaxation. In: CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER AIDED DESIGN IN ARCHITECTURE (ACADIA), 37., 2017, Mexico City. **Proceedings** [...]. Mexico City: ACADIA, 2017. p. 489–498.

SYMEONIDOU, I. Flexible matter: A real-time shape exploration employing analogue and digital form-finding of tensile structures. **International Journal of Architectural Computing**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 322–332, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1478077116670741>. Acesso em: 10 fev. 2022.

SZENTESI-NEJUR, S.; DE LUCA, F.; NEJUR, A. Integrated Architectural and Environmental Performance-Driven Form-Finding A teaching case study in Montreal. In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE (eCAADe), 39., 2021. **Proceedings** [...]. Novi Sad, Serbia: eCAADe, 2021, p. 105-114.

TORREBLANCA-DÍAZ, D. A. *et al.* Form-finding methodology as strategy for formative research in industrial design education. Experimental techniques for the early creative phases of the product design process. *In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE (eCAADe) e CONGRESO DE LA SOCIEDAD IBEROAMERICANA DE GRÁFICA DIGITAL (SIGraDi)*, 37-23., 2019, Porto. **Proceedings** [...]. Porto: eCAADe-SIGraDi, 2019. p. 45–54.

TURRIN, M. *et al.* Computational design for sport buildings. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 147, p. 878–883, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.285>. Acesso em: 10 fev. 2022.

VAN AMEIJDE, J. *et al.* Data-driven placemaking: Public space canopy design through multi-objective optimisation considering shading, structural and social performance. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 308–323, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.10.007>. Acesso em: 10 out. 2022.

VEENENDAAL, D.; BLOCK, P. An overview and comparison of structural form finding methods for general networks. **International Journal of Solids and Structures**, [s. l.], v. 49, n. 26, p. 3741–3753, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.008>. Acesso em: 10 fev. 2022.

WORTMANN, T.; CICHOCKA, J.; WAIBEL, C. Simulation-based optimization in architecture and building engineering - Results from an international user survey in practice and research. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 259, p. 1-22, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111863>. Acesso em: 10 fev. 2022.

XIA, T. *et al.* Form-finding with robotics. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ASSOCIATION FOR COMPUTER-AIDED ARCHITECTURAL DESIGN RESEARCH IN ASIA (CAADRIA)*, 22., 2017, Suzhou. **Proceedings** [...]. Suzhou: CAADRIA, 2017. p. 893–902.

YAN, X. *et al.* Detail control strategies for topology optimization in architectural design and development. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 340–356, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.11.001>. Acesso em: 10 out. 2022.

YANG, D. *et al.* Numerical form-finding method for large mesh reflectors with elastic rim trusses. **Acta Astronautica**, [s. l.], v. 147, p. 241-250, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.04.007>. Acesso em: 10 fev. 2022.

YAZICI, S. Efficiency in architectural geometry informed by materials. *In: EDUCATION AND RESEARCH IN COMPUTER AIDED ARCHITECTURAL DESIGN IN EUROPE CONFERENCE (eCAADe)*, 32, 2014, New Castle. **Proceedings** [...]. New Castle: eCAADe, 2014. p. 547–554.

YI, Y. K.; MALKAWI, A. M. Site-specific optimal energy form generation based on hierarchical geometry relation. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 26, p. 77–91, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.004>. Acesso em: 10 fev. 2022.

ZANI, A. *et al.* Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 180, p. 1473–1483, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.310>. Acesso em: 10 fev. 2022.

ZBOINSKA, M. A. Hybrid CAD/E platform supporting exploratory architectural design. **CAD Computer Aided Design**, [s. l.], v. 59, p. 64–84, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.08.029>. Acesso em: 10 fev. 2022.

ZHANG, L. *et al.* Analytical form finding of tensegrities using determinant of force-density matrix. **Composite Structures**, [s. l.], v. 189, n. January, p. 87–98, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.054>. Acesso em: 10 fev. 2022.

ZHANG, R. *et al.* Agile and integrated workflow proposal for optimizing energy use, solar and wind energy potential, and structural stability of high-rise buildings in early design decisions. **Energy and Buildings**, v. 300, p. 1-23, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113692>. Acesso em: 10 out. 2023.

ZHENG, H.; YUAN, P. F. A generative architectural and urban design method through artificial neural networks. **Building and Environment**, [s. l.], v. 205, p. 1-16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.1-16>. Acesso em: 10 fev. 2022.

3. CONCEPÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR EXTERNOS FIXOS – UMA REVISÃO

Resumo: A iluminação natural desempenha um papel importante na arquitetura. Entre as diferentes estratégias para se adequar a admissão e distribuição da luz do dia, a implementação de dispositivos de sombreamento pode ser adotada para garantir condições visuais adequadas no interior dos ambientes. Neste cenário, os processos de projeto para concepção e simulação desses elementos de controle solar precisam de uma caracterização mais ampla, viabilizando a inserção de novos indicadores de desempenho. O objetivo desta revisão integrativa de literatura é mapear os processos de projeto para concepção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento para controle da iluminação natural em ambientes internos. Como principais resultados, foram montados dados tabulares de 47 trabalhos publicados, agrupados em quatro conjuntos de abordagens: trabalhos que incorporam o contexto em que o edifício está localizado, análises de fachadas, estudos que integram produção de energia ao dispositivo de sombreamento e aqueles que tratam especificamente da aplicação do elemento de controle solar em um ambiente de análise. Também foram apresentados resultados referentes à identificação de indicadores para avaliação de desempenho luminoso, térmico, energético e da ventilação natural. Além disso, foram elaborados fluxos de trabalho para avaliação dos elementos de controle solar.

Palavras-chave: Iluminação natural. Processo de projeto computacional. Elemento de controle solar. Desempenho da luz do dia.

3.1. INTRODUÇÃO

A função básica da iluminação é garantir condições visuais adequadas ao desempenho das atividades. Assim, o uso adequado da luz do dia nos edifícios demanda condições que proporcionem um equilíbrio entre a carga térmica, o controle do ofuscamento e ajustes para se adequar às diversas condições climáticas ao longo do ano.

Em pesquisas direcionadas à iluminação natural, recorrentemente sobressaem avaliações de critérios relacionados ao desempenho e conforto, tanto em abordagens qualitativas, quanto quantitativas. Trabalhos desenvolvidos a partir de abordagens qualitativas usualmente se baseiam na percepção do usuário para estabelecer as relações entre iluminação, conforto e bem-estar e a influência da arquitetura no conforto percebido. Pesquisas com foco em iluminação, desenvolvidas a partir de abordagens quantitativas, empregam critérios e índices estabelecidos em normas.

A admissão e distribuição da luz natural no interior das edificações sempre foi objeto da prática arquitetônica, embora não tenha sido explicitamente estipulada pela política e normas formais até o século XX (Bournas, 2020).

No caso brasileiro, o desempenho luminoso é objeto de três normas: NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), NBR 15215 (ABNT, 2024a) e a NBR 15575 (ABNT, 2024b). Na primeira, são estabelecidos níveis de iluminância a serem mantidos no plano de trabalho, conforme a atividade a ser desenvolvida. A segunda norma estabelece requisitos e critérios de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais. Na terceira norma, por fim, a luz natural é abordada a partir de procedimentos para cálculo de estimativa de disponibilidade e para determinação da iluminação em ambientes internos.

Para obtenção de melhores índices de conforto térmico e luminoso, podem ser adotadas estratégias arquitetônicas que possibilitam o controle e/ou redirecionamento da incidência da radiação e da luz solar direta. Das abordagens possíveis, um sistema de sombreamento é uma das estratégias bioclimáticas utilizada com recorrência para melhoria do desempenho das envoltórias (Kirimtat *et al.*, 2016).

Como solução passiva, a abertura do elemento de sombreamento atua como um filtro para a incidência da iluminação natural, permitindo apenas o nível de iluminância desejado e direcionando a radiação solar antes que ela atinja a superfície envidraçada e penetre no interior do edifício (Khidmat *et al.*, 2022). Dispositivos de sombreamento também reduzem o custo operacional de sistemas ativos, sobretudo aqueles de aquecimento e resfriamento, proporcionando economia de energia, sem bloqueio completo da luz natural (Kirimtat *et al.*, 2019; Kuhn, 2017).

Recorrentemente, estudos que avaliam elementos de proteção solar indicam que a luz natural nas áreas de trabalho pode ser controlada por meio de elementos fixos externos que bloqueiam a luz para as diversas alturas solares, por sistemas de sombreamento que difundem a luz solar incidente de modo a eliminar o potencial de ofuscamento e através de dispositivos ajustáveis, controlados pelo ocupante (Grondzik; Kwok, 2019).

Em revisões de literatura que investigaram o emprego de elementos de controle solar foram avaliadas sua integração a sistemas fotovoltaicos para aplicação em fachadas envidraçadas (Ibraheem; Farr; Piroozfar, 2017; Zhang *et al.*, 2018) e investigadas as tendências e limitações dos sistemas de proteção solar (mecanismos, funções e materiais) para regiões tropicais (Al-Masrani *et al.*, 2018). Em outro trabalho, estes elementos foram abordados como exemplos de aplicação, como na análise do método de simulação e otimização de energia do projeto de edifícios passivos (Tian *et al.*, 2018).

Estes trabalhos fornecem uma referência para estudos futuros, mas estão focados em aspectos específicos que não envolvem o processo de projeto de forma mais abrangente.

Deste modo, concentramo-nos no atendimento das seguintes questões: Como se configuram os fluxos de trabalho para obtenção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento, a partir de processos de projeto computacionais? Quais são as metodologias de avaliação e indicadores de desempenho mais recentes? Quais são as novas perspectivas nas simulações de desempenho de elementos de controle solar? Neste sentido, este estudo aborda os processos de projeto e também apresenta diferentes enfoques na categorização dos elementos de controle solar.

Assim, esta revisão integrativa de literatura tem por objetivo mapear os processos de projeto para concepção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento para controle da iluminação natural em ambientes internos.

3.1.1. Ferramentas computacionais no processo de projeto

A simulação de desempenho de edifícios tem sido uma área de investigação ativa desde a década de 1960, período em que os trabalhos se concentraram em cálculos de carga e avaliação do consumo de energia (Kusuda, 1999; Spitler, 2006). Se nos primórdios da simulação a agenda principal estava focada na modelagem e nos recursos de *software*, nas últimas décadas a discussão concentrou-se na eficácia desta simulação. Deste modo, há uma crescente aceitação de que a modelagem e a simulação têm um papel importante tanto no desenvolvimento de edificações sustentáveis de alto desempenho, quanto na proposição de novos sistemas e componentes do edifício (Hensen; Lamberts, 2019).

A modelagem cria uma representação de um sistema real em um certo nível de abstração e a simulação permite implementar um modelo para prever um futuro comportamento de um sistema real. Portanto, a simulação, como modelo simplificado da realidade, não gera soluções ou respostas diretas, mas seu principal objetivo é aumentar a compreensão sobre o objeto analisado (Hensen; Lamberts, 2019).

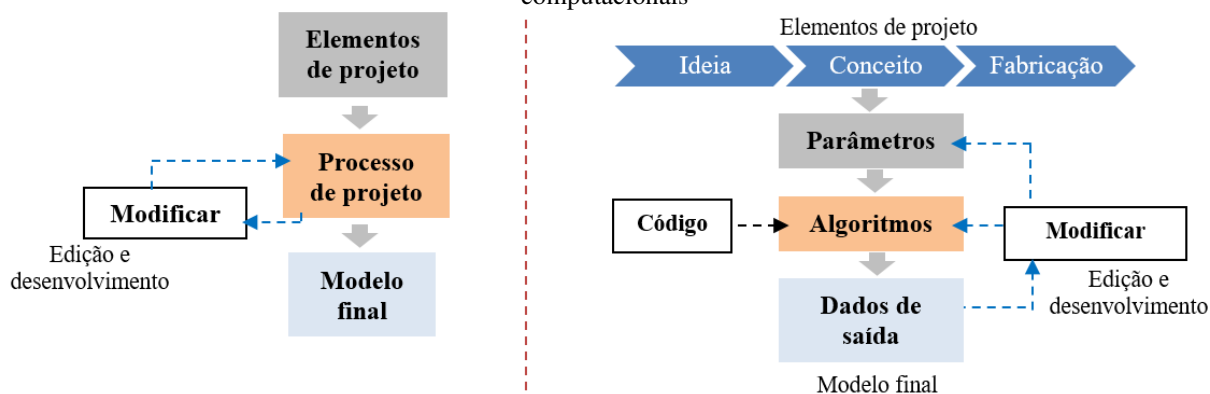
Se inicialmente os processos de projeto ditos convencionais se desenvolviam a partir de um fluxo mais linear de trabalho e com maior dispêndio de tempo, a incorporação de tecnologias digitais permitiu novas relações entre a concepção e o desenvolvimento dos elementos projetados. As abordagens emergentes de processos de projeto baseados em computação diferem significativamente das anteriores, pois fundamentam a representação do processo de projeto em sua lógica computacional em detrimento de seus aspectos geométricos

(Caetano; Leitão, 2020). Isto possibilita que os projetos arquitetônicos tirem vantagens destes métodos, empregando o desempenho para guiar a definição da forma final.

De modo geral, as avaliações de desempenho refletem estes dois cenários. Neste contexto, têm se destacado a modelagem algorítmica para o desenvolvimento de um processo de projeto paramétrico, que permite a expressão de parâmetros e regras que esclarecem a relação entre o objetivo do processo de projeto e sua resposta. Em outras palavras, podemos sintetizá-lo em um processo de projeto baseado no pensamento algorítmico que usa parâmetros e regras para restringi-lo (Caetano; Santos; Leitão, 2020), como apresentado na Figura 1, que sintetiza a ideia geral destes processos.

Para a primeira situação, a alteração de algum parâmetro do modelo inicial implica na repetição de todo o processo. Por outro lado, a partir dos processos de projeto computacionais, qualquer alteração de parâmetros resultará na atualização automática e imediata do modelo.

Figura 1 – Comparação entre processos de projeto convencionais e aqueles auxiliados por ferramentas computacionais



Fonte: A autora.

Tal abordagem traz consigo uma modificação nos processos de projeto, uma vez que admite que os elementos do projeto se relacionem e se modifiquem conjuntamente, além de garantir maior controle sobre a geometria, inclusive, possibilitando uma exploração mais ampla dos aspectos formais.

3.1.2. Elementos de controle solar

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, o elemento de controle é o “dispositivo especialmente projetado para regular a admissão de luz natural, a radiação solar direta e a visão do exterior por um componente de passagem, podendo ser instalado

internamente ou externamente à edificação, podendo ou não ser parte integrante dela” (ABNT NBR 15215:1, 2024a, p. 5).

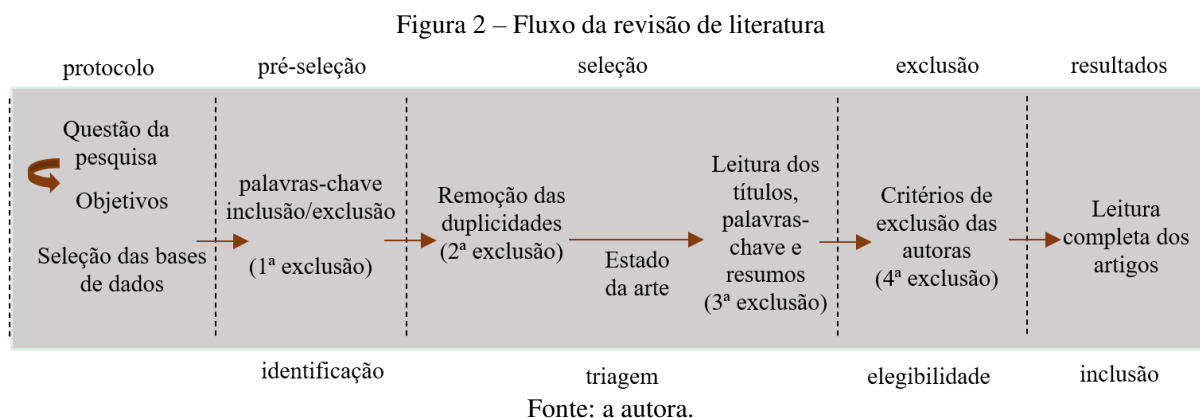
Baker e Steemers (2013) defendem a classificação dos dispositivos de sombreamento baseada no desempenho da disponibilidade de luz natural, em detrimento das características morfológicas destes elementos. Somado a isto, consideram que o desempenho não deve ser avaliado para um único conjunto de medições, mas para um longo período de tempo, considerando tanto as condições de iluminância excessiva, quanto os cenários de baixa iluminância.

Em artigos de revisão sobre elementos de controle solar, destacam-se quatro pesquisas que apresentam propostas de categorização destes dispositivos. Bellia *et al.* (2014) apresenta uma classificação inicial simples, na qual cada categoria principal é dividida em análise de iluminação, análise de energia térmica e requisitos de energia para aquecimento, ventilação e ar condicionado. Baseado neste trabalho, Kirimtat *et al.* (2016) desenvolveram uma proposta de classificação que considera a mobilidade destes dispositivos e combinações entre eles. O trabalho de Kuhn (2017) apresenta parâmetros de projeto para determinação dos sistemas de controle solar, tendo por referência a tecnologia empregada, seu posicionamento e a forma de controle pelo usuário.

Em pesquisa mais recente, Al-Masrani *et al.* (2018) identificaram padrões de elementos de sombreamento por meio de classificação e comparação, com base no conceito do processo de projeto, aprimoramento tecnológico e interesses atuais no campo da arquitetura. Esta proposta reflete a mudança na abordagem de sistemas mais simples e estáticos, para sistemas mais complexos. Os autores especificaram o envolvimento da energia mecânica como fator chave para diferenciar os sistemas de sombreamento, que foram subdivididos conforme abordagem e metodologia de projeto. Os sistemas passivos partem da premissa de que nenhuma fonte de energia mecânica está envolvida. Os sistemas ativos (mecânicos) são dispositivos móveis que requerem energia em sua operação. Por fim, os sistemas de híbridos utilizam a capacidade de deformação de materiais inteligentes (como materiais responsivos ao clima e eletroresponsivos) para produzir movimentos espaciais a partir de princípios da biomimética.

3.2. MÉTODO

Este trabalho é uma revisão integrativa de literatura, cujo fluxo, embasado na *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), segue representado na Figura 2.



A primeira etapa da revisão se orientou a partir da seguinte pergunta de pesquisa: como se configuram os fluxos de trabalho para obtenção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento, com foco na avaliação do desempenho luminoso, térmico e energético destes elementos? Esta pesquisa tem por objetivo investigar os fluxos de trabalho para obtenção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento, a partir de processos de projeto computacionais. Para tanto, foca nas metodologias, métricas e métodos empregados.

Nesta revisão, foram adotadas as fontes bibliográficas *Scopus*, *Science Direct* e biblioteca virtual Periódicos Capes, para uma busca inicial mais ampla, com o termo alvo “elemento de controle solar”. Em seguida, foram categorizadas as palavras-chave de pesquisa em três grupos com base no alvo, nos critérios de trabalho e na escala de estudo, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Lista das palavras-chave e condições de pesquisa

Categoria	Palavras-chave
Alvo	Elemento de controle solar fixo, dispositivo de sombreamento fixo, dispositivo de controle solar fixo, <i>fixed shading device</i> , <i>fixed shade</i>
Critérios de trabalho	Iluminação natural, <i>daylighting</i> , processo de projeto computacional, <i>computational design</i> , processo de projeto paramétrico, <i>parametric design</i>
Escala de estudo	Edifício, <i>building</i> , fachada, envoltória, <i>facade</i>
Termos da pesquisa: “Alvo” AND/E “Método” AND/E “Escala do estudo”	
Fontes bibliográficas: <i>Scopus</i> , <i>Science Direct</i> e Periódicos Capes	
Período da pesquisa: 2017 – outubro/2023	

Fonte: a autora.

Estes grupos distintos de palavras-chave foram combinados em termos de pesquisa usando a estratégia “alvo AND critérios de trabalho AND escala de estudo”. O Quadro 2 sintetiza os resultados obtidos para a pesquisa inicial e para os demais termos e indica os critérios de inclusão e exclusão de trabalhos.

Na etapa de seleção, a identificação dos trabalhos duplicados se deu através do *software Mendeley Reference Manager*. Obteve-se 681 estudos que foram verificados com base em seus títulos e palavras-chave e depois reduzidos a partir de seus resumos. Desta análise resultaram 103 artigos que foram avaliados conforme critérios de exclusão relativos à aplicabilidade e mecanismos de atuação dos dispositivos de sombreamento. Estes trabalhos foram lidos, sendo que 47 foram incluídos no conjunto amostral; destes, quatro foram artigos de revisão, já apresentados na fundamentação teórica.

Quadro 2 - Parâmetros adotados para seleção dos artigos e resultados encontrados, por fonte pesquisada

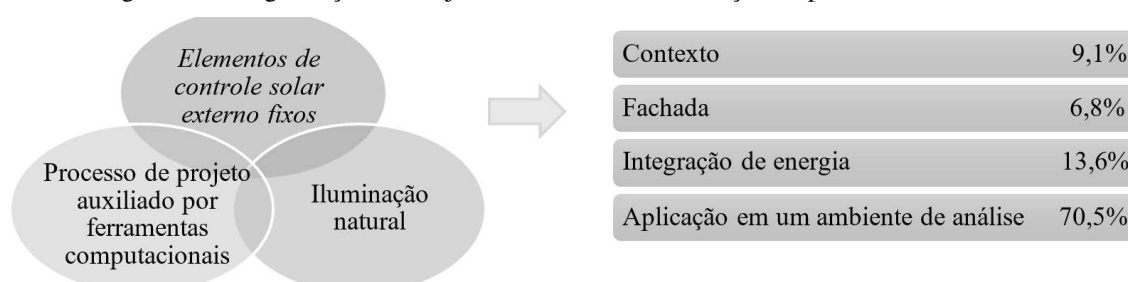
		Scopus	ScienceDirect	Periódicos Capes
Pré-seleção (1ª exclusão)	Modo de busca	Título, resumo e palavra-chave		
	Termo de busca	“ <i>shading device</i> ” OR “ <i>shade*</i> ”		
	Resultados iniciais	473	4005	1262
	(“ <i>fixed shading device</i> ” OR “ <i>fixed shade</i> ”) AND (“ <i>daylighting</i> ”) AND (“ <i>computational design</i> ” OR “ <i>parametric design</i> ”) AND “ <i>building</i> ” OR (“ <i>façade</i> ”)	11	663	177
	Resultados elegidos	11	663	177
Seleção	Remoção das duplicidades (2ª exclusão)	Manual e <i>Software Mendeley Reference Manager</i>		
		681		
	Verificação de títulos, palavras-chave e resumos (3ª exclusão)	Manual		
Exclusão	Elegibilidade (4ª exclusão)	Critérios: análises de desempenho relacionadas a outros componentes da edificação, análises em que o dispositivo de sombreamento não é aplicado em um edifício, trabalhos com foco na avaliação de dispositivos automatizados ou de dispositivos internos		
		68		
Resultado	Leitura completa dos artigos	Critério de inclusão: trabalhos que investigam o desempenho da luz natural, térmico e energético de elementos de controle solar externos fixos, instalados em envoltórias do edifício		
	Resultado final	47 – 4 artigos de revisão e 43 artigos de análise de componentes		

Fonte: a autora.

3.3. RESULTADOS: visão geral das abordagens

Nas subseções a seguir são apresentados alguns recortes de avaliação dos 43 artigos verificados na literatura, para os quais são apontados os métodos, ferramentas e parâmetros aplicados. Estes trabalhos analisam, a partir de processos de projeto computacionais, o desempenho de elementos de controle solar externos fixos propostos para ambientes naturalmente iluminados. Neste contexto, os resultados foram separados em quatro conjuntos de abordagens, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Categorização do conjunto amostral, com indicação do percentual de trabalhos



Fonte: A autora.

No primeiro, a avaliação do desempenho do dispositivo de sombreamento incorpora, na modelagem e simulação computacionais, o contexto em que o edifício está localizado. No segundo enfoque, a análise engloba as fachadas. Na sequência são apresentados estudos que integram produção de energia ao dispositivo de sombreamento. Por fim, a última abordagem trata especificamente da aplicação do elemento de controle solar em um ambiente de análise.

3.3.1. Análises de desempenho que consideram o contexto

Estes estudos incorporam a vizinhança da edificação avaliada no modelo computacional, destacando a interferência do entorno nos resultados de simulação obtidos. Zani *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de sombreamento de concreto de alto desempenho. Sepúlveda *et al.* (2020) investigaram níveis de superaquecimento e o efeito da ventilação natural em edifícios residenciais. De Luca, Sepúlveda e Varjas (2022) investigaram o potencial do dispositivo de sombreamento para criar condições interiores visualmente confortáveis e reduzir a demanda energética em salas de aula. Wang *et al.* (2022) focaram em um método de otimização e nos efeitos de um fluxo de processo de projeto baseado em desempenho. Neste trabalho foram incorporados tanto o contexto do edifício, em uma análise conduzido para critérios luminoso, térmico e energético, quanto a avaliação do desempenho da luz do dia dirigida a suas envoltórias.

3.3.2. Análises de desempenho de fachadas com dispositivos para controle solar

Esta categoria engloba os estudos que avaliam o impacto do elemento de controle solar no desempenho das envoltórias. Diferentemente dos demais trabalhos, que analisam o desempenho do dispositivo de sombreamento aplicado a uma abertura na fachada, Liu *et al.* (2019) investigaram o potencial de poupança de energia a partir da adição destes elementos de proteção em fachadas opacas. Alsharif *et al.* (2023), por sua vez, conduziram uma abordagem de otimização multiobjetivo, por meio de modelagem *Machine Learning*, para testar o desempenho da configuração de dispositivos de sombreamento amorfos quanto aos aspectos luminoso, térmico e energético.

3.3.3. Estudos que abordam integração de sistemas de geração de energia

A integração fotovoltaica em sistemas de sombreamento permite alcançar a conversão direta da energia solar, bem como o controle da disponibilidade de luz natural e o gerenciamento passivo do ganho de calor (Taveres-Cachat *et al.*, 2017). Estes estudos, além da avaliação do desempenho da luz do dia, focaram na quantificação da insolação recebida pelos painéis fotovoltaicos (Asfour, 2018), na demanda de energia (Taveres-Cachat *et al.*, 2017; Taveres-Cachat; Goia, 2021), no conforto adaptativo e temperatura externa (Skandalos; Karamanis, 2021). Este último, contudo, não está direcionado apenas ao dispositivo de sombreamento, mas o avalia como uma das alternativas para instalação de células solares.

Taveres-Cachat *et al.* (2019) desenvolveram uma metodologia de projeto baseada em otimização multiobjetivo para avaliar usos concorrentes de energia solar e as ferramentas de simulação existentes. Por fim, Gao, Yang e Wang (2022) propuseram um método integrado de avaliação, a partir de um algoritmo multiobjetivo e da otimização de desempenho do elemento de controle solar.

3.3.4. Avaliação de desempenho em um ambiente de análise

Cerca de 72% dos trabalhos avaliados têm por foco a avaliação de desempenho aplicada a um ambiente de análise, para situações que consideram um modelo sem obstrução e variações de elementos de controle solar instalados. As abordagens empregadas nestes estudos, juntamente com as demais, seguem sintetizadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Resumo das principais configurações e metodologias dos estudos elencados

	Referências	Metodologias e ferramentas	Parâmetros
CONTEXTO	Zani <i>et al.</i> (2017); De Luca, Sepúlveda e Varjas (2022)	<i>Desempenhos da luz do dia e energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: EP; R/GH. Otimização: Octopus; Opossum; RBFMOpt. Validação: Medições em contexto real (RMSE; RMSE _{rel})	Altura do peitoril da janela; ângulo de inclinação das aletas e das aberturas; dimensões e ângulos de incisão das aberturas; fator de abertura; profundidade das aletas e distância entre elas; profundidade dos elementos planos
	Sepúlveda <i>et al.</i> (2020)	<i>Desempenhos da luz do dia e da ventilação natural</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: EP; R/GH	Dimensões do dispositivo de sombreamento; orientação, largura e profundidade da sala; PAF
	Wang <i>et al.</i> (2022)	<i>Desempenhos da luz do dia, térmico e energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: R/GH. Otimização: Octopus	Dimensões, ângulo de inclinação e quantidade de aletas; transmitância do material
FACHADA	Liu <i>et al.</i> (2019)	<i>Desempenho energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: DeB; EP	Comprimento, quantidade e ângulo de inclinação dos painéis
	Wang <i>et al.</i> (2022)	<i>Desempenho da luz do dia</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: R/GH. Otimização: Octopus	Dimensões, ângulo de inclinação e quantidade de aletas; transmitância do material
	Alsharif <i>et al.</i> (2023)	<i>Desempenhos térmico e energético</i> Metodologia: ML; SiP. Ferramentas: DeB; jEPlus. Otimização: MOMRFO. Validação: MAPE; OOB; RMSE; SI	Dimensões, ângulo de inclinação e quantidade de aletas; transmitância do material
INTEGRAÇÃO DE ENERGIA	Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2017); Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2019); Taveres-Cachat e Goia (2021); Gao, Yang e Wang (2022)	<i>Desempenhos da luz do dia e energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: IDA ice; R/GH. Otimização: Galapagos; Octopus. Validação: Medições em contexto real; Estudo comparativo entre simulações	Comprimento, espessura, número e ângulo de inclinação das aletas; distância entre aletas
	Asfour (2018); Skandalos e Karamanis (2021)	<i>Desempenho da luz do dia, térmico e energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: DeB; EcA; EP; TRNSYS. Validação: Comparação com modelos matemáticos; (CV RMSE); Medições em contexto real	Orientação do dispositivo de sombreamento e ângulo de inclinação
ECS	Lee, Han e Lee (2017); Kwon e Lee (2018); Gutiérrez <i>et al.</i> (2019); Kheiri (2019); Arbab, Rahbar e Arbab (2021); Khidmat <i>et al.</i> (2022); Wen <i>et al.</i> (2023)	<i>Desempenho da luz do dia.</i> Metodologia: ML; RNA SiP. Ferramentas: EcA; Daysim; Daysim; D/GH; R/GH. Otimização: Galapagos; MATLAB; Octopus; Wallacei; NSGA-II. Validação: Medições em contexto real e em escala reduzida	Ângulo de inclinação, dimensões, projeção e quantidade de aletas; dimensões das aberturas; dimensões da geometria do painel perfurado proposto; quantidade de elementos curvos e seu raio
	Ghosh e Neogi (2018); Koç e Kalfa (2021); Qiu <i>et al.</i> (2021)	<i>Desempenho energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: DeB; EP; jEPlus. Validação: Comparação entre simulações	Direção, profundidade e ângulo de inclinação do dispositivo de sombreamento; PAF; posicionamento das aberturas; tipo de envidraçamento

Quadro 3 – Resumo das principais configurações e metodologias dos estudos elencados (continuação)

	Referências	Metodologias e ferramentas	Parâmetros
ECS	Manzan e Clarich (2017); Vera <i>et al.</i> (2017); Xie <i>et al.</i> (2017); Al Touma e Ouahrani (2018a); De Luca, Voll e Thalfeldt (2018); Ouahrani e Al Touma (2018); Kirmat <i>et al.</i> (2019); Settino <i>et al.</i> (2020); Bazazzadeh <i>et al.</i> (2021); Wang, Yang e Wang (2022); Rafati, Hazbei e Eicker (2023); Nazari <i>et al.</i> (2023); Kangazian e Razavi (2023); Nicoletti, Kaliakatsos e Parise (2023)	<i>Desempenhos da luz do dia e energético</i> Metodologia: RSM; SiP. Ferramentas: DeB; DEx; EP; IDA ICE; mFR: modeFrontier; RD; R/GH; SkUP. Otimização: GenOpt; JoGA-DE; NSGA-II; Octopus; PSO-HJ; Wallacei. Validação: Comparação entre simulações (RMSE; MAE; MBE); Medições em contexto real; Modelo em escala reduzida; Calibri; DEx; RMBE; MAE	Ângulo de inclinação, largura e espaçamento das aletas; disposição dos furos do dispositivo de sombreamento; distância do piso; distância entre a borda da aleta e o peitoril da janela; percentual de perfurações; profundidade e contiguidade com a fachada; proporção do painel perfurado para a janela; propriedades do material
	Al Touma e Ouahrani (2018b); Cartana, Pereira e Mayer (2018)	<i>Desempenhos da luz do dia e térmico</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: D/GH; EP; R/GH. Validação: RMBE; MAE; E-Rd	Espessura, inclinação e profundidade das aletas
	Sadek e Mahrous (2018); Sghiori <i>et al.</i> (2018)	<i>Desempenhos térmico e energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: EP; SkUP; TRNSYS. Otimização: NSGA-II	Variações nas tecnologias de envidraçamento adaptativo
	Elouadjeri, Boussoualim e Haddou (2021); Heidari, Taghipour e Yarmahmoodi (2021); Lakhdari, Sriti e Painter (2021)	<i>Desempenhos da luz do dia, térmico e energético</i> Metodologia: SiP. Ferramentas: TRNSYS, RD; Daysim; EcA. Validação: Medições em contexto real (MBE; RMSE)	Distância entre as aletas; quantidade, profundidade e ângulo de inclinação das aletas

Legenda. METODOLOGIA – CFD: Dinâmica dos Fluidos Computacional; ML: *Machine learning*; PSO/HJ: Enxame de Partículas/Hooke Jeeves; Quest: Questionário; RNA: Rede neural artificial; RSM: Modelos de superfície de resposta adaptativos; SiP: Simulação paramétrica. FERRAMENTAS – DeB: DesignBuilder; DEx: Design Explores; D/GH: Diva-for-Grasshopper; EcA: Ecotect Analysis; EP: EnergyPlus; ESP-r: *Environmental Systems Performance – Research*; mFR: modeFrontier; RD: Radiance; R/GH: Rhinoceros/Grasshopper; SkUP: SketchUp. PARÂMETROS – PAF: Percentual de abertura na fachada. OTIMIZAÇÃO – MOMRFO: *Multi-objective Manta Ray Foraging Optimizer*; RBFMOpt: Otimização multiobjetivo de base radial. VALIDAÇÃO – E-Rd: Experimento com protótipo em escala reduzida; MAE: Erro médio absoluto; MBE: Erro médio absoluto; MAPE: Erro percentual médio absoluto; OOB: Erro *Out-of-bag*; RMBE: Erro médio relativo de polarização; RMSE: Raiz do erro quadrático médio; SI: Índice de dispersão.

Fonte: A autora.

Pesquisas com foco no desempenho da luz do dia exploraram o impacto da variação da geometria dos dispositivos de sombreamento nos resultados encontrados e as relações relativas entre as métricas avaliadas (Lee; Han; Lee, 2017). Gutiérrez *et al.* (2019) investigaram o potencial da utilização da cerâmica quando usada na tecnologia de persianas defletoras de luz. Propostas híbridas para o processo de otimização foram apresentadas por Kheiri (2019) e Kwon e Lee (2018) sugeriram novo método de projeto de iluminação natural combinando abordagem passiva e simulações. Arbab, Rahbar e Arbab (2021) trouxeram métodos de avaliação integrando modelos *Machine Learning* e Rede Neural Artificial (RNA). Khidmat *et al.* (2022) avaliaram o emprego do metal expandido como dispositivo de sombreamento. Além destes,

Wen *et al.* (2023) desenvolveram um método comparativo para avaliar o desempenho de diferentes estratégias de sombreamento, a partir de um indicador que relaciona a satisfação subjetiva do usuário com o nível de iluminância medido.

Artigos destinados à verificação do desempenho energético, centraram-se no efeito de fatores geométricos no consumo de energia de aquecimento, resfriamento e iluminação artificial (Ghosh; Neogi, 2018; Koç; Kalfa, 2021) e no desenvolvimento de um método de análise fatorial para integração de técnicas de mineração de dados e simulação (Qiu *et al.*, 2021).

Alguns trabalhos, além do desempenho luminoso, abordaram o desempenho energético, a partir da relação entre as configurações do elemento de controle solar, de sua inserção na fachada e da demanda de energia verificada (Vera *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2017; Al Touma; Ouahrani, 2018a; De Luca; Voll; Thalfeldt, 2018; Ouahrani; Al Touma, 2018; Kirimtat *et al.*, 2019; Settino *et al.*, 2020; Bazazzedh *et al.*, 2021; Wang; Yang; Wang, 2022; Rafati; Hazbei; Eicker, 2023; Nazari *et al.*, 2023). Em Manzan e Clarich (2017) e Kangazian e Razavi (2023), os autores integraram análises de sistemas de sombreamento com as características do envidraçamento. E Nicoletti, Kaliakatsos e Parise (2023) desenvolveram uma RNA para automatização da gestão de persianas.

Em outras conformações de estudos, o desempenho da luz do dia é avaliado conjuntamente com o desempenho térmico. Al Touma e Ouahrani (2018b) investigaram o impacto das propriedades ópticas de sombreamento nas temperaturas de superfícies interna e externa. Cartana, Pereira e Mayer (2018) analisaram o desempenho de elementos de controle solar com formas complexas.

Pesquisas que analisaram os desempenhos térmico e energético focaram em abordagens para integração de dispositivos inteligentes de envidraçamento aos elementos de controle solar (Sadek; Mahrous, 2018) e em metodologias que combinam algoritmo genético a simulações de energia (Sghiouri *et al.*, 2018). Por fim, alguns trabalhos trouxeram uma abordagem mais ampla na investigação do efeito da geometria dos dispositivos de sombreamento, com avaliação do desempenho da luz natural e dos desempenhos térmico e energético (Elouadjeri; Boussoulam; Haddou, 2021; Heidari; Taghipour; Yarmahmoodi, 2021; Lakhdari; Sriti; Painter, 2021).

Os indicadores empregados na análise destas pesquisas foram categorizados em quatro grupos, referentes ao desempenho da luz do dia, ao desempenho da ventilação natural, ao desempenho térmico e ao desempenho energético.

Indicadores para avaliação do desempenho da iluminação natural

Nas duas últimas décadas ocorreram avanços nas pesquisas relacionadas à iluminação natural, que resultaram no desenvolvimento de diversos indicadores para analisar o desempenho das edificações. Como apontado por Ayoub (2019), muitas abordagens foram propostas, como modelos físicos executados em escala reduzida, fórmulas analíticas, simulação computacional e *Machine Learning*.

Na avaliação da luz do dia, os métodos de cálculo podem ser categorizados em modelagem de luz natural estática e dinâmica. Como método estático, por considerar apenas uma condição específica de céu por simulação, têm-se o indicador Fator de luz diurna (DF)². Para as avaliações dinâmicas, os principais indicadores empregados são Autonomia da luz do dia (DA), Autonomia da luz do dia espacial (sDA), Autonomia contínua da luz do dia (cDA), Autonomia máxima da luz do dia (DAmáx), Autonomia média da luz do dia (avDA), Iluminância útil da luz do dia (UDI), Mapa temporal de iluminância, Exposição anual à luz solar (ASE) e Exposição anual à luz (ALE) (Zhou; Leng, 2023).

Além destes, nas pesquisas avaliadas, foram utilizados outros indicadores como Porcentagem de saturação da luz natural (DSP), Índice de luminância do quadro negro e da mesa (LRBD), Índice de uniformidade da iluminância (URI); Potencial de radiação, Valor anual de radiação solar por unidade de área de janela (SRVW) e Autonomia espacial de voto à luz do dia (sDVA).

O ofuscamento trata da percepção visual produzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão, que pode ocorrer tanto como um ofuscamento desconfortável quanto como um ofuscamento inabilitador (ABNT, 2013). Estudos que avaliaram as complexidades do brilho relacionam, sobretudo, respostas subjetivas a medidas de condições luminosas, considerando diferentes variáveis que afetam o ofuscamento percebido (AYOUB, 2019). Os índices de análise incluem Índice britânico de ofuscamento (BGI), Índice de ofuscamento CIE (CGI), Índice de ofuscamento da luz do dia (DGI), Probabilidade de conforto visual (VCP),

² Na literatura acadêmica se observa a utilização da métrica para avaliar a qualidade da luz do dia fornecida a um ponto determinado, *Point Daylight Factor* – PDF ou DF_p. Foram verificadas, ainda, outras duas abordagens: *Average Daylight Factor* – ADF ou DF_{ave} e avaliações direcionadas a superfícies verticais, *Vertical Daylight Factor* – VDF.

Classificação unificada de ofuscamento CIE (UGR), Probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP) e indicador Autonomia espacial de ofuscamento (sGA), como exemplo de medidas que quantificam de maneira geral o ofuscamento pelo tamanho, posição e luminância da fonte luminosa, em comparação com a luminância média do ambiente.

Segundo a norma europeia EN 17037:2018 (CEN-CENELEC, 2018) a vista externa proporciona conexão visual com o entorno para fornecer informações sobre o ambiente local, as mudanças climáticas e a hora do dia, o que pode aliviar o cansaço associado a longos períodos de permanência em ambientes fechados. Em sua análise, considera-se que a visualização compreende três camadas distintas: uma camada de céu, uma camada de paisagem (edifícios, natureza e/ou horizonte) e uma camada de solo. Além deste indicador, foi verificado, ainda, o emprego da Satisfação com a visão da janela.

Indicadores para avaliação do desempenho da ventilação natural

Com o objetivo de medir o fluxo de ar e estimar a eficiência da ventilação natural, as taxas de fluxo de ar volumétrico e a velocidade do ar são os índices mais utilizados (Zhou e Leng, 2023).

Indicadores de desempenho térmico

Diversos indicadores estão disponíveis para avaliação do desempenho térmico interno, contudo, aqueles relacionados à temperatura são os mais utilizados, o que inclui a temperatura interna, a temperatura radiante e a temperatura da superfície (para avaliação de fachadas). Somam-se a eles os métodos Conforto térmico adaptativo (ATC), Horas de desconforto térmico (DH), Disponibilidade de conforto térmico (TCA) e Percentual previsto de insatisfação (PPD) (Zhou e Leng, 2023).

Além disso, para previsão da radiação solar admitida, Cartana, Pereira e Mayer (2018) propuseram um Coeficiente de admissão da radiação solar incidente (CRS) e uma medida comparativa percentual de redução da radiação solar incidente, a partir de simulações para os meses representativos de verão e de inverno, que considera a condição anterior e posterior à instalação de dispositivos de sombreamento.

Indicadores de desempenho energético

Os indicadores de desempenho energético envolvem, usualmente, expressões como carga, demanda, uso/consumo de energia, economia de energia e eletricidade, relacionados a

sistemas de aquecimento, resfriamento e iluminação artificial. Os estudos avaliam estes aspectos a intervalos de tempo determinados. Especificamente, o Fator de carga, Carga anual e Intensidade de uso de energia (EUI) são recorrentemente utilizados no cálculo do consumo de energia. Há, ainda, o indicador de Energia convertida, que analisa quantidade de energia convertida em eletricidade por células fotovoltaicas (Zhou e Leng, 2023).

O Quadro 4 relaciona os indicadores para análise do desempenho de elementos de controle solar e indica o emprego das mesmas nos artigos avaliados.

Quadro 4 - Resumo dos indicadores para avaliação do desempenho do elemento de controle solar

Indicadores	Definição	Referência
Iluminação natural	DF	Razão da iluminância em um ponto interno do edifício e a iluminância em um ponto externo desobstruído do céu nublado padrão CIE
	DA	Porcentagem de horas ocupadas em um ano com que um dado valor limite mínimo de iluminância requerida é alcançado exclusivamente pela iluminação natural
	Mapa temporal de iluminância	Desempenho ao longo do tempo das condições da iluminação, para um determinado ponto no interior do ambiente simulado (Mardaljevic, 2004)
	UDI	Ocorrência anual de iluminâncias no plano de trabalho que pertencem a uma faixa de valores considerada útil (Mardaljevic, 2015)
	cDA	Os valores abaixo do nível requerido para o ambiente são computados como créditos parciais. Demonstra o potencial de economia de energia, caso haja integração com iluminação artificial
	DAmx	Indica a porcentagem das horas ocupadas com níveis excessivos de radiação direta ou de iluminância (Rogers, 2006)
	avDA	Valor médio do DA no plano de análise
	Admissão da luz do dia	Valor da iluminância interna no plano de análise
	LRBD	Estabelece o índice de luminância no quadro negro e na superfície de trabalho
	URI	Estabelece o índice de uniformidade da iluminância
	sDA	Estabelece uma porcentagem de área do espaço que deve apresentar um valor mínimo de iluminância – 300lx, por fração de tempo – ao menos 50% das horas ocupadas (IESNA, 2012)

Quadro 4 - Resumo dos indicadores para avaliação do desempenho do elemento de controle solar (continuação)

Indicadores		Definição	Referência
Iluminação natural	ASE	Avalia o potencial de desconforto visual devido à incidência de radiação solar direta. Porcentagem de área do espaço que excede 1000lx por mais de 250 horas ocupadas do ano (IESNA, 2012)	Vera <i>et al.</i> (2017); Kheiri (2019); Khidmat <i>et al.</i> (2022)
	sDVA	Relaciona a satisfação subjetiva do usuário com o nível de iluminância horizontal medida	Wen <i>et al.</i> (2023)
	Potencial de radiação	Avalia o potencial de radiação solar nas aletas dos dispositivos de sombreamento, para um intervalo de tempo.	Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2017); Asfour (2018)
	DSP	Verifica a radiação solar incidente	Kwon e Lee (2018); Wang <i>et al.</i> (2022)
	SRVW	Estabelece o valor anual de radiação solar por unidade de área de janela	Wang, Yang e Wang (2022)
	DGI	Quantifica o ofuscamento pela luminância da fonte de ofuscamento e seu tamanho, em comparação com a luminância média do ambiente, excluindo a fonte de ofuscamento e posição do observador Definição anterior (Wienold <i>et al.</i> , 2019-).	Al Touma e Ouahrani (2018a); Al Touma e Ouahrani (2018b); Ouahrani e Al Touma (2018); Bazazzadh <i>et al.</i> (2021); Nazari <i>et al.</i> (2023); Nicoletti, Kaliakatsos e Parise (2023)
	DGP ³	Considera o brilho geral no campo visual e os contrastes presentes na imagem simulada, obtidas pelo <i>Point-in-time Glare</i> , que é a simulação realizada para um ponto de vista especificado por uma câmera, em um determinado dia, horário e época do ano. (ABNT, 2023).	Cartana, Pereira e Mayer (2018); Bazazzadh <i>et al.</i> (2021); De Luca, Sepúlveda e Varjas (2022); Khidmat <i>et al.</i> (2022); Wang, Yang e Wang (2022); Nazari <i>et al.</i> (2023)
	sGA	Porcentagem de pontos de teste que atendem à fração mínima definida de ausência de ofuscamento durante o dia em um ano. Relaciona imagens HDR para cálculo do ofuscamento.	Kangazian e Razavi (2023); Wen <i>et al.</i> (2023)
	Vista externa	Proporciona conexão visual com o entorno. Mínimo de 75% da área útil regularmente ocupada tenha vista para o exterior EN 17037 (CEN-CENELEC, 2018) e ABNT NBR 15215-4 (ABNT, 2023).	De Luca, Sepúlveda e Varjas (2022); Khidmat <i>et al.</i> (2022)
Ventilação	Satisfação com a visão da janela	Determina o nível de satisfação do usuário com a visão da janela, em porcentagem	Wang, Yang e Wang (2022)
	Taxas de fluxo de ar volumétrico	Volume de fluido que passa através de uma determinada área de abertura por unidade de tempo.	Sepúlveda <i>et al.</i> (2020)
Térmico	Temperatura interna	Temperatura do ar dentro de um ambiente ou edifício ou em uma superfície interna.	Sadek e Mahrous (2018); Al Touma e Ouahrani (2018b); Elouadjeri, Boussoulaim e Haddou (2021); Heidari, Taghipour e Yarmahmoodi (2021)
	Temperatura externa	Temperatura do ar fora do edifício ou em uma superfície externa.	Al Touma e Ouahrani (2018b); Skandalos e Karamanis (2021)
	Temperatura radiante	Temperatura uniforme de um ambiente imaginário, no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme.	Heidari, Taghipour e Yarmahmoodi (2021); Wang <i>et al.</i> (2022)

³ Os valores de DGP podem também ser obtidos por fórmula matemática.

$$\text{Equação 1: } DGP = 5.87 \times 10^{-5} E_v + 9.18 \times 10^{-5} \log 1 + i L_{s,i} 2 C_{\theta s,i} E_v 1.87 P_i 2$$

Em que, E_v é a iluminância vertical dos olhos, $L_{s,i}$ é a luminância da fonte “i”; $C_{\theta s,i}$ é o ângulo sólido da fonte “i” e P é o índice de posição, uma função de pesagem que varia de acordo com a distância da fonte de ofuscamento do campo de visão (Reinhart, 2019).

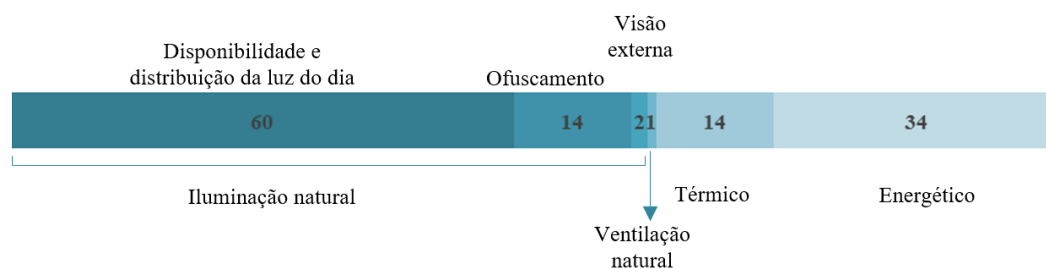
Quadro 4 - Resumo dos indicadores para avaliação do desempenho do elemento de controle solar (continuação)

Indicadores		Definição	Referência
Térmico	ATC	Temperatura operacional interna em relação à temperatura externa.	Sghouri <i>et al.</i> (2018); Lakhdari, Sriti e Painter (2021); Skandalos e Karamanis (2021)
	PPDG	Avalia o conforto térmico dos usuários a partir da porcentagem de insatisfeitos	Nazari <i>et al.</i> (2023)
	DH	Quantidade de horas de desconforto térmico durante um período de tempo especificado	Alsharif <i>et al.</i> (2023)
	CRS	Avalia a admissão da radiação solar incidente	Cartana, Pereira e Mayer (2018)
ENERGÉTICO	Carga	Demanda de energia em um intervalo de tempo determinado.	Manzan e Clarich (2017); Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2017); Vera <i>et al.</i> (2017); De Luca, Voll e Thalfeldt (2018); Ghosh e Neogi (2018); Ouahrani e Al Touma (2018); Sadek e Mahrous (2018); Sghouri <i>et al.</i> (2018); Al Touma e Ouahrani (2018a); Kirimtat <i>et al.</i> (2019); Liu <i>et al.</i> (2019); Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2019); Settino <i>et al.</i> (2020); Elouadjeri, Boussoualim e Haddou (2021); Heidari, Taghipour e Yarmahmoodi (2021); Koç e Kalfa (2021); Qiu <i>et al.</i> (2021); Skandalos e Karamanis (2021); Taveres-Cachat e Goia (2021); De Luca, Sepúlveda e Varjas (2022); Wang <i>et al.</i> (2022); Alsharif <i>et al.</i> (2023); Nicoletti, Kaliakatsos e Parise (2023)
	Energia convertida	Quantidade de energia convertida em eletricidade pelas células fotovoltaicas	Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2017); Taveres-Cachat <i>et al.</i> (2019); Skandalos e Karamanis (2021); Taveres-Cachat e Goia (2021); Gao, Yang e Wang (2022)
	EUI	Relação entre o consumo de energia e a área construída.	Bazazzadh <i>et al.</i> (2021); Lakhdari, Sriti e Painter (2021); Wang, Yang e Wang (2022); Kangazian e Razavi (2023); Nazari <i>et al.</i> (2023); Rafati, Hazbei e Eicker (2023)

Fonte: Futrell, Ozelkan e Brenttrup (2015), Pereira (2017), Cartana (2018), Cavaleri, Cunha e Gonçalves (2018), EN 17037 (2018), Ayoub (2019), Wienold *et al.* (2019-); Yu, Wennersten e Leng (2020), ABNT NBR 15215-4 (ABNT, 2023) e Zhou e Leng (2023).

A ocorrência dessas métricas segue indicada no diagrama da Figura 4, agrupadas conforme respectivas categorias de desempenho, com destaque para avaliações referentes à iluminação natural, sobretudo a indicadores relacionados à disponibilidade e distribuição da luz do dia. Estudos que envolvem desempenho energético também foram expressivos, sobretudo vinculados a análises de desempenho da iluminação natural.

Figura 4 – Número de avaliações de desempenho para cada grupo de análise identificado



Fonte: A autora.

3.4. DISCUSSÃO

Ao longo do tempo, a arquitetura, como uma prática criativa, tem se esforçado para abraçar técnicas, materiais e conceitos inovadores. Isto tornou possível o uso de ferramentas de simulação na modelagem do comportamento dos edifícios, ferramentas de análise para avaliar seu desempenho e ferramentas de otimização, que buscam os melhores valores dos parâmetros de projeto (Caetano; Leitão, 2020).

Neste sentido, há um envolvimento de procedimentos para análise com processos de projeto para entender como o contexto ambiental pode informar a produção arquitetônica. Isto permite a ampliação dos métodos para concepção e manipulação geométrica de diferentes elementos arquitetônicos.

Estes estudos promoveram análises de dispositivos de sombreamento que se fundamentaram, majoritariamente, em métodos que utilizam dados de medições ou obtidos por simulação. A maioria se baseou somente em simulação computacional, contudo, foram identificados outros padrões de pesquisa, conduzidos a partir da aplicação de questionários (Xie *et al.*, 2017; Wen *et al.*, 2023). Verificou-se, ainda, a realização de experimentos e pesquisas associadas a cálculos numéricos ou comparação entre simulações de *softwares* distintos.

As Tabelas 1 e 2 sintetizam as abordagens metodológicas de forma quantitativa.

Tabela 1 – Abordagens metodológicas agrupadas conforme ano de publicação para os 43 trabalhos analisados

Descrição do método	Anos							%
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Simulação computacional	6	10	5	2	9	5	6	100
Ensaio em ambientes reais	-	3	-	-	2	-	-	14,0
Ensaio em modelos físicos executados em escala reduzida	-	1	-	-	-	1	-	4,7

Fonte: A autora.

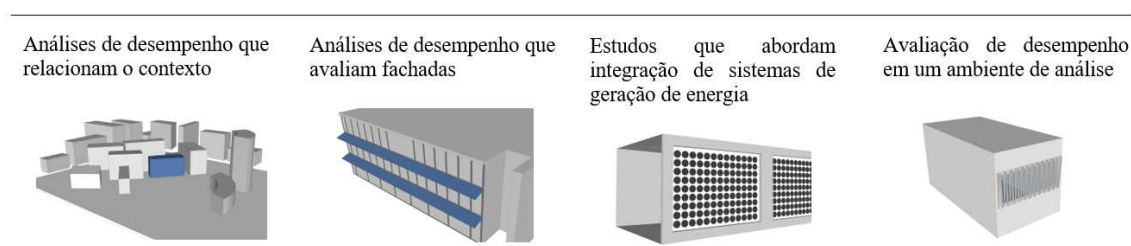
Tabela 2 – Abordagens multimétodos agrupadas conforme ano de publicação dentre os 43 trabalhos analisados

Descrição do método	Anos							%
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Simulação + Medição em ambiente real	-	3	-	-	2	1	-	14,0
Simulação + Medição em modelo reduzido	-	1	-	-	-	1	-	4,7
Simulação + Modelos matemáticos	-	1	-	-	-	-	-	2,3
Simulação + Questionário	1	-	-	-	-	-	1	4,7
Comparação entre simulações	-	1	-	-	-	1	3	11,6
Comparação com normas locais	-	1	-	-	-	-	-	2,3
Comparação entre estudos	-	-	-	-	1	-	-	2,3

Fonte: A autora.

A proposta de modelagem envolve, sobretudo, a geometria do ambiente analisado e do elemento de controle solar. Em alguns casos abrange, também, o volume da edificação, para estudos de desempenho das envoltórias ou o entorno do ambiente avaliado, quando é inserido o contexto destes espaços, como apresentado na Figura 5. Os trabalhos exemplificam a concepção do dispositivo de sombreamento baseada, principalmente, em elementos retangulares opacos, com geometrias de base euclidiana, conformados por aleta única ou conjunto de aletas. Com menor recorrência foram avaliados painéis perfurados, elementos curvos e geometrias amorfas.

Figura 5 – Exemplos da variabilidade do conjunto amostral

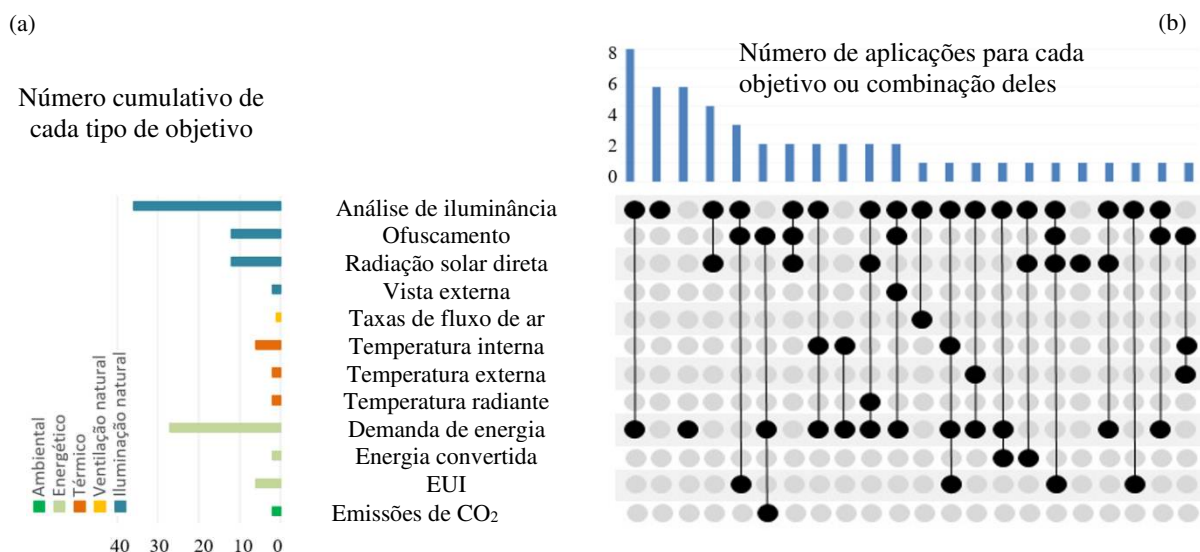


Fonte: A autora.

Isto demonstra que, embora a capacidade computacional aumentada das ferramentas e a diversidade dos métodos de processo de projeto computacionais disponíveis permitam a exploração e avaliação de soluções mais complexas, ainda é incipiente o número de trabalhos em que a arquitetura se beneficia deles.

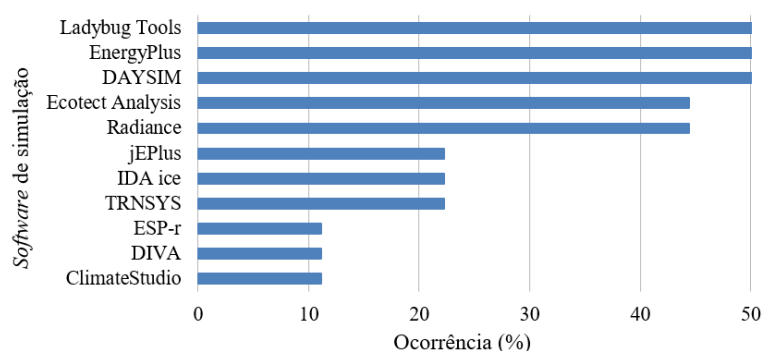
Nestas pesquisas, destacam-se análises de desempenho da luz do dia associada à investigação de desempenho energético (41,9%). As análises da iluminação natural e sua associação aos desempenhos energético e térmico também são muito representativas, com 18,6% e 16,3% de ocorrências. A relação entre os objetivos elencados e as principais métricas estabelecidas segue apresentada na Figura 6(a). Para estas métricas, a combinação entre elas e suas frequências de aplicação nos estudos revisados está relacionada na Figura 6(b). Aproximadamente 84% dos estudos avaliaram o desempenho do elemento de controle solar a partir de métricas relacionadas à iluminação natural ou as associando a outros objetivos e 63% das pesquisas aplicaram métricas relacionadas ao desempenho energético.

Figura 6 – Condição de aplicação dos principais objetivos das pesquisas avaliadas



Fonte: A autora.

Nestes estudos, foram identificadas três ferramentas de modelagem distintas: DesignBuilder, Rhinoceros e SketchUp, sendo um deles, suíte de modelagem parametricamente acoplada: Rhinoceros + Grasshopper, utilizado em 51,2% dos trabalhos. Considerando os *softwares* de simulação de modo autônomo, o Ladybug Tools, incluindo o Honeybee, é o mais empregado; destacando-se, ainda, o uso do EnergyPlus. Outros motores mais utilizados são DAYSIM (7,1%), Ecotect Analysis e Radiance (5,7%) (Figura 7).

Figura 7 – Emprego dos *softwares* de simulação

Fonte: A autora.

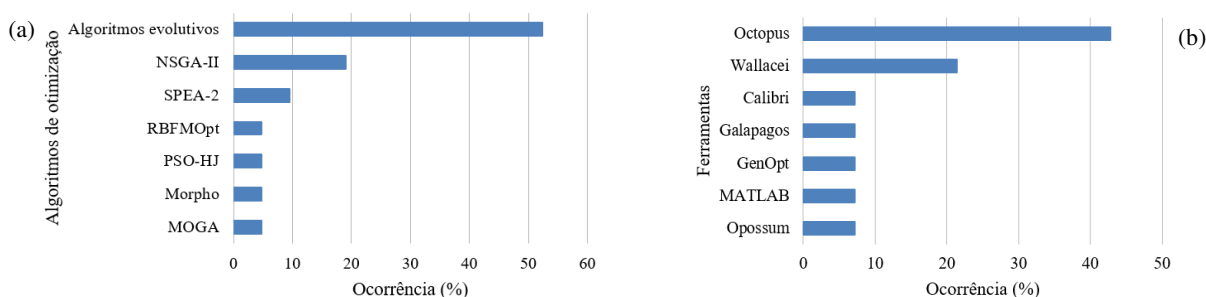
A combinação entre o processo de projeto e a análise tornou a otimização desejável e promoveu o surgimento de ferramentas que simplificaram consideravelmente sua exploração (Caetano; Leitão, 2020). Isto possibilitou a condução de pesquisas cujas abordagens de processo de projeto buscam soluções com bom desempenho em relação a diferentes critérios.

Processos de otimização foram conduzidos em 51,2% dos estudos, com o objetivo de maximizar o desempenho do dispositivo de sombreamento analisado. Destacam-se otimizações multiobjetivo, sendo que os parâmetros variáveis mais recorrentes, quanto ao elemento de controle solar, dizem respeito à sua geometria (largura, comprimento, altura, ângulo de inclinação, distância entre aletas, percentual de perfuração, etc.), à geometria das aberturas (altura da janela, peitoril da janela e proporção dispositivo de controle x janela) e à orientação do edifício.

Para estas otimizações, algoritmos evolutivos são os mais populares, com maior incidência de uso da ferramenta Octopus (42,9%), que contém os algoritmos SPEA-2 e HypE, como apresentado na Figura 8(a). Como algoritmos baseados em população, os algoritmos evolutivos são adequados para resolver problemas de otimização multiobjetivo. Eles podem ser projetados para conjuntos aproximados de soluções ótimas de Pareto, como os casos do NSGA-II e SPEA-2. O NSGA-II realiza categorizações individuais com base na sua classificação de não dominação e distância de aglomeração, com eficiência equivalente ou superior à da maioria dos algoritmos semelhantes. O SPEA-2 adota dominadores baseados nos estimadores de força e densidade, sendo uma boa opção para alcançar melhores distribuições de soluções, contudo requer custos computacionais relativamente grandes (Zhang *et al.*, 2024), o que pode justificar a maior ocorrência de estudos que empregam NSGA-II.

Além dos algoritmos evolutivos, o algoritmo baseado em população PSO-HJ e algoritmo relacionado ao aprendizado de máquina RBFMOpt foram aplicados nestes estudos. Como representado na Figura 8(b), ferramentas de otimização mais utilizadas incluem Galapagos (otimização de objetivo único), Octopus, Wallacei, Calibri, MATLAB e Opossum (empregados em otimizações multiobjetivo).

Figura 8 – Frequência de aplicação de algoritmos e ferramentas de otimização entre os estudos revisados



Fonte: A autora.

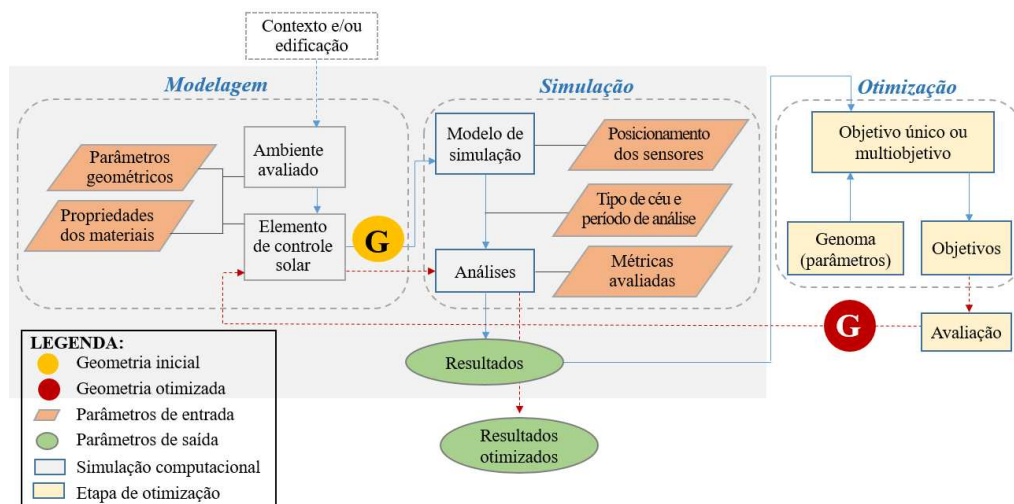
Na literatura avaliada, 16 pesquisas (37,2%) apresentam etapa de validação. Este processo ocorre, majoritariamente, a partir da comparação dos resultados extraídos de

simulações computacionais e os dados monitorados por meio de medições de campo, sobretudo aquelas realizadas em contexto real. Há, também, ocorrências expressivas de validação a partir da comparação entre os indicadores obtidos em diferentes ferramentas de simulação.

Como abordagem quantitativa, processos de projeto computacionais possibilitam a melhoria dos fluxos de trabalho típicos de processo de projeto, permitindo a exploração de diferentes linhas de trabalho. Estes estudos promoveram análises sobre questões práticas, ainda que predominantemente no campo da simulação. De certo modo, exemplificam o impacto de ferramentas e técnicas e a aplicabilidade da pesquisa científica nas preocupações sociais, como problemas ambientais e as necessidades dos usuários.

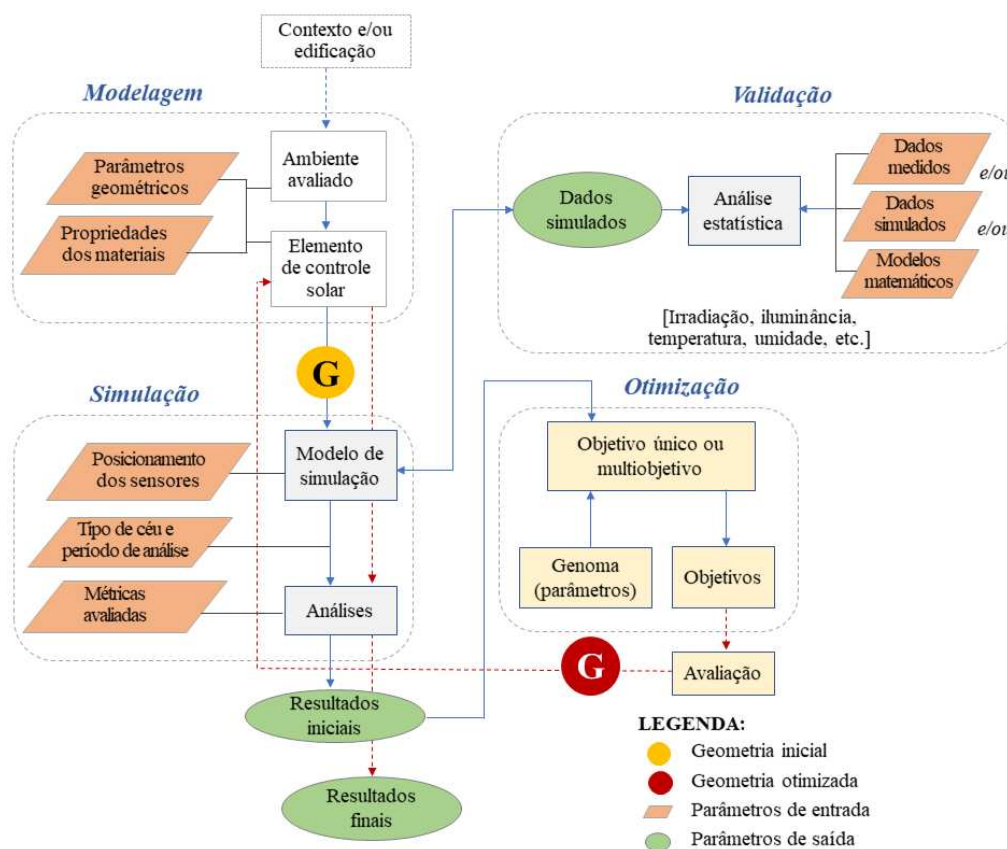
A partir dos métodos de processo de projeto computacional empregados puderam combinar o processo de concepção com a busca por uma solução de melhor desempenho. Sintetizando as informações extraídas destes artigos, estes processos contemplam um fluxo de trabalho que envolve a modelagem e simulação de desempenho (métodos mais simplificados), muitas vezes associadas a otimização da geometria. Em alguns casos, o fluxo de trabalho incorpora a validação do modelo ou processo propostos. Os diagramas das Figuras 9 e 10 sintetizam a ideia central dos processos de projeto verificados nestas avaliações.

Figura 9 – Diagrama de fluxo: método simplificado



Fonte: A autora.

Figura 10 – Diagrama de fluxo: método expandido



Fonte: A autora.

3.5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma revisão das investigações recentes sobre a concepção de elementos de controle solar externos fixos, apontando metodologias, métricas e ferramentas de pesquisa para modelagem, simulação, otimização da geometria analisada e validação do modelo, com foco em pesquisas sobre iluminação natural.

Esta abordagem se aplicou à análise de estudos conduzidos a partir de processos de projeto computacionais, ou seja, que envolvem o uso de computação para desenvolver processos de projeto. Seu uso na arquitetura propiciou uma gama mais ampla de possibilidades, novos métodos e maior consciência e controle sobre a concepção do edifício ou ambiente avaliado. Contudo, embora a capacidade computacional aumentada das ferramentas e a diversidade dos métodos de processo de projeto computacionais disponíveis permitam a exploração e avaliação de soluções mais complexas, ainda é incipiente o número de trabalhos em que a arquitetura se beneficia deles.

A revisão evidenciou as principais abordagens empregadas, categorizando a condução das análises de desempenho a partir do contexto da edificação, de avaliações direcionadas a um componente ou ambiente do edifício e aquelas que incorporam a integração de energia ao componente avaliado. Como conclusão central, destaca-se que a aplicação de processos de projeto computacionais para análise de dispositivos de sombreamento ocorre, sobretudo, a partir de dois modelos de fluxo de trabalho. Um método simplificado - que abrange a modelagem e a simulação de desempenho, expansível para incorporar o processo de otimização da geometria e um método amplo - que traz a validação do modelo ou processo propostos.

Destaca-se, também, que estes trabalhos refletem o predomínio de análises de elementos de controle solar cuja forma é concebida e otimizada apenas em ambiente de modelagem e simulação computacionais. O que pode ser explicado pela necessidade de mudanças significativas que o processo de projeto computacional acarreta em termos de concepção, representação e fabricação destes dispositivos.

Alguns apontamentos destes estudos seguem listados:

- Uma análise geral permite inferir que a avaliação do desempenho da luz do dia está, preferencialmente, associada à avaliação de desempenho energético (41,9%). Neste cenário, destacam-se indicadores referentes à disponibilidade e distribuição da luz natural e a cargas (demanda de energia para aquecimento, resfriamento e iluminação artificial). Adicionalmente, ainda que pouco expressivo nos trabalhos avaliados (4,6% dos casos), destaca-se o indicador “vista externa” como uma das métricas mais atuais.
- A concepção do dispositivo de sombreamento é baseada, sobretudo, em elementos retangulares opacos, com geometrias de base euclidiana, conformados por aleta única ou conjunto de aletas (como persianas e *brises* compostos). Alguns trabalhos apresentam elementos de controle solar perfurados (16,3%), curvos (4,7%), com geometrias amorfas (2,3%) e com superfícies especulares (2,3%).
- Estes trabalhos refletem o predomínio de análises de elementos de controle solar cuja forma é concebida e otimizada apenas em ambiente de modelagem e simulação computacionais, nas quais se destaca o emprego de otimização evolutiva multiobjetivo, a partir dos algoritmos Octopus, NSGA-II e Wallacei.

Além disso, foram identificadas algumas questões em aberto durante o presente processo de revisão. Os artigos revisados apontam que, recorrentemente, as pesquisas tendem a focar em tipologias construtivas específicas, apresentando análises mais aprofundadas para o caso investigado. Neste sentido, abordagens desta natureza podem inviabilizar a generalização dos resultados para um conjunto amostral maior. Por outro lado, avaliações pautadas em abordagens comparativas, com o devido controle de variáveis, podem permitir a visualização de processos de projeto mais abrangentes e de melhores soluções verificadas, que podem ser replicados em diferentes contextos.

Os estudos desenvolvidos até o momento concentraram-se principalmente na avaliação do dispositivo de sombreamento a partir do desempenho da luz do dia, do desempenho energético e térmico. A geometria e propriedades dos materiais e a posição do elemento de controle solar em relação às fachadas e aberturas são retratadas nestas investigações; contudo, a viabilidade de execução destes dispositivos é recorrentemente ignorada. Do mesmo modo, são inexpressivas as avaliações de desempenho da ventilação em ambientes naturalmente ventilados. Recomenda-se trabalhos posteriores que incorporem a avaliação de desempenho estrutural e análises de ventilação a estes processos.

Por fim, os resultados das investigações conduzidas indicaram melhorias no desempenho da iluminação natural com a aplicação dos métodos de trabalho propostos, demonstrando a relevância da incorporação de elementos de controle solar às envoltórias dos edifícios. Contudo, considerando o desenvolvimento destas investigações, conduzir um processo de projeto que aborde a aplicabilidade das soluções ótimas em contexto real, é uma área para exploração de pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- AL-MASRANI, S. M. *et al.* Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, [s. l.], v. 170, p. 849–872, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- ALSHARIF, R. *et al.* Multi-objective optimization of shading devices using ensemble machine learning and orthogonal design of experiments. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 283, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112840>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- AL TOUMA, A. Al; OUAHRANI, D. Quantifying savings in spaces energy demands and CO2 emissions by shading and lighting controls in the Arabian Gulf. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 18, n. January, p. 429–437, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.005>. Acesso em: 29 jan. 2022.

_____. The selection of brise soleil shading optical properties for energy conservation and glare removal: A case study in Qatar. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 20, p. 510–519, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.08.020>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ARBAB, M.; RAHBAR, M.; ARBAB, M. A comparative study of artificial intelligence models for predicting interior illuminance. **Applied Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 373–392, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08839514.2021.1882794>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ASFOUR, O. S. Solar and shading potential of different configurations of building integrated photovoltaics used as shading devices considering hot climatic conditions. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 12, p. 1–15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10124373>. Acesso em: 29 jan. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1**. Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **ABNT NBR 15215-4**. Iluminação natural Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação natural interna. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

_____. **ABNT NBR 15215-1**. Iluminação natural. Parte 1: Conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2024a.

_____. **ABNT NBR 15575**. Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2024b.

AYOUB, M. 100 Years of daylighting: A chronological review of daylight prediction and calculation methods. **Solar Energy**, [s. l.], v. 194, n. August, p. 360–390, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.072>. Acesso em: 29 jan. 2022.

BAKER, N.; STEEMERS, K. **Daylight design of buildings**. 2ed. New York: Earthscan, 2013.

BAZAZZADEH, H. *et al.* Efficient shading device as an important part of daylightophil architecture; a designerly framework of high-performance architecture for an office building in Tehran. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 24, p. 1-26, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14248272>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BELLIA, L. *et al.* An overview on solar shading systems for buildings. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 62, p. 309–317, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BOURNAS, I. Daylight compliance of residential spaces: Comparison of different performance criteria and association with room geometry and urban density. **Building and Environment**, [s. l.], v. 185, n. September, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107276>. Acesso em: 30 jan. 2022.

CAETANO, I.; LEITÃO, A. Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. **Architectural Science Review**, [s. l.], 63:2, p. 164-174, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1680524>. Acesso em: 20 out. 2024.

CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: defining parametric, generative and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], 9, p. 287-300, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>. Acesso em: 20 out. 2024.

CARTANA, R. P. **Desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar para fachadas desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital**. 2018. 348 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 67-82, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300268>. Acesso em: 30 jan. 2022.

CAVALERI, M. P. M.; CUNHA, G. R. M.; GONÇALVES, J. C. S. Iluminação natural em edifícios de escritórios: avaliação dinâmica de desempenho para São Paulo. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 19-34, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v9i1.8650725>. Acesso em: 30 jan. 2022.

DE LUCA, F.; SEPÚLVEDA, A.; VARJAS, T. Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. **Building and Environment**, [s. l.], v. 217, n. April, p. 1-17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109110>. Acesso em: 30 jan. 2022.

DE LUCA, F.; VOLL, H.; THALFELDT, M. Comparison of static and dynamic shading systems for office building energy consumption and cooling load assessment. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 978-998, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14562.02240>. Acesso em: 30 jan. 2022.

ELOUADJERI, S. M.; BOUSSOUALIM, A.; HADDOU, H. A. Evaluating the effect of external horizontal fixed shading devices' geometry on internal air temperature, daylighting and energy demand in hot dry climate. Case study of Ghardaïa, Algeria. **Buildings**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1-22, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings11080348>. Acesso em: 30 jan. 2022.

ELTAWHEEL, A.; SU, Y. Parametric design and daylighting: A literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 73, p. 1086-1103, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.011>. Acesso em: 30 jan. 2022.

FUTRELL, B. J.; OZELKAN, E. C.; BRENTUP, D. Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. **Building and Environment**, [s. l.], v. 92, p. 591-602, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.039>. Acesso em: 30 jan. 2022.

GAO, Q.; YANG, Y.; WANG, Q. An integrated simulation method for PVSS parametric design using multi-objective optimization. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 11, p. 509-526, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.11.003>. Acesso em: 30 nov. 2022.

GHOSH, A.; NEOGI, S. Effect of fenestration geometrical factors on building energy consumption and performance evaluation of a new external solar shading device in warm and humid climatic condition. **Solar Energy**, [s. l.], v. 169, p. 94-104, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.025>. Acesso em: 30 nov. 2022.

GRONDZIK, W. T.; KWOK, A. G. **Mechanical and electrical equipment for buildings**. 13. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

GUTIÉRREZ, R. U. *et al.* Daylight control and performance in office buildings using a novel ceramic louvre system. **Building and Environment**, [s. l.], v. 151, p. 54–74, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.030>. Acesso em: 30 jan. 2022.

HEIDARI, A.; TAGHIPOUR, M.; YARMAHMOODI, Z. The effect of fixed external shading devices on daylighting and thermal comfort in residential building. **Journal of Daylighting**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 165–180, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15627/jd.2021.15>. Acesso em: 30 jan. 2022.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. Building performance simulation – challenges and opportunities. *In*: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (org.) **Building performance simulation for design and operation**. New York: Taylor & Francis Group, 2019, cap. 7, p. 1-10.

IBRAHEEM, Y.; FARR, E. R. P.; PIROOZFAR, P. A. E. Embedding Passive Intelligence into Building Envelopes: A Review of the State-of-the-art in Integrated Photovoltaic Shading Devices. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 111, n. September 2016, p. 964–973, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.259>. Acesso em: 30 jan. 2022.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. Daylight Metrics Committee. **Lighting Measurement #83, spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**. New York: IESNA, 2012.

KANGAZIAN, A.; RAZAVI, S. Z. E. Multi-criteria evaluation of daylight control systems of office buildings considering daylighting, glare and energy consumption. **Solar Energy**, [s. l.], 263, p. 1-26, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111928>. Acesso em: 30 jan. 2022.

KHEIRI, F. Optimization of building fenestration and shading for climate-based daylight performance using the coupled genetic algorithm and simulated annealing optimization methods. **Indoor and Built Environment**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 195–214, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1420326X19888008>. Acesso em: 30 jan. 2022.

KHIDMAT, R. P. *et al.* Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, n. November 2021, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104241>. Acesso em: 30 nov. 2022.

KIRIMTAT, A. *et al.* Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 23–49, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>. Acesso em: 30 nov. 2022.

KIRIMTAT, A. *et al.* Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. **Solar Energy**, [s. l.], v. 185, n. March, p. 100–111, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.048>. Acesso em: 30 nov. 2022.

KOÇ, S. G.; MAÇKA KALFA, S. The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 44, n. May, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102653>. Acesso em: 30 nov. 2022.

KUHN, T. E. State of the art of advanced solar control devices for buildings. **Solar Energy**, [s. l.], v. 154, p. 112–133, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.04>. Acesso em: 30 jan. 2022.

KUSUDA, T. Early history and future prospects of building system simulation. *In*: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION (IBPSA), 1999, Kyoto. **Proceedings** [...]. Kyoto: IBPSA, 1999, p. 1-13. Disponível em: http://www.ibpsa.org/%5Cproceedings%5CBS1999%5CBS99_P-01.pdf. Acesso em: 20 mar. 2023.

KWON, C. W.; LEE, K. J. Article integrated daylighting design by combining passive method with daysim in a classroom. **Energies**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 1–17, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11113168>. Acesso em: 30 jan. 2022.

LAKHDARI, K.; SRITI, L.; PAINTER, B. Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. **Building and Environment**, [s. l.], v. 204, n. January, p. 1-17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>. Acesso em: 30 jan. 2022.

LEE, K. S.; HAN, K. J.; LEE, J. W. The impact of shading type and azimuth orientation on the daylighting in a classroom-focusing on effectiveness of façade shading, comparing the results of DA and UDI. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 1-20, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10050635>. Acesso em: 30 jan. 2022.

LIU, S. *et al.* Investigating the energy saving potential of applying shading panels on opaque façades: A case study for residential buildings in Hong Kong. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 193, p. 78–91, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.044>. Acesso em: 30 jan. 2022.

MANZAN, M.; CLARICH, A. FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices. **Building and Environment**, [s. l.], v. 113, p. 175–184, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.035>. Acesso em: 30 jan. 2022.

MARDALJEVIC, J. Spatio-temporal dynamics of solar shading for a parametrically defined roof system. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 36, p. 815–823, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.020>. Acesso em: 30 jan. 2022.

MARDALJEVIC, J. Climate-based daylight modelling and its discontents. *In*: CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS TECHNICAL SYMPOSIUM (CIBSE), 2015, Londres. **Proceedings** [...]. Londres: CIBSE, 2015. p. 1–12.

NAZARI, S. *et al.* Designing energy-efficient and visually-thermally comfortable shading systems for office buildings in a cooling-dominant climate. **Energy Reports**, [s.l.], 10, p. 3863–3881, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.062>. Acesso em: 11 out. 2023.

NICOLETTI, F.; KALIAKATSOS, D.; PARISE, M. Optimizing the control of venetian blinds with artificial neural networks to achieve energy savings and visual comfort. **Energy and Buildings**, [s. l.], 294, p. 1–12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113279>. Acesso em: 11 out. 2023.

OUAHRANI, D.; AI TOUMA, A. Selection of slat separation-to-width ratio of brise-soleil shading considering energy savings, CO2 emissions and visual comfort - A case study in Qatar author links open overlay panel. **Energy and Buildings**, 165, p. 440–450, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.053>. Acesso em: 11 out. 2023.

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação natural em edifícios de escritório: metodologia para a avaliação do desempenho luminoso**. 2017. 263 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

QIU, Z. *et al.* Identification of passive solar design determinants in office building envelopes in hot and humid climates using data mining techniques. **Building and Environment**, [s. l.], v. 196, n. February, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107566>. Acesso em: 30 jan. 2022.

RAFATI, N.; HAZBEI, M.; EICKER, U. Louver configuration comparison in three Canadian cities utilizing NSGA-II. **Building and Environment**, [s. l.], v. 229, n. December 2022, p. 1–17, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109939>. Acesso em: 11 out. 2023.

REINHART, C. Daylight performance predictions. *In*: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (org.) **Building performance simulation for design and operation**. New York: Taylor & Francis Group, 2019, cap. 7, p. 221–269.

ROGERS, Z. **Daylighting metric development using daylight autonomy calculations in the sensor placement optimization tool**. Boulder: Architectural Energy Corporation, 2006.

SADEK, A. H.; MAHROUS, R. Adaptive glazing technologies: Balancing the benefits of outdoor views in healthcare environments. **Solar Energy**, [s. l.], v. 174, n. September, p. 719–727, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.032>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SEPÚLVEDA, A. *et al.* Analyzing the fulfillment of daylight and overheating requirements in residential and office buildings in Estonia. **Building and Environment**, [s. l.], v. 180, p. 1–12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107036>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SETTINO, J. *et al.* Multi-objective analysis of a fixed solar shading system in different climatic areas. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 1–18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13123249>. Acesso em: 20 jan. 2022.

SGHIOURI, H. *et al.* Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 18, p. 292–302, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.03.018>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SKANDALOS, N.; KARAMANIS, D. An optimization approach to photovoltaic building integration towards low energy buildings in different climate zones. **Applied Energy**, [s. l.], v. 295, n. April, p. 1-24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117017>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SPITLER, J. D. Building performance simulation: The now and the not yet. **American Society of Heating**, [s. l.], v. 12, p. 549–551, 2006.

TAVERES-CACHAT, E. *et al.* Balancing competing parameters in search of optimal configurations for a fix louvre blade system with integrated PV. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 122, p. 607–612, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.357>. Acesso em: 20 jan. 2022.

TAVERES-CACHAT, E. *et al.* A methodology to improve the performance of PV integrated shading devices using multi-objective optimization. **Applied Energy**, [s. l.], v. 247, p. 731–744, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.03>. Acesso em: 20 jan. 2022.

TAVERES-CACHAT, E.; GOIA, F. Exploring the impact of problem formulation in numerical optimization: A case study of the design of PV integrated shading systems. **Building and Environment**, [s. l.], v. 188, n. November 2020, p. 1-12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107422>. Acesso em: 20 jan. 2022.

TECHNICAL COMMITTEE CEN/TC 169, **EN 17037:2018 Daylight in Buildings**, European Committee for Standardization CEN-CENELEC, Brussels, BE, 2018.

TIAN, Z. *et al.* Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 158, p. 1306–1316, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.022>. Acesso em: 20 jan. 2022.

VERA, S. *et al.* Optimization of a fixed exterior complex fenestration system considering visual comfort and energy performance criteria. **Building and Environment**, [s. l.], v. 113, p. 163–174, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.027>. Acesso em: 20 jan. 2022.

WANG, S. *et al.* A parameterized design method for building a shading system based on climate adaptability. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 1-20, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13081244>. Acesso em: 20 dez. 2022.

WANG, Y.; YANG, W.; WANG, Q. Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 275, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112441>. Acesso em: 20 dez. 2022.

WEN, S. *et al.* Comparing the performance of four shading strategies based on a multi-objective genetic algorithm: A case study in a university library. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 63, n. PA, p. 1-21, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105532>. Acesso em: 20 out. 2023.

WIENOLD, J. *et al.* **Cross-validation and robustness of daylight glare metrics**. [S. l.: s. n.], 2019-. ISSN 14770938.v. 51

XIE, J. C. *et al.* Balancing energy and daylighting performances for envelope design: A new index and proposition of a case study in Hong Kong. **Applied Energy**, [s. l.], v. 205, n. 100, p. 13–22, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.115>. Acesso em: 20 jan. 2022.

YU, F.; WENNERSTEN, R.; LENG, J. A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching ‘thermal-daylighting balance’. **Building and Environment**, [s. l.], v. 186, n. October, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107330>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ZANI, A. *et al.* Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 180, p. 1473–1483, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.310>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ZHANG, X. *et al.* Photovoltaic integrated shading devices (PVSDs): A review. **Solar Energy**, [s. l.], v. 170, n. May, p. 947–968, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.067>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ZHOU, K.; LENG, J. W. State-of -the-art research of performance-driven architectural design for low-carbon urban underground space: Systematic review and proposed design strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 182, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113411>. Acesso em: 20 out. 2023.

4. INVESTIGAÇÃO DO DESEMPENHO DA LUZ DO DIA EM ENVOLTÓRIAS COM DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO ESTÁTICOS

Resumo: As estratégias de projeto passivas são de grande importância para melhoria da qualidade ambiental das edificações, com destaque para a função de elementos de controle solar. Neste contexto, esta pesquisa visa quantificar o desempenho de dispositivos de sombreamento fixos, do tipo *brise* e painel microperfurado, por meio da avaliação de sistemas de proteção instalados em edificações da Universidade Federal de Viçosa, Brasil. O objetivo deste trabalho é conceber e aplicar um fluxo de trabalho para avaliação do desempenho de dispositivos de sombreamento já instalados. Para tanto, foi conduzido um método de trabalho que incorporou processo de validação às análises de simulação computacionais, a partir da realização de medições em contexto real. Os resultados demonstraram que a adição de dispositivos de sombreamento às fachadas oferece uma oportunidade para redução simultânea na transmissão de radiação e na probabilidade de ofuscamento, bem como uma maior capacidade de controle da iluminação natural. A contribuição deste artigo é a aplicação de um método de trabalho que considera o comportamento de dispositivos de sombreamento já instalados, a partir da realização de experimento para calibrar o modelo e validar as simulações computacionais. Desta forma, incorpora os resultados obtidos *in loco* com aqueles verificados em ambiente digital.

Palavras-chave: Análise da iluminação natural. Processo de projeto computacional. Conforto visual. Elemento de controle solar.

4.1. INTRODUÇÃO

Uma das funções da arquitetura é garantir, no interior das edificações, condições térmicas e luminosas compatíveis com as exigências humanas de conforto ambiental, independentemente das condições climáticas externas. Neste sentido, avaliações de desempenho do edifício permitem análises que visam responder a demandas relacionadas à iluminação, consumo de energia, desempenho acústico, conforto dos ocupantes, qualidade do ar interior, entre outras.

A luz do dia influencia o ambiente construído e regula o conforto térmico, luminoso e visual, possibilitando a redução da demanda de energia para iluminação artificial e climatização (Kirimtat *et al.*, 2019; Kuhn, 2017). Um ambiente naturalmente iluminado viabiliza a proposição de espaços interiores mais sustentáveis e a iluminação é importante na autossuficiência dos edifícios (Samadi *et al.*, 2020).

A admissão da luz do dia no interior da edificação sempre foi um objetivo da prática arquitetônica, embora não tenha sido explicitamente estabelecida pela política formal até o século XX (Bournas, 2021). Como uma variável do processo de projeto significativa, ela impacta na orientação, na geometria e na qualidade dos ambientes internos de uma edificação.

As estratégias de projeto passivas são abordagens importantes para melhoria da qualidade ambiental nas edificações (Liu *et al.*, 2020; Yu; Wennersten; Leng, 2020), dentre as quais se destaca a função dos dispositivos de sombreamento para melhoria do desempenho das envoltórias (Srisamranrungruang; Hiyama, 2020). Além de atuarem no desempenho térmico do edifício, elementos de controle solar possibilitam uma melhor distribuição da luz do dia no interior do ambiente, reduzem a admissão da radiação solar direta e a probabilidade de ofuscamento devido à iluminação excessiva (Huo *et al.*, 2020; Kirmat *et al.*, 2016).

Com recorrência, trabalhos que investigam o desempenho de elementos de controle solar apontam que a luz do dia nas áreas de trabalho pode ser controlada através de elementos fixos externos. Estes dispositivos bloqueiam a luz para as diversas alturas solares, distribuem a luz solar incidente reduzindo, desta forma, o potencial de ofuscamento (Grondzik; Kwok, 2019).

Nas últimas décadas, investigações que envolvem análises de iluminação natural durante o processo de projeto têm tido grande prioridade, paralelamente ao desenvolvimento de ferramentas computacionais para quantificá-las (Ayoub, 2019).

Muitos estudos utilizam métodos combinados de projeto algorítmico-paramétrico, simulação de desempenho e algoritmos de otimização para explorar possibilidades de geometrias de elementos de controle solar ainda em um estágio inicial do processo de projeto. O trabalho de Khidmat *et al.* (2022) abordou a utilização de metal expandido como dispositivo de sombreamento. A definição da geometria do elemento foi investigada a partir de parâmetros fixos relacionados às dimensões do modelo e a parâmetros do próprio material. Alsharif *et al.* (2023), por sua vez, conduziram uma abordagem de otimização multiobjetivo, por meio de modelagem *Machine Learning*, para testar o desempenho da configuração de dispositivos de sombreamento amorfos quanto aos aspectos luminoso, térmico e energético.

Trabalhos que analisaram desempenhos combinados da luz do dia e do conforto interno avaliaram, sobretudo, a incidência da luz solar, a probabilidade de ofuscamento e os níveis de radiação solar internos. Cartana, Pereira e Mayer (2018) avaliaram painéis conformados por células criadas e distribuídas a partir de componentes Voronoi. Fan, Liu e Tang (2022) desenvolveram um método objetivo de otimização de fachada, baseado em atlas de densidade de imagem, para analisarem a concepção de um elemento de controle solar para um estádio.

Outras pesquisas se dedicaram à investigação do potencial de dispositivos de sombreamento para reduzir o consumo de energia para iluminação, resfriamento e aquecimento, garantindo níveis adequados de iluminação natural ou melhoria de sua distribuição no espaço

avaliado. Chi, Moreno e Navarro (2017) propuseram telas solares perfuradas, com arranjos ortogonais. Bazazzadeh *et al.* (2021) desenvolveram dispositivos de sombreamento inspirados em estruturas tradicionais iranianas (*Muqarnas*). Koç e Kalfa (2021) centraram-se no efeito de fatores geométricos na demanda de energia. Qiu *et al.* (2021) desenvolveram um método de análise fatorial para integração de técnicas de mineração de dados e simulação.

Em outros trabalhos, o foco estava no controle da radiação solar, índices de vista externa e iluminação natural e desempenho energético. Zani *et al.* (2017) propuseram e fabricaram digitalmente um dispositivo de sombreamento estático de concreto de alto desempenho. De Luca, Sepúlveda e Varjas (2022) avaliaram elementos estáticos para salas de aula. Por fim, Wen *et al.* (2023) desenvolveram um método comparativo para avaliar o desempenho de diferentes estratégias de sombreamento, a partir de um indicador que relaciona a satisfação subjetiva do usuário com o nível de iluminância medido.

Esta breve revisão de literatura resume os objetivos e alguns métodos de projeto encontrados em estudos recentes. Ainda que o modo de se conceber, ou avaliar, a forma do elemento de controle solar varie nos trabalhos apontados, o que esses estudos vêm apresentando em comum é a predominância da avaliação do desempenho apenas em ambiente de simulação computacional. Situação esta que não se limita aos trabalhos mencionados, mas que reflete a realidade de parcela significativa deste tipo de estudo.

Diferente deste cenário, nesta pesquisa o método de trabalho considera o comportamento destes dispositivos já instalados e compara estes resultados aos obtidos nas simulações computacionais. Para tanto, este estudo trata de seis ambientes de escritórios, localizados em edifícios da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais. Eles apresentam fachadas planas e dispositivos de sombreamento estáticos do tipo *brise* e painel solar microperfurado. Neste contexto, a avaliação se destina a elementos de controle solar em clima tropical de baixa latitude, para ambientes naturalmente ventilados.

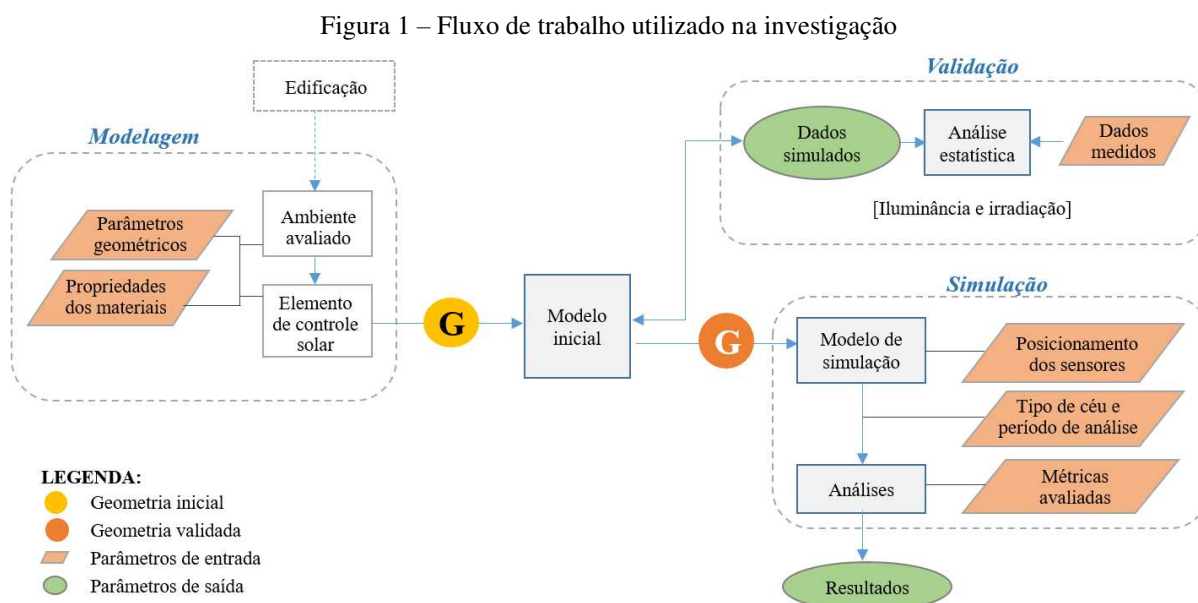
Ao investigar o comportamento destes dispositivos de sombreamento à luz do dia, o objetivo desta pesquisa é conceber e aplicar um fluxo de trabalho para avaliação do desempenho de dispositivos de sombreamento já instalados.

Para tanto, este estudo foi conduzido por meio de um método de trabalho que incorpora processo de validação às análises de simulação computacionais, a partir da realização de medições em contexto real. Como resultado, os dispositivos de sombreamento instalados mostraram-se eficazes na melhoria dos indicadores avaliados, alcançando, deste modo, um melhor

desempenho luminoso. Neste contexto, a principal contribuição deste trabalho é a concepção de um método de projeto que considera o comportamento de dispositivos de sombreamento já instalados, a partir da realização de experimento para calibrar o modelo e validar as simulações computacionais. Desta forma, incorpora os resultados obtidos in loco com aqueles verificados em ambiente digital.

4.2. MÉTODO

Este estudo utiliza uma abordagem quantitativa baseada em medições e simulações da luz do dia para avaliar o comportamento de elementos de controle solar estáticos em ambientes de escritórios. O fluxo de trabalho empregado nesta investigação é apresentado na Figura 1 e integra a modelagem tridimensional dos ambientes avaliados e dos dispositivos de sombreamento, a validação destes modelos e a realização das simulações computacionais.



Fonte: A autora.

4.2.1. Estudo de caso

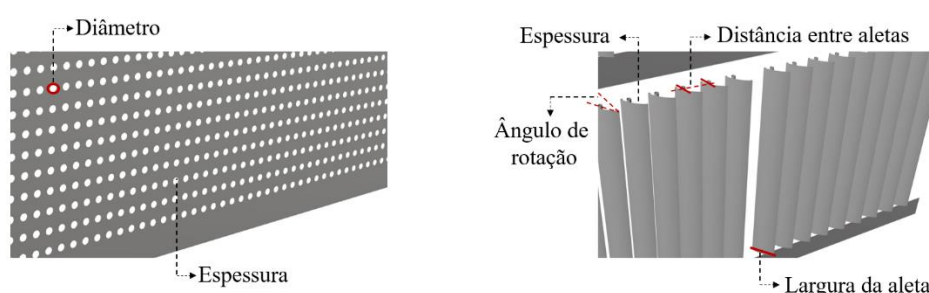
Em estudo realizado por Carvalho e Cabús (2020), sobre a eficiência da luz solar refletida e o desempenho de elementos de controle solar, os autores verificaram que as características de sistemas de sombreamento mais utilizadas em estudos de avaliação da iluminação natural envolviam dimensionamento e propriedades dos seus componentes.

Com base em trabalhos verificados na literatura, que avaliaram estes dispositivos a partir de análises algorítmico-paramétricas, foi possível ampliar estes critérios. Identificou-se o

importante papel da tipologia e da forma da superfície de sombreamento e de suas condições de instalação em cada solução empregada. A tipologia é definida pelo tipo de elemento de controle solar utilizado, a forma do dispositivo diz respeito às suas dimensões e as condições de instalação, por sua vez, referem-se ao posicionamento destes elementos em relação às aberturas ou às envoltórias do edifício.

A este estudo importa duas tipologias de sombreamento: elementos contínuos (painéis microperfurados) e elementos conformados por aletas (*brises*), cujos parâmetros mais empregados nas análises seguem representados na Figura 2.

Figura 2 – Tipologias de sombreamento e principais parâmetros de projeto empregados

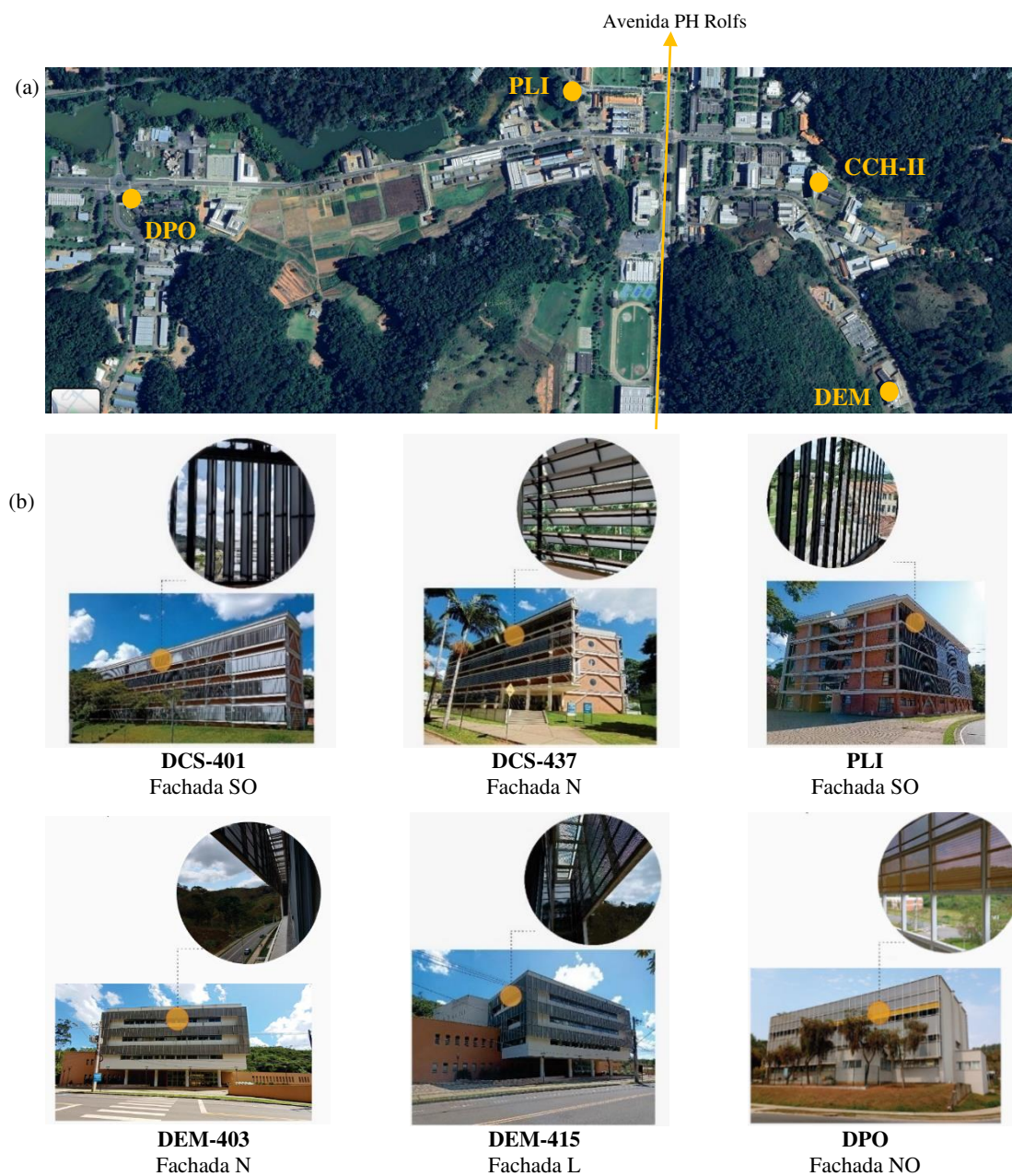


Fonte: A autora.

Neste cenário, este trabalho avalia um conjunto de seis salas de escritórios individuais (gabinetes) localizadas na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20,77° S, 42,87° O), semelhantes em termos de dimensionamento e área das aberturas. A pesquisa considera as variáveis relacionadas com a forma do ambiente (dimensões) e do elemento de controle solar (dimensões e posicionamento) definidas como valores fixos, uma vez que este estudo investiga as configurações atuais destes ambientes, ou seja, aquelas verificadas em contexto real.

A amostra avaliada inclui três salas com elementos de controle solar representativos da tecnologia construtiva mais empregada – *brise*, com fachadas orientadas a sudoeste e norte. Inclui, ainda, três salas com dispositivos representativos da tecnologia construtiva que vem sendo empregada atualmente – painel metálico microperfurado, orientadas para nordeste, norte e leste. A Figura 3 apresenta a localização dos ambientes avaliados (a) e em 3(b) são exibidas imagens das edificações trabalhadas e trecho de seus dispositivos de sombreamento.

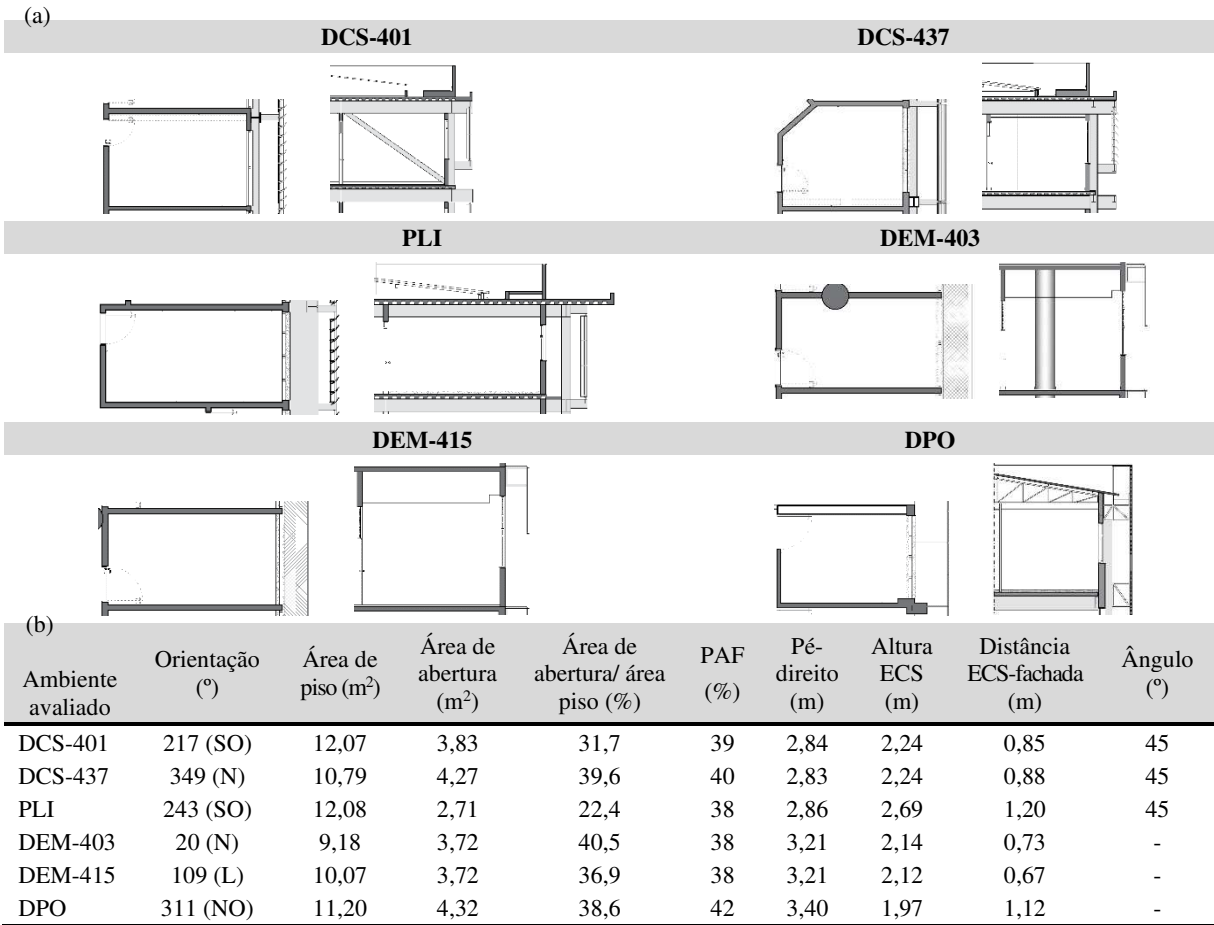
Figura 3 – Vista área parcial do Campus, com indicação das edificações cujas salas foram avaliadas (a) e vista das fachadas com detalhe dos dispositivos de sombreamento (b)



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagem do *Google Maps*. Fotografias do acervo da autora.

Na Figura 4, pode-se observar a representação em planta e corte de cada um dos ambientes (a) e em 4(b) suas dimensões são indicadas.

Figura 4 – Características dos ambientes avaliados



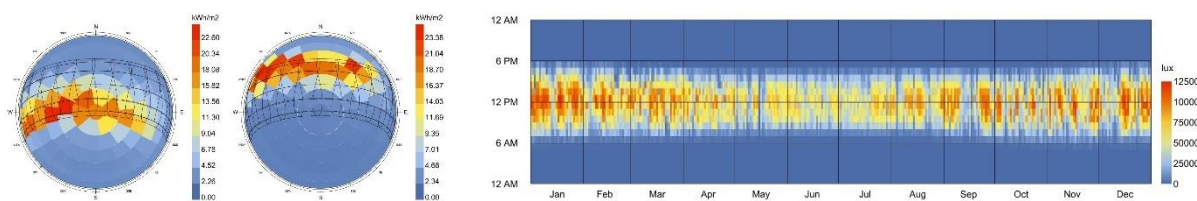
Fonte: A autora.

Conforme o zoneamento bioclimático brasileiro, a cidade se enquadra na Zona Bioclimática 3, com clima tropical de altitude, caracterizado por verão chuvoso e período de seca no inverno (ABNT, 2005). Em estudo mais recente, que considera o zoneamento bioclimático por desempenho, este enquadramento foi revisto e a cidade foi classificada como 2M. Esta zona é definida como fria com inverno moderado, apresentando temperatura média anual de bulbo seco (DBTmean) que varia entre 18,8°C e 20,9°C (Machado *et al.*, 2024).

Segundo Arquivo climático de Viçosa TMYx 2017-2021, desenvolvido no Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Latecae desta Universidade, a máxima média diária da radiação solar global foi observada no mês de janeiro, 458Wh/m² e a mínima, em maio, com valor de 255Wh/m². Quanto aos valores de iluminância horizontal global, os modelos numéricos contidos no *software* EnergyPlus estimam valores acima de 100.000lx entre os meses de novembro a fevereiro e menores índices nos meses de junho e julho, com valores predominantemente inferiores a 80.000lx, obtidos a partir da radiação global medida em estação para um ano estatístico representativo do clima. Os

diagramas da radiação solar total (direta somada à difusa) sobrepostos às trajetórias solares para os períodos de verão e inverno, juntamente com o mapeamento anual da iluminância horizontal global estão representados na Figura 5.

Figura 5 – Diagramas da radiação solar total (verão e inverno) e da iluminância horizontal global (anual)



Fonte: A autora.

4.2.2. Validação do modelo e verificação de sua geometria através de medições

A primeira etapa do experimento compreendeu a realização de levantamentos para verificação das dimensões geométricas do ambiente e do dispositivo de sombreamento, bem como para definição das propriedades ópticas dos materiais de revestimento a partir dos procedimentos apresentados por Dornelles (2008) e Pereira *et al.* (2015; 2017)⁴. A determinação destas características subsidiou a validação do modelo computacional, que foi realizada por meio de análises ponto-a-ponto que compararam os valores de iluminância e irradiação obtidos nas simulações com os dados aferidos em campo.

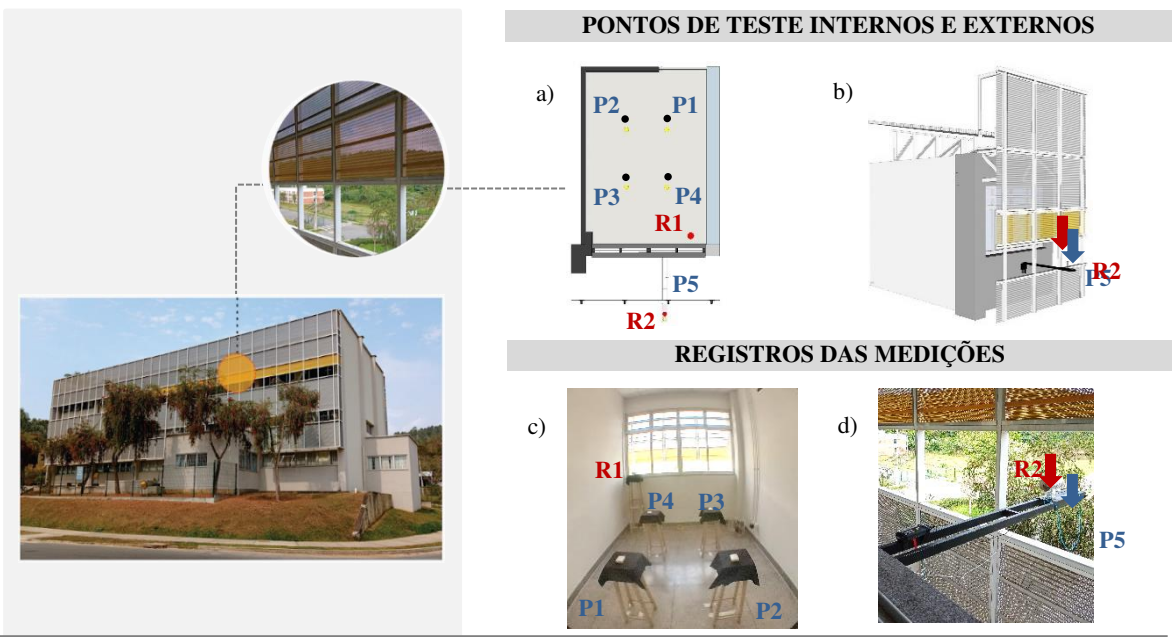
Para os dados de iluminância, adotou-se cinco pontos para localização dos sensores, sendo quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso, com sensores igualmente distribuídos e um ponto externo – afastado 0,40m do alinhamento do elemento de controle solar. A irradiação solar foi medida em dois pontos, sendo um ponto interno – afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso e um ponto externo – afastado 0,15m do alinhamento do elemento de controle solar.⁵ Para os ambientes de análise DCS-401 e DCS-437, os pontos externos foram locados na cobertura.

A Figura 6 exemplifica a configuração experimental adotada, com indicação dos pontos de teste para iluminância e irradiação internos (a) e externos (b) e registros interno (c) e externo (d) das medições realizadas no ambiente de análise DPO.

⁴ Ver Apêndice C.

⁵ Este estudo utilizou os equipamentos HOBO onset. Pendant temp/light UA-002-64 e HOBO/ONSET U12 Temp/RH/Light External, modelo U12-012, para medição das iluminâncias e solarímetros portáteis, KIMO INSTRUMENTS, Solarimeter SL 200 e OMNI INSTRUMENTS, Pyranometer CMP 3, para coleta dos dados de irradiação, que têm precisão de medição de $\pm 5\%$, de acordo com o fabricante.

Figura 6 – Configuração experimental: Iluminância (sensores P1 a P5) e irradiação (sensores R1 e R2)



Fonte: A autora.

As medições de campo foram realizadas para um período de três dias de verão (entre novembro de 2023 a fevereiro de 2024) e três dias de inverno (junho de 2024). Para determinação dos valores representativos das medições instrumentais foi empregada a média dos índices obtidos nestas medições. Neste trabalho, considerou-se o recorte horário de 8h às 17h para avaliação do ambiente sem ocupação. As janelas foram mantidas fechadas e a iluminação artificial não foi acionada.

Para acompanhamento das condições climáticas no período foram realizados registros fotográficos do céu, a cada hora de medição. As imagens foram obtidas com a utilização de lente olho de peixe e exemplos destes registros seguem apresentados nas Figuras 7 (período de verão) e 8 (período de inverno), para o ambiente de análise DPO.

Figura 7 – Caracterização das condições de céu para as medições de verão

	08h	09:30h	11h	12:30h	14h	15:30h	17h
18/jan							
26/jan							
30/jan							

Fonte: Acervo da autora.

Figura 8 – Caracterização das condições de céu para as medições de inverno

	08h	09:30h	11h	12:30h	14h	15:30h	17h
01/jun							
02/jun							
03/jun							

Fonte: Acervo da autora.

O céu típico de verão para a região Sudeste pode variar entre dias claros e nublados, com formação de nuvens mais expressiva nas tardes quentes. De modo geral, as condições de céu verificadas nas medições divergiram um pouco deste padrão, com recorrência de céus parcialmente nublados a nublados no início da manhã. Isto se justifica porque as medições foram realizadas durante um período atípico de chuvas, com níveis de precipitação superiores aos comumente verificados para esta época do ano. Por outro lado, as condições de céu verificadas para o inverno refletem, de modo geral, as condições esperadas para o período, com um céu nublado a parcialmente nublado em decorrência da passagem de frentes frias que causam o aumento da nebulosidade e de precipitações esporádicas.

Ainda nesta fase da pesquisa, a validação do modelo foi quantificada por meio de duas métricas comumente utilizadas: o Erro médio de polarização (*Mean Bias Error* – MBE) e a Variação do coeficiente da raiz do erro quadrático médio (*Coefficient Variation of the Root Mean Square Error* – CV (RMSE)), em consonância com outros estudos (Lakhdari; Sriti; Painter, 2021 e Verma; Gopalakrishnan, 2023). Estes índices foram calculados de acordo com as Equações 1 e 2, respectivamente, tendo sido empregado, para os mesmos, limites baseados na literatura.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Mi - Si)}{\sum_{i=1}^N Mi} \quad (\%) \quad (1)$$

$$CV (RMSE) = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Mi - Si)^2}{n}} \quad (\%) \quad (2)$$

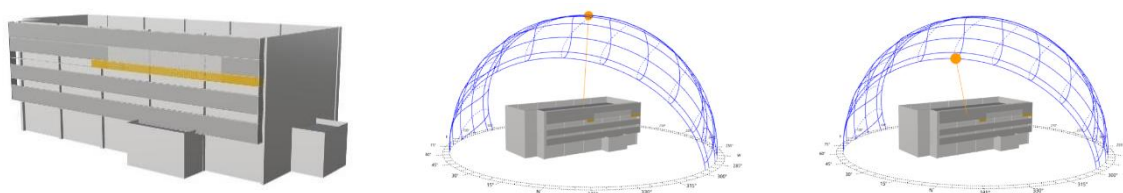
Em que Mi e Si são os dados medidos e simulados no intervalo de tempo i , n é o número total de dados coletados, utilizados para o cálculo e $\bar{Y}$ é o valor médio dos dados medidos.

Ainda que a precisão das pesquisas de iluminação não seja usualmente relatada e não tenha sido localizado parâmetros normatizados para estas calibrações, em estudos anteriores erros de simulação de luz natural de 20-30% foram considerados aceitáveis (Lakhdari; Sriti; Painter, 2021 e Wu; Zhang, 2022).

4.2.3. Simulação de desempenho e definição dos indicadores

Na etapa seguinte, os ambientes foram modelados e simulados utilizando a suíte de modelagem parametricamente acoplada Rhinoceros + Grasshopper, com o emprego dos *plugins* de análise ambiental Ladybug e Honeybee. A Figura 9 exemplifica um modelo computacional gerado e as trajetórias solares verificadas para verão e inverno, para o ambiente de análise DPO.

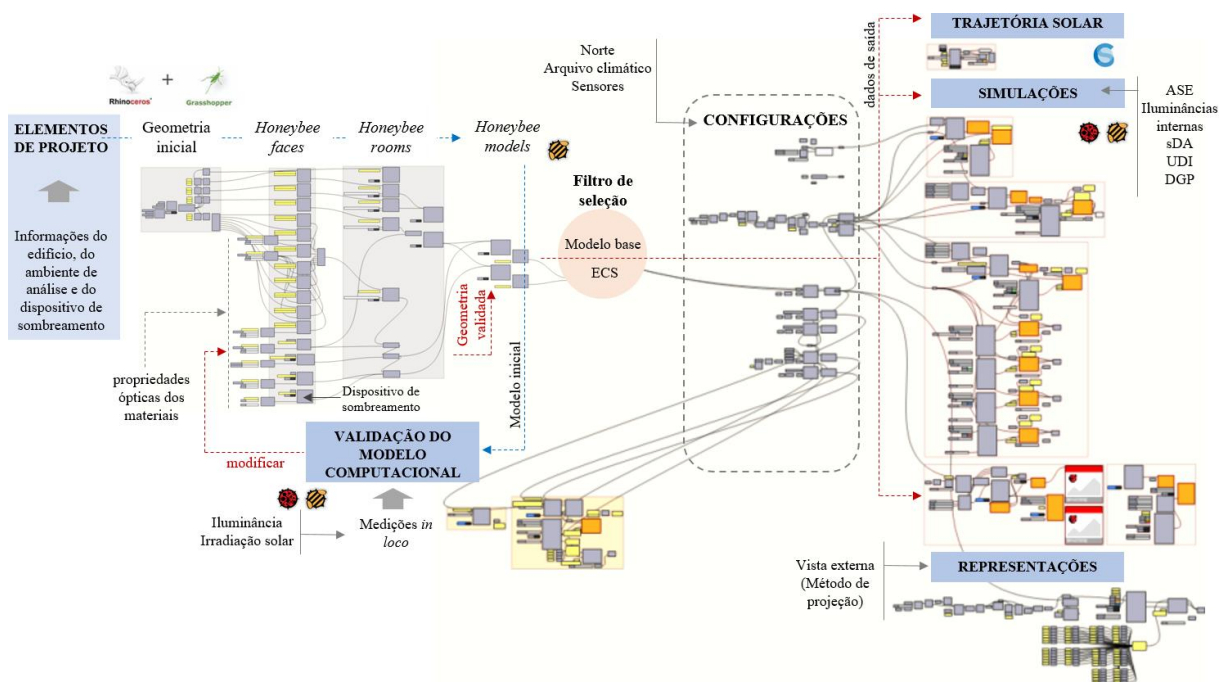
Figura 9 – Modelo computacional e suas trajetórias solares para verão e inverno, com indicação do posicionamento do sol às 12h



Fonte: Modelo elaborado a partir da plataforma Rhinoceros + Grasshopper e trajetórias solares por meio da plataforma Rhinoceros + ClimateStudio.

O código desenvolvido para esta pesquisa está apresentado na Figura 10. A primeira etapa diz respeito à geometria inicial da edificação (perímetro dos pavimentos e platibanda) e do ambiente avaliado (piso, forro e paredes internas e externa). Estas formas são convertidas em faces na fase seguinte e acrescidas as geometrias da janela, da porta e do dispositivo de sombreamento. São também inseridos os modificadores das propriedades ópticas dos materiais de revestimento. A interpolação destas superfícies origina os ambientes que, agrupados, resultam nos modelos de análise. O filtro de seleção permite alternar entre o modelo base (sem dispositivo de sombreamento) e o modelo de referência. Nas configurações estão inseridos o arquivo climático, a indicação do Norte e as malhas de análise empregadas. A etapa final do código compreende a validação e as simulações realizadas.

Figura 10 – Código de trabalho para avaliação dos modelos de referência



Fonte: A autora.

Os indicadores e critérios para avaliação da luz natural foram selecionados entre as métricas baseadas no clima. Como resultado, foram utilizados cinco indicadores de luz natural para quantificar sua distribuição, a avaliação de probabilidade de ocorrência de ofuscamento e o acesso à vista externa. Para este estudo foram realizadas avaliações anuais e, especificamente para o ofuscamento, as análises foram simuladas para os períodos de verão e inverno, considerando-se o solstício de verão (22 de dezembro) e solstício de inverno (21 de junho), com referência no ano de 2023.

O primeiro indicador adotado foi a Autonomia da luz do dia espacial (sDA) que determina se uma sala recebe luz solar suficiente para a iluminar, por fração de tempo. Deste modo, estabelece a proporção de área que recebe um valor mínimo de iluminância de 300lx, ao menos 50% das horas ocupadas (sDA_{300/50%}) (Kheiri, 2019; De Luca; Sepúlveda; Varjas, 2022; Khidmat *et al.*, 2022; Piraei; Matusiak; Lo Verso, 2022; Wang; Yang; Wang, 2022). Associado a este, utilizou-se, também, a Iluminância útil da luz do dia (UDI), que define a iluminância útil como uma faixa entre 100 e 2000lx (UDI_{100-2000lx}) (Khidmat *et al.*, 2022; Nazari *et al.*, 2023; Rafati; Hazbei; Eicker, 2023). Abaixo de 100lx é considerado muito escuro e iluminância com valor superior a 2000lx é considerado brilhante.

A avaliação da probabilidade de ocorrência de ofuscamento foi realizada por meio do indicador Probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP) que considera valores iguais

ou inferiores a 0,34 como brilho imperceptível e valores superiores a 0,45 como brilho intolerável (ABNT, 2024) (De Luca; Sepúlveda; Varjas, 2022), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Categorização dos valores de DGP

Critério	DGP
O ofuscamento não é percebido	$DGP \leq 0,34$
O ofuscamento é percebido, mas na maioria das vezes não perturba	$0,34 < DGP \leq 0,38$
O ofuscamento é percebido e, muitas vezes, perturba	$0,38 < DGP \leq 0,45$
O ofuscamento é percebido e, na maioria das vezes, é intolerável	$DGP > 0,45$

Fonte: ABNT (2024).

O quarto indicador diz respeito à exposição à luz solar, expresso em termos do número de horas por dia nos quais o sol é visível a partir de um determinado ponto de referência em uma superfície interna. Neste trabalho, foi empregado o indicador Exposição anual à luz solar (ASE) que avalia o potencial de desconforto visual devido à incidência de radiação solar direta. Determina a porcentagem da área medida com iluminância diurna de 1000lx durante pelo menos 250 horas ocupadas ($ASE_{1000,250}$) (Kheiri, 2019; Khidmat *et al.*, 2022; Piraei; Matusiak; Lo Verso, 2022).

Por fim, para quantificação do acesso à vista exterior, foi empregado o indicador Vista externa que relaciona cinco fatores: o tamanho das aberturas de luz natural, o ângulo de visão horizontal, a distância externa de visão, o número de camadas e a qualidade da informação ambiental vista. Para tanto, foi empregado o método de projeção, estabelecido na EN 17037 (CEN, 2018). A Tabela 2 apresenta a classificação do acesso à vista segundo as normas ABNT NBR 15215:3 (ABNT, 2024); ABNT NBR 15215:4 (ABNT, 2023) e EN 17037 (CEN, 2018) (Waczynska; Sokol; Martyniuk-Peczek, 2021; Sepúlveda *et al.*, 2022; Domjan; Arkar; Medved, 2023).

Tabela 2 – Avaliação do acesso à vista exterior, em pelo menos 75% da área utilizada

Nível de recomendação	Ângulo de visão horizontal (°)	Distância externa de visão (m)	Número de camadas visíveis
Mínimo	≥ 14	≥ 6	Camada Paisagem
Médio	≥ 28	≥ 20	Camadas Paisagem + Céu/ Solo
Máximo	≥ 54	≥ 50	Camadas Paisagem + Solo + Céu

Fonte: CEN (2018); ABNT (2023; 2024).

Para o modelo de iluminação natural foi considerado um *grid* de pontos de sensores de 0,50 x 0,50m, posicionado a 0,75m acima do nível do piso. A avaliação dos indicadores DGP e Vista externa foi realizada para pontos localizados a 1,20m acima do nível do piso, tendo por referência o nível dos olhos de uma pessoa sentada.

Para estes ambientes de análise, os detalhes das propriedades ópticas dos materiais estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades ópticas dos materiais de construção

Superfície	Ambiente de análise					
	DCS-401	DCS-437	PLI	DEM-403	DEM-415	DPO
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,71$	$\rho = 0,70$	$\rho = 0,71$	$\rho = 0,95$	$\rho = 0,95$	$\rho = 0,745$
Porta tipo prancheta (pintura Branco)	$\rho = 0,86$	$\rho = 0,65$	$\rho = 0,86$	$\rho = 0,94$	$\rho = 0,94$	-
Porta de vidro coberta por papel (Branco)	-	-	-	-	-	$\rho = 0,85$
Forro modular termoacústico (Branco)	$\rho = 0,85^6$	$\rho = 0,86^3$	-	-	-	$\rho = 0,86^3$
Forro em gesso (pintura Branco)	-	-	-	$\rho = 0,94$	$\rho = 0,94$	-
Teto metálico (pintura Branco)	-	-	$\rho = 0,85$	-	-	-
Piso cerâmico (Cinza)	$\rho = 0,62$	$\rho = 0,62$	-	-	-	-
Piso cerâmico (Bege claro)	-	-	$\rho = 0,62$	-	-	-
Piso em granilite (Cinza)	-	-	-	$\rho = 0,45^7$	$\rho = 0,45^9$	$\rho = 0,45^9$
Vidro incolor 6mm	$\tau = 0,60$	$\tau = 0,60$	$\tau = 0,60$	$\tau = 0,60$	$\tau = 0,60$	$\tau = 0,60$
Brise (Alumínio)	$\rho = 0,80$	$\rho = 0,80$	$\rho = 0,90$	-	-	-
Painel microperfurado (Cinza)	-	-	-	$\rho = 0,80$	$\rho = 0,80$	$\rho = 0,80$
Painel microperfurado (Amarelo)	-	-	-	-	-	$\rho = 0,25$

Fonte: A autora.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção descreve os resultados das validações dos modelos e das avaliações de desempenho dos seis ambientes analisados em termos de disponibilidade de luz natural, probabilidade de ofuscamento e qualidade da vista externa.

4.3.1. Qualidade do modelo validado

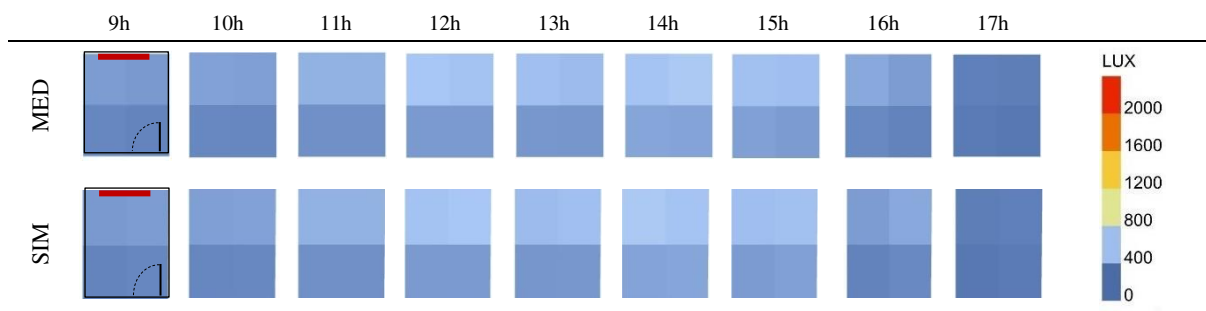
Neste estudo foram realizadas medições de campo para validação dos modelos de simulação. As Figuras 11 e 12 exemplificam os resultados obtidos para iluminâncias medidas e simuladas, considerando todo o recorte temporal da avaliação. A primeira se refere ao ambiente de análise DCS-437 (Departamento de Ciências Sociais), com dispositivo do tipo *brise* (índices verificados para o inverno). Na sequência, são apresentados os resultados para

⁶ Informação extraída do catálogo do Fabricante. Armstrong World Industries. Forro termoacústico CIRRUS. Disponível em: <https://www.armstrongceilings.com/commercial/pt-br/commercial-ceilings-walls/mineral-fiber-and-fiberglass-ceiling-tiles.html#bbbh=%7B%22selectedItem%22%3A%7B%22namen%22%3A%22browse%22%2C%22itemIndex%22%3A%22%7D%7D>. Acesso em 01/12/2022.

⁷ Referência retirada de Fernandes, L. C.; Krüger, C. E.; Motzafi-Haller, W. Experimentos de campo com teto-reservatório e painéis para resfriamento radiante em uma edificação-teste. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 357-384, jan/mar. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100509>.

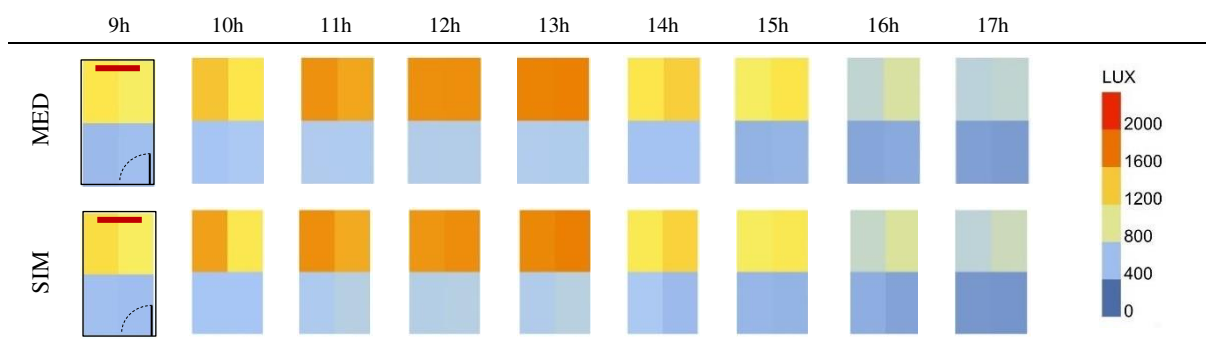
DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem), com painel microperfurado (dados de verão), ambas fachadas com orientação norte.⁸

Figura 11 – Exemplo de visualização da iluminância medida e simulada para o ambiente de análise DCS-437 (Departamento de Ciências Sociais), com referência nas medições de inverno



Fonte: A autora.

Figura 12 – Exemplo de visualização da iluminância medida e simulada para o ambiente de análise DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem), com referência nas medições de verão



Fonte: A autora.

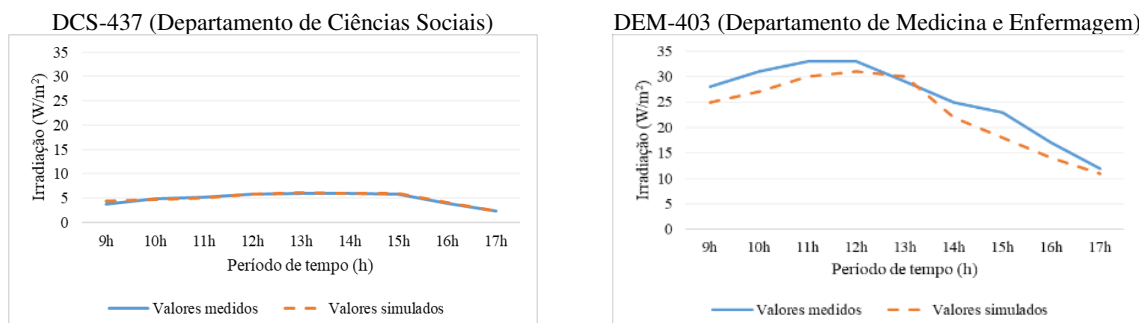
Como se observa nas figuras acima, foram verificados valores de iluminância inferiores a 500lx para o ambiente com *brise*, caracterizado por uma iluminação mais homogênea, sobretudo no início e ao final do dia representativo de inverno. Por sua vez, para o segundo caso, os valores de iluminância próximo à janela (>1.000lx) foram significativamente maiores do que no centro da sala (<530lx), para dados representativos de verão.

A Figura 13 mostra a comparação entre níveis internos de irradiação medidos e simulados, para os dois ambientes avaliados, para o recorte temporal de 8h às 17h, com intervalo a cada uma hora. Para o ambiente DCS-437 (Departamento de Ciências Sociais), esta relação reflete os dados verificados para o inverno, com valores obtidos inferiores a 10W/m². Por sua vez, são

⁸ Para os ambientes de análise DCS-401, DCS-437 E DEM-415, a validação foi realizada a partir das medições de inverno. Para PLI, DEM-403 e DPO, foram utilizados os dados obtidos para o verão. O resultado completo das análises de validação está apresentado no Apêndice D.

apresentados os dados obtidos para o ambiente DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem), referentes ao verão, nos quais são atingidos níveis superiores a 30W/m^2 no final da manhã.

Figura 13 – Comparação entre níveis internos de irradiação medidos e simulados, para o período de 8h às 17h



Fonte: A autora.

Para quantificar a diferença, o Erro médio de polarização (rMBE) e a Variação do coeficiente da raiz do erro quadrático médio CV (RMSE) foram calculados. Para avaliação da iluminância interna, foram considerados quatro pontos de análise, com um total de 18 dados para cada, sendo nove valores de iluminância interna medidos e outros nove dados resultantes das simulações. A avaliação da irradiação interna se deu a partir de um ponto de análise, para a mesma quantidade de dados totais informada para a iluminância interna. Os resultados obtidos seguem sintetizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados obtidos para rMBE e CV (RMSE) para validação do modelo computacional

Ambiente de análise	Iluminância interna			Irradiação interna		
	Número de dados (n)	rMBE (%)	CV (RMSE) (%)	Número de dados (n)	rMBE (%)	CV (RMSE) (%)
DCS-401	72	-6,9	17,1	18	-0,5	8,3
DCS-437	72	-13,8	12,6	18	-1,8	3,4
PLI	72	13,8	12,8	18	-9,31	9,9
DEM-403	72	-6,0	5,2	18	10,0	8,4
DEM-415	72	5,6	10,7	18	-1,4	10,1
DPO	72	4,3	5,8	18	4,1	7,2

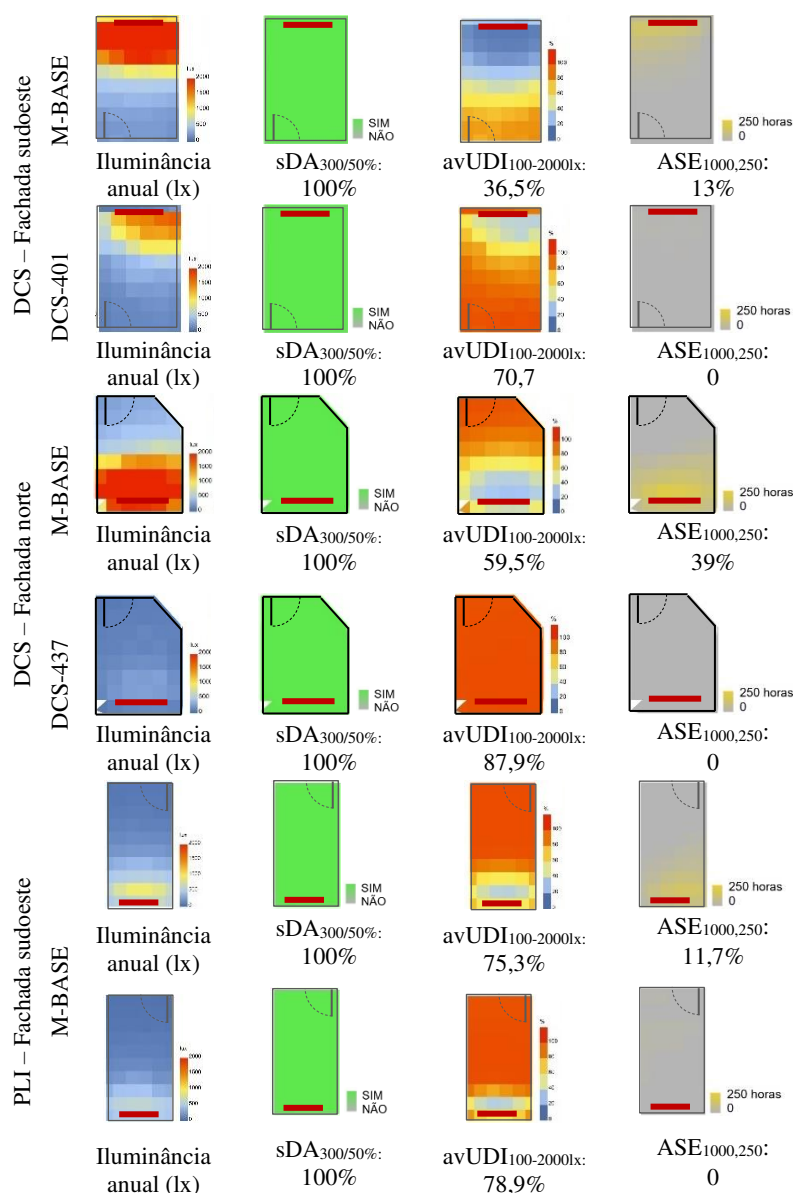
Fonte: A autora.

A confrontação entre os dados obtidos nas medições de campo e os resultados das simulações computacionais demonstram que os valores e a distribuição das iluminâncias internas, bem como da irradiação interna apresentam equivalências entre os dados medidos e simulados, indicando que os modelos são capazes de gerar dados realistas. Considerando, ainda, os parâmetros verificados na literatura, pode-se inferir que a distância entre os dados medidos e aqueles simulados nesta validação estão dentro dos limites aceitáveis.

4.3.2. Admissão e distribuição da luz do dia e exposição à luz solar

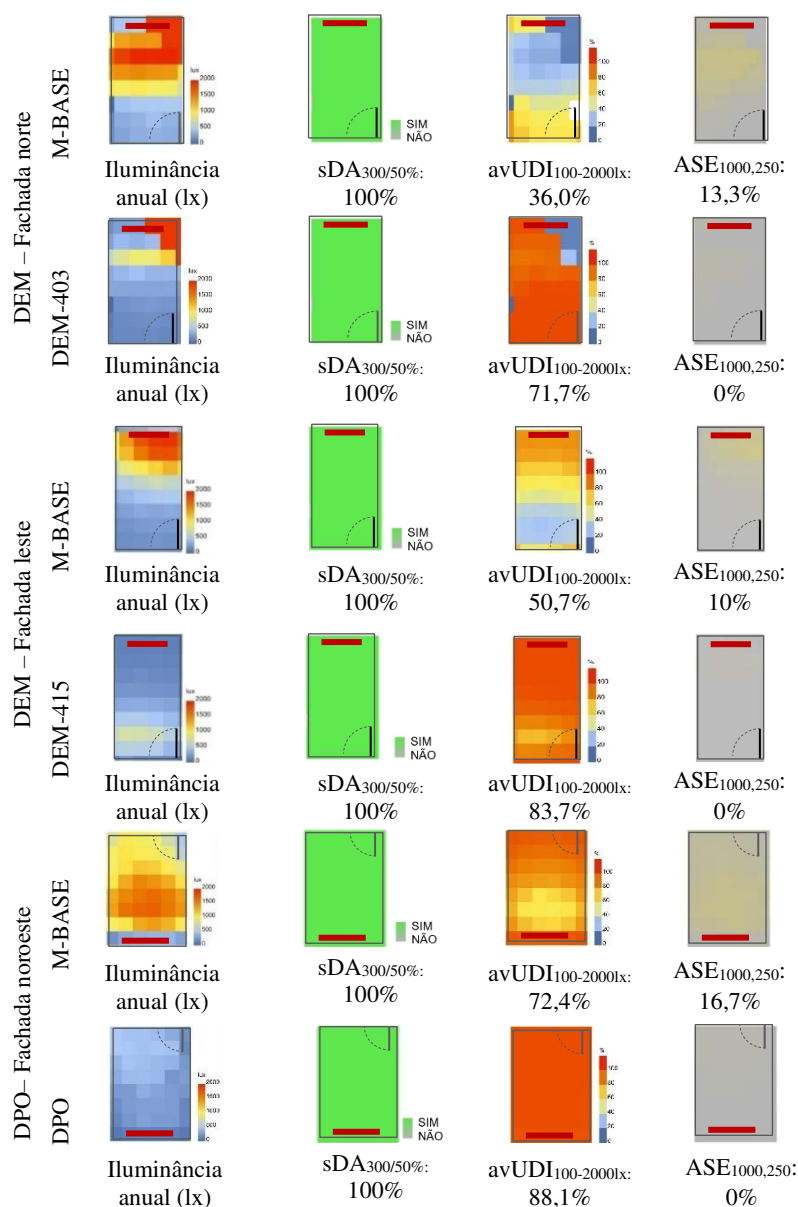
Uma vez validados os modelos de simulação, eles foram utilizados para analisar o desempenho da luz do dia para cada um dos ambientes avaliados e seus respectivos modelos base, para uma condição sem elemento de controle solar instalado. Estas simulações tiveram como objetivo identificar o desempenho observado para elementos de controle solar do tipo *brise* e do tipo painel microperfurado, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Visualização dos resultados obtidos para dispositivos de sombreamento do tipo *brise*



Fonte: A autora.

Figura 15 – Visualização dos resultados obtidos para dispositivos de sombreamento do tipo painel microperfurado



Fonte: A autora.

Numa perspectiva anual, os maiores níveis de iluminância foram observados próximo às aberturas, como já esperado. Em alguns casos, como ocorre nas fachadas com orientação norte, leste e sudoeste estes valores chegam a atingir 2.000lx, em um contexto sem dispositivo de sombreamento. Para o ambiente DPO (Diretoria de Projetos e Obras), orientado para noroeste, foi verificada, ainda, alta incidência solar no centro sala, com níveis obtidos em torno de 1500lx. Ainda quanto aos modelos base, para os resultados da iluminância média foram obtidos níveis em torno de 1.000lx, à exceção do ambiente PLI (Prédio das Licenciaturas), orientado para sudoeste. Este resultado é decorrente das características da edificação que apresenta um sistema de sombreamento que associa o dispositivo de proteção ao autossombreamento.

Os resultados das simulações computacionais apontam que a inserção do elemento de controle solar afetou a forma como a luz do dia penetra o ambiente, sendo responsável pela redução dos níveis de iluminância internos, sobretudo próximo às aberturas. De modo geral, estes cenários reduziram os níveis médios de iluminância interna em 54,6% para os ambientes com elementos de proteção do tipo *brise* e 66,5% para elementos do tipo painel microperfurado, à exceção de DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem), em que a presença do dispositivo não foi suficiente para impedir a expressiva admissão da luz do dia. Destaca-se o índice obtido para o ambiente DPO (Diretoria de Projetos e Obras), para o qual esta diminuição chegou a 81,6% em relação ao modelo base.

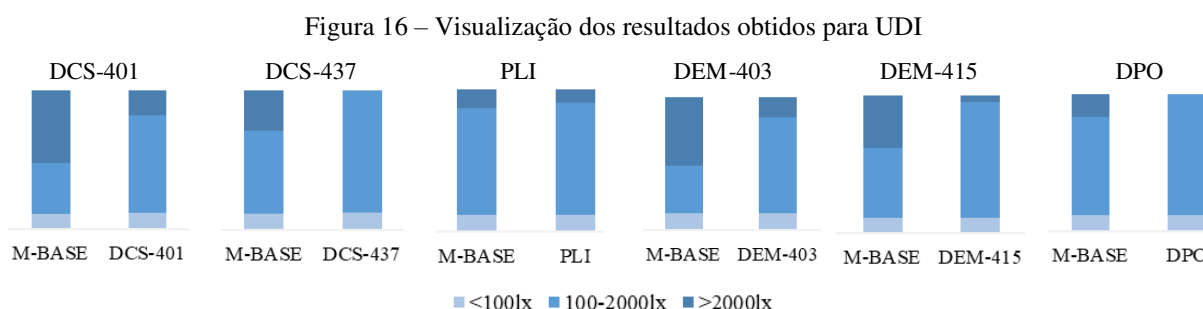
Nestes cenários, foram percebidos maiores níveis de iluminância interna nos ambientes com painel microperfurado, em comparação com as salas com *brises*. Esta condição foi verificada tanto nos contextos de simulação computacional quanto nas medições realizadas. A lacuna de desempenho verificada para os painéis poderia ser explicada pelas características formais de cada um e o modo como estão instalados nas envoltórias das edificações, o que interfere no bloqueio e na difusão da luz solar direta. O painel microperfurado bloqueia uma parte da luz pela superfície não perfurada, mas não permite sua difusão e, além disso, o brilho pode ser causado pela luz solar através do orifício. O princípio de sombreamento do *brise* implica na reflexão da luz solar direta pelas aletas para o elemento adjacente ou para o espaço interno para reduzir o brilho.

Outro ponto a ser destacado nestas análises é a condição de instalação destes dispositivos, quanto à proteção total ou parcial das aberturas. Se por um lado os painéis garantem apenas um bloqueio parcial, por estarem situados acima do nível dos peitoris das janelas, os *brises* recobrem completamente a abertura. Isto impacta diretamente a admissão da luz do dia e, por consequência, os níveis de iluminância internos.

Se considerarmos o nível de iluminância requerido para ambientes do tipo “Salas dos professores”, para os quais é indicado 300lx conforme o item 5 da NBR ISSO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), apenas os ambientes de análise DCS-401 (Departamento de Ciências Sociais) e DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem) atingiram esta margem.

Esta redução nos níveis internos de iluminância, contudo, não interferiu nos resultados verificados para sDA, que reproduziram aqueles já observados para os modelos base. Em ambos os cenários, 100% do espaço apresentou um valor mínimo de iluminância de 300lx em pelo menos 50% das horas ocupadas.

A avaliação da Iluminância útil da luz do dia (UDI) retornou valores superiores a 2000lx para os ambientes de análise DCS-401 (Departamento de Ciências Sociais) e DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem), em cenários sem dispositivos de sombreamento. Para as demais salas, que já apresentavam maiores índices de UDI no intervalo de 100-2000lx, estes percentuais foram aumentados em pelo menos 21,5%, após a inserção do elemento de controle solar. Destaca-se, como exceção, o ambiente PLI (Prédio das Licenciaturas), com aumento de cerca de 5%. A Figura 16 apresenta a comparação entre os resultados verificados para os modelos bases e os cenários com dispositivos de proteção instalados.

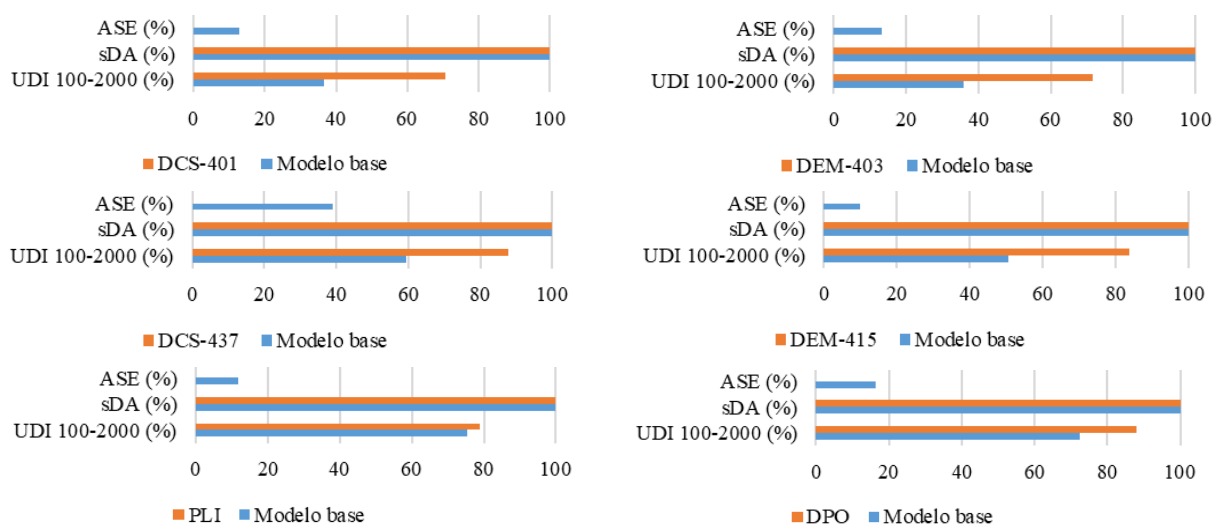


Fonte: A autora.

Os níveis de exposição solar (ASE), por sua vez, foram baixos no cenário base, com maior valor observado em DCS-437 (Departamento de Ciências Sociais) que atingiu 39%. É possível visualizar que a inserção do dispositivo de sombreamento reduziu completamente o desconforto visual devido à incidência de radiação solar direta. Analisando os gráficos, pode-se verificar, ainda, que todos os cenários apresentam percentual máximo de $sDA_{300/50\%}$, com 100%. Portanto, este indicador não foi sensível à instalação dos sistemas de sombreamento. Embora as condições com elementos de controle solar tenham reduzido a admissão da luz natural no interior dos ambientes, esta diminuição não foi suficiente para impactar os níveis mínimos de iluminância requeridos.

A seguir, a Figura 17 ilustra a comparação entre os valores de sDA , UDI e ASE obtidos para os ambientes de análise e os modelos de linha de base de cada uma das salas. Os desempenhos anuais apontaram o impacto favorável da inserção destes dispositivos de sombreamento nos resultados verificados para $UDI_{100-2000}$ e $ASE_{1000.250}$. Para todos os cenários avaliados houve aumento dos percentuais do primeiro indicador nesta faixa ou reenquadramento do desempenho verificado, para os casos em que a avaliação do modelo base refletiu índices superiores a 2000lx. De modo geral, observou-se valores superiores a 71%, com destaque para o ambiente DPO (Diretoria de Projetos e Obras), com um valor final de $UDI_{100-2000lx}$ de 88,1%.

Figura 17 – Comparação do desempenho dos elementos de controle solar



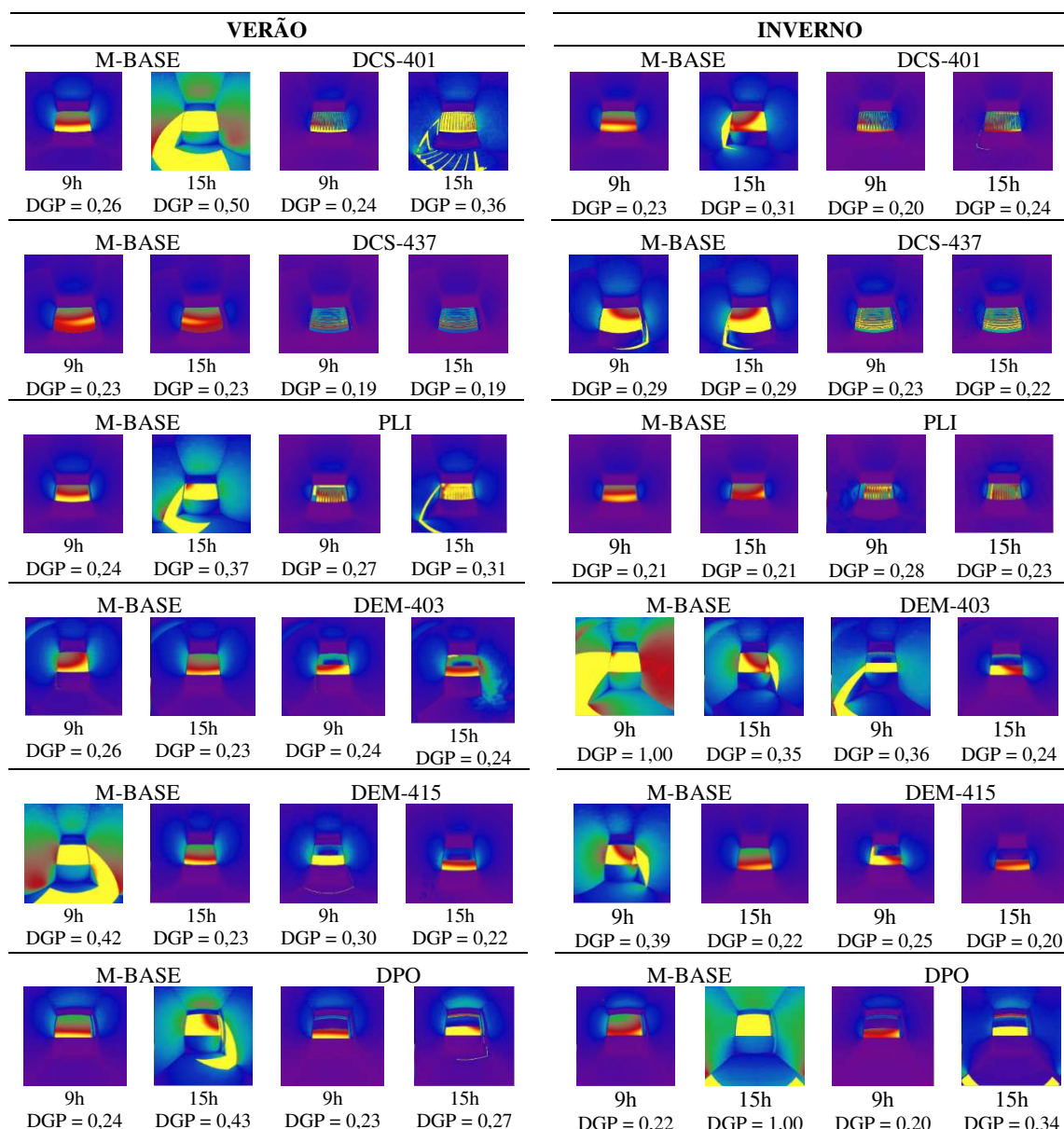
Fonte: A autora.

4.3.3. Proteção contra ofuscamento

Nesta seção, o desempenho dos ambientes naturalmente iluminados se destina à probabilidade de ofuscamento ao longo do ano. Para os modelos base, as análises demonstraram que as maiores probabilidades de ofuscamento foram verificadas nos ambientes orientados a sudoeste (DCS-401), norte (DEM-403) e noroeste (DPO). Níveis de brilho intolerável ($DGP < 0,45$) foram apurados para o período da tarde no ambiente DCS-401 (Departamento de Ciências Sociais), para a análise de verão. Em contrapartida, estes resultados foram observados para o inverno, nas investigações dos outros dois ambientes. A fachada orientada para norte apresentou limites intoleráveis em 70% do período avaliado (8 às 14 horas), enquanto que, para a face noroeste, este índice atingiu 50% (13 às 17 horas).

Para exemplificar o efeito da redução do brilho, a Figura 18 apresenta mapas de iluminância obtidos para estes ambientes. De modo geral, a incorporação de dispositivos de sombreamento às fachadas resultou na redução da probabilidade de ocorrência de ofuscamento, com valores de DGP predominantemente inferiores a 0,34, sobretudo para os ambientes com dispositivos de sombreamento do tipo *brise*. Destaca-se negativamente a sala do prédio da DPO pois, neste caso, até mesmo o emprego do dispositivo de sombreamento não foi capaz de atenuar completamente o brilho, apresentando valores de DGP superiores a 0,34 no final da tarde. Para este ambiente foi verificada, ainda, a maior probabilidade de ofuscamento à luz do dia em um contexto anual. Em um cenário sem elemento de proteção, os índices intoleráveis foram verificados entre os meses de fevereiro a novembro e reduzidos aos meses de abril a agosto com a instalação do dispositivo de sombreamento.

Figura 18 – Mapas de iluminância obtidos, para os horários de 9h e 15h



Fonte: A autora.

Em termos de conforto visual, junho é um dos meses mais críticos para os ambientes com orientações norte (DCS-437 e DEM-403) e noroeste (DPO) e janeiro para os ambientes orientados para leste (DEM-415) e sudoeste (DCS-401 e PLI), sendo que para o primeiro mês foi verificada maior ocorrência de DGP superior a 0,45. As horas de desconforto ofuscante de junho refletem a maior admissão da luz do dia nos ambientes porque no inverno o ângulo de altitude solar é menor que no verão.

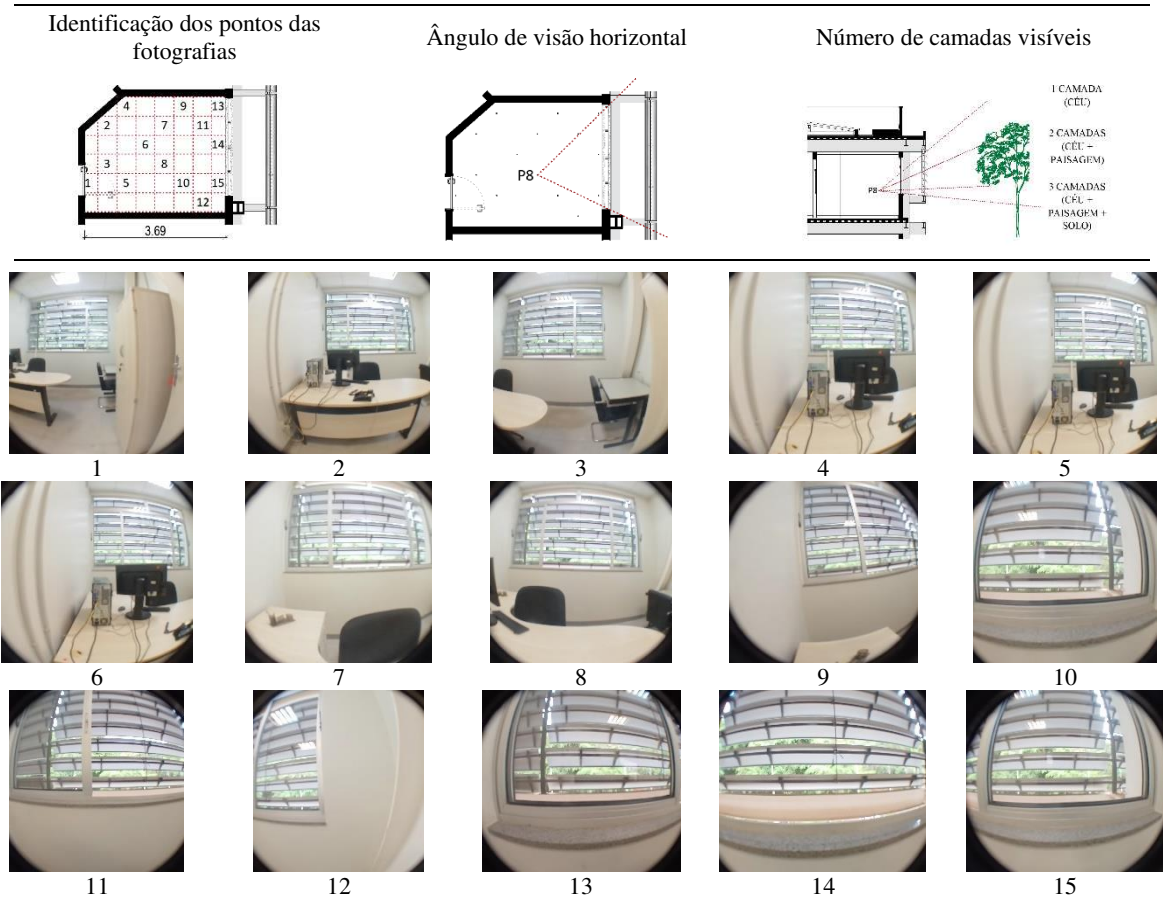
Conclui-se que a instalação do dispositivo de sombreamento refletiu em melhores índices de DGP, com 87% dos resultados de verão e 93% dos resultados de inverno com níveis de brilho imperceptível. Contudo, para o verão foram verificados valores superiores a 0,45 (brilho

intolerável) para o ambiente DCS-401 (Departamento de Ciências Sociais) e, para o inverno, para o ambiente DPO (Diretoria de Projetos e Obras), demonstrando que, nestes casos, os dispositivos não foram capazes de bloquear a incidência da luz direta suficientemente.

4.3.4. Vista externa

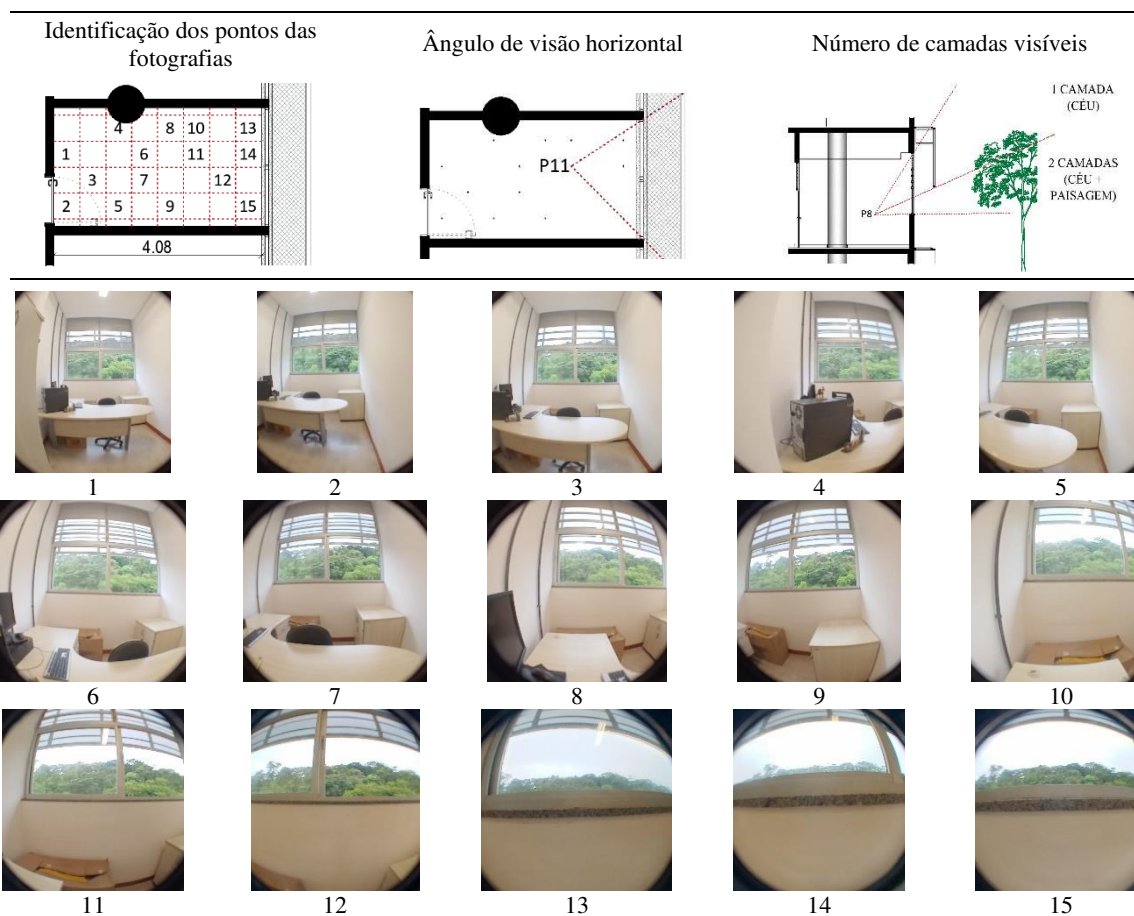
A análise da qualidade da visão foi realizada a partir dos critérios de desempenho ângulo de visão horizontal, distância até obstruções e número de camadas de visão. Para o primeiro critério, considerando-se os *brises* verticais, com pouca distância entre eles, a soma das aberturas foi considerada como uma única, conforme previsto na EN 17037 (CEN, 2018). Para o segundo, a medida da distância até obstruções considerou um ponto central da janela, desobstruído, pois a norma não define um ponto específico para análise. As Figuras 19 e 20 apresentam um exemplo das visadas selecionadas para os ambientes de análise DCS-437 e DEM-403.

Figura 19 – Procedimentos de avaliação para análise da vista externa – método de projeção (DCS-437)



Fonte: acervo da autora. Jan/2024.

Figura 20 – Procedimentos de avaliação para análise da vista externa – método de projeção (DEM-403)



Fonte: acervo da autora. Jan/2024.

De modo geral, comparando-se os modelos base com os cenários com dispositivo de sombreamento instalado, houve pouca variabilidade dos ângulos de visão horizontal para os ambientes com elementos de controle do tipo painel microperfurado. Este fato possivelmente se justifica pelo seu posicionamento, acima do nível de visão avaliado. Esta condição também foi observada para o ambiente com *brise* horizontal (DCS-437). Por outro lado, para as salas com *brises* verticais (DCS-401 e PLI), houve uma redução expressiva dos mesmos, que passaram de valores predominantemente superiores a 28° para índices que, majoritariamente, foram inferiores a 14°. Nestes casos, ainda que a vista externa não tenha sido obstruída pela existência de edificações ao redor, os baixos ângulos verificados refletem a condição de instalação (ângulo dos *brises*) e a opacidade do material.

Considerando que os seis ambientes deste estudo possuem dimensões aproximadas, a avaliação das condições de desempenho da visualização revelou que os pontos de grade apresentam ângulos de visão que variam de 27° a 162° e possuem uma distância externa de visão predominante de 50m (50% dos casos), para os modelos base. Os ambientes de análise

DCS-437 e PLI apresentaram as menores distâncias de visualização em razão da existência de obstruções mais próximas, sendo vegetação para o primeiro caso e edificação para o segundo. Isto demonstra o impacto das características urbanas na obstrução das visualizações.

Durante a análise do número de camadas de visualização foi possível identificar o predomínio de duas camadas para todos os cenários avaliados. Para salas com pouca profundidade é admirável que, na maioria delas, o solo não possa ser visto a partir dos pontos avaliados, mesmo quando se está próximo às aberturas. Isto mostra o impacto das soluções construtivas na visualização de cada camada, para estes casos, sobretudo a interferência da altura dos peitoris das janelas. Esta avaliação está apresentada na Tabela 5.

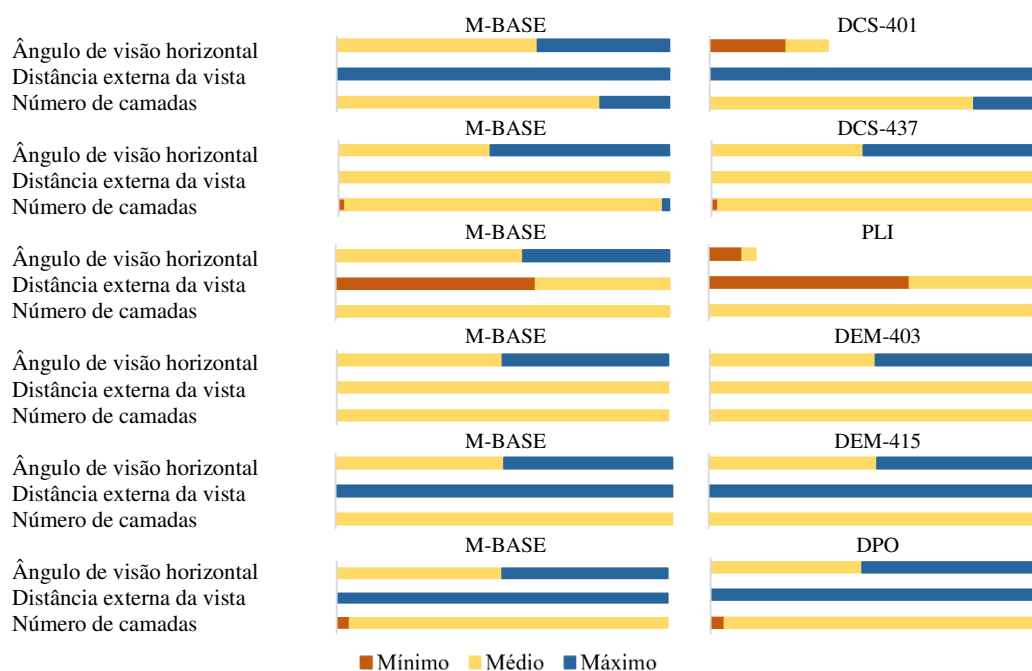
Tabela 5 – Avaliação quantitativa da vista externa segundo CEN (2018) e ABNT (2023)

	Ambiente	Ângulo de visão horizontal (°)	Distância externa de visão (m)	Número de camadas visíveis	Nível de recomendação
DCS-401	M-BASE	≥ 28	≥ 50	2	Médio
	DCS-401	$<14^\circ$	≥ 50	2	Mínimo
DCS/437	M-BASE	≥ 28	≥ 20	2	Médio
	DCS/437	≥ 28	≥ 20	2	Médio
PLI	M-BASE	≥ 28	≥ 6	2	Médio
	PLI	$<14^\circ$	≥ 6	2	Mínimo
DEM-403	M-BASE	≥ 28	≥ 20	2	Médio
	DEM-403	≥ 28	≥ 20	2	Médio
DEM-415	M-BASE	≥ 28	≥ 50	2	Médio
	DEM-415	≥ 28	≥ 50	2	Médio
DPO	M-BASE	≥ 28	≥ 50	2	Médio
	DPO	≥ 28	≥ 50	2	Médio

Fonte: A autora

Os resultados apontam que o nível percebido de vista externa foi predominantemente médio, de acordo com as diretrizes estabelecidas na EN 17037 (CEN, 2018), à exceção dos ambientes DCS-401 e PLI, que apresentaram um nível mínimo. De modo geral, o desempenho de visualização verificado satisfaz as condições de análise, pois todo o espaço tem acesso de visualização. A Figura 21 sintetiza os resultados obtidos para os três critérios analisados, para cada cenário.

Figura 21 – Avaliação pelo método de projeção de acordo com CEN (2018) e ABNT (2023)



Fonte: A autora.

4.4. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a investigação do desempenho observado para elementos de controle solar do tipo painel microperfurado e tipo *brise*, em contexto real, dadas as condições do céu de Viçosa, Minas Gerais. Este estudo teve como objetivo conceber e aplicar um fluxo de trabalho para avaliação do desempenho de dispositivos de sombreamento já instalados, usando métodos de processo de projeto computacional.

Para tanto, este estudo foi conduzido por meio de uma metodologia de confrontação entre os dados obtidos nas medições de campo e os resultados das simulações computacionais. Neste sentido, destaca-se o envolvimento de processos de análise com processo de projeto arquitetônico, para entender como as características do material impactam o desempenho verificado.

Embora o número de indivíduos usados como amostra seja pequeno, os resultados demonstram que a adição de dispositivos de sombreamento às fachadas oferece uma oportunidade para redução simultânea na transmissão de radiação e na probabilidade de ofuscamento, bem como uma maior capacidade de controle da iluminação natural. As principais conclusões desta investigação seguem listadas:

- De modo geral, a inserção do dispositivo de sombreamento reduziu os níveis médios de iluminância interna em 54,6% para os ambientes com elementos de proteção do tipo *brise* e 66,5% para elementos do tipo painel microperfurado.
- Nestes casos, ainda que os valores anuais indicam que mais de 50% do espaço da sala recebe uma média de 300lx durante o horário laboral, os níveis atingidos atendem ao disposto em norma quanto à iluminância interna mínima para este tipo de ambiente apenas para os cenários de análise DCS-401 (Departamento de Ciências Sociais) e DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem). Para estes cenários, a melhoria do desempenho luminoso refletiu a melhor distribuição da luz do dia, com valores de $UDI_{100-2000lx}$ predominantemente superiores a 71%.
- Pela avaliação do $ASE_{1000.250}$ é possível visualizar que a inserção do dispositivo de sombreamento reduziu completamente o potencial de desconforto visual devido à incidência de radiação solar direta. Quanto ao $sDA_{300/50\%}$, verificou-se que este indicador não foi sensível à instalação dos sistemas de sombreamento.
- A instalação dos elementos de controle solar garantiu a redução da probabilidade de ocorrência de ofuscamento, com 87% dos resultados de verão e 93% dos resultados de inverno com níveis de brilho imperceptível. Em relação ao conforto visual, junho é um dos meses mais críticos para ambientes orientados para norte e noroeste e janeiro para os ambientes orientados para leste e sudoeste, sendo que para o primeiro mês foi verificada maior ocorrência de DGP superior a 0,45.
- O nível de vista externa percebido foi predominantemente médio, considerando os modelos base e os cenários com dispositivos de sombreamento instalados. A inserção do elemento de controle solar não impactou os valores obtidos para a distância até obstruções e para o número de camadas, contudo, reduziu em até 81,5% o ângulo de visão horizontal nos cenários com elementos do tipo *brise* vertical.
- Comparando-se as geometrias dos elementos de controle solar, dispositivos do tipo *brise* garantiram uma distribuição mais uniforme da luz do dia, contudo, menores níveis de vista externa máximos, devido à sua opacidade.
- A influência das condições de instalação pôde ser claramente observada nas avaliações dos ambientes, com maior admissão da luz do dia nos cenários com dispositivos do tipo painel, sobretudo próximo às aberturas. Comparativamente, para ambientes orientados a norte, as simulações resultaram em níveis médios de

iluminância de cerca de 155lx para DCS-437 (Departamento de Ciências Sociais) (*brise*) e aproximadamente 480lx para DEM-403 (Departamento de Medicina e Enfermagem) (painel microperfurado).

- O conjunto de todos os resultados analisados sugere que a incorporação de dispositivo de sombreamento apresentou o melhor desempenho no ambiente DEM-415 (Departamento de Medicina e Enfermagem). O painel instalado foi capaz de reduzir os níveis de iluminância internos e anular a ocorrência de ofuscamento na sala, ao mesmo tempo que não gerou interferências no acesso à vista externa.

Quanto às limitações deste trabalho, embora tenha se confirmado que os modelos foram capazes de gerar dados realistas, deve-se considerar que as coletas foram reduzidas a quatro locais, conforme a quantidade de equipamento disponível. Para melhoria da estratégia de monitoramento seria necessário o aumento do número de pontos de medição, de modo a garantir uma malha de resultados em consonância com a ABNT NBR 15215:4 (ABNT, 2023).

As condições experimentais se limitaram às configurações da edificação, do ambiente avaliado e do sistema de proteção solar, para as simulações computacionais. Não foram consideradas, portanto, as configurações do contexto dos edifícios tendo em vista que as edificações do entorno, bem como massas vegetadas próximas, não projetavam sombras nas fachadas avaliadas. Contudo, avaliar a possibilidade do impacto da luz solar refletida por estes obstáculos pode ser uma complementação desta pesquisa.

Este trabalho apresentou os resultados obtidos nas simulações, mas não analisou a influência e o efeito da variação do valor de cada um dos parâmetros empregados no desempenho verificado. Sabendo qual parâmetro influenciou qual indicador da luz natural, pesquisas futuras incorporando diferentes variáveis e objetivos podem ser realizadas de forma mais completa.

Para esta pesquisa, a avaliação da distância das obstruções foi realizada considerando apenas um ponto central da janela. Pesquisas futuras também poderiam explorar análises de vista externa que considerem cálculos desta distância a partir de múltiplos pontos na superfície da janela, para avaliação do impacto destes resultados na qualidade da vista externa.

REFERÊNCIAS

- ALSHARIF, R. *et al.* Multi-objective optimization of shading devices using ensemble machine learning and orthogonal design of experiments. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 283, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112840>. Acesso em: 29 jan. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 15220-3**. Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- _____. **ABNT NBR 15215-4**. Iluminação natural. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- _____. **ABNT NBR 15215-3**. Iluminação natural. Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1**. Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- AYOUB, M. 100 Years of daylighting: A chronological review of daylight prediction and calculation methods. **Solar Energy**, [s. l.], v. 194, n. August, p. 360–390, 2019. Acesso em: 29 jan. 2023.
- BAZAZZADEH, H. *et al.* Efficient shading device as an important part of daylightophil architecture; a designerly framework of high-performance architecture for an office building in Tehran. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 24, p. 1-26, 2021. Acesso em: 29 jan. 2023.
- BOURNAS, I. Swedish daylight regulation throughout the 20th century and considerations regarding current assessment methods for residential spaces. **Building and Environment**, [s. l.], v. 191, n. December 2020, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107594>. Acesso em: 29 jan. 2023.
- CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 67–82, 2018. Acesso em: 29 jan. 2023.
- CEN. EN 17037:2018 - Daylight of Buildings. **Comité Européen de Normalisation**, [s. l.], p. 1–62, 2018.
- CHI, D. A.; MORENO, D.; NAVARRO, J. Design optimisation of perforated solar façades in order to balance daylighting with thermal performance. **Building and Environment**, [s. l.], v. 125, p. 383–400, 2017. Acesso em: 29 jan. 2023.
- DE LUCA, F.; SEPÚLVEDA, A.; VARJAS, T. Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. **Building and Environment**, [s. l.], v. 217, n. April, p. 1-17, 2022. Acesso em: 29 jan. 2023.
- DOMJAN, S.; ARKAR, C.; MEDVED, S. Study on occupants' window view quality vote and their physiological response. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 68, p. 1-17, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106119>. Acesso em: 29 out. 2023.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA.** 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

FAN, Z.; LIU, M.; TANG, S. A multi-objective optimization design method for gymnasium facade shading ratio integrating energy load and daylight comfort. **Building and Environment**, [s. l.], v. 207, n. PB, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108527>. Acesso em: 29 jan. 2023.

GRONDZIK, W. T.; KWOK, A. G. **Mechanical and electrical equipment for buildings.** 13. ed. Hoboken: Wiley, 2019.

HUO, H. *et al.* Field comparison test study of external shading effect on thermal-optical performance of ultralow-energy buildings in cold regions of China. **Building and Environment**, [s. l.], v. 180, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106926>. Acesso em: 29 jan. 2023.

KHEIRI, F. Optimization of building fenestration and shading for climate-based daylight performance using the coupled genetic algorithm and simulated annealing optimization methods. **Indoor and Built Environment**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 195–214, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1420326X19888008>. Acesso em: 30 jan. 2022.

KHIDMAT, R. P. *et al.* Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, n. February, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104241>. Acesso em: 29 jan. 2023.

KIRIMTAT, A. *et al.* Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. **Solar Energy**, [s. l.], v. 185, n. March, p. 100–111, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.048>. Acesso em: 29 jan. 2023.

KIRIMTAT, A. *et al.* Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 23–49, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020> Acesso em: 29 jan. 2024.

KOÇ, S. G.; MAÇKA KALFA, S. The effects of shading devices on office building energy performance in Mediterranean climate regions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 44, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102653>. Acesso em: 29 jan. 2023.

KUHN, T. E. State of the art of advanced solar control devices for buildings. **Solar Energy**, [s. l.], v. 154, p. 112–133, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.044>. Acesso em: 29 jan. 2023.

LAKHDARI, K.; SRITI, L.; PAINTER, B. Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. **Building and Environment**, [s. l.], v. 204, n. January, p. 1-17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>. Acesso em: 29 jan. 2023.

LIU, S. *et al.* Effectiveness of passive design strategies in responding to future climate change for residential buildings in hot and humid Hong Kong. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 228, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110469>. Acesso em: 29 out. 2023.

MACHADO, R. M. S. *et al.* Bioclimatic zoning for building performance using tailored clustering method and high-resolution climate data. **Energy and Buildings**, [s. l.], 311, p. 1-21, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114157>. Acesso em: 23 jul. 2024.

NAZARI, S. *et al.* Designing energy-efficient and visually-thermally comfortable shading systems for office buildings in a cooling-dominant climate. **Energy Reports**, [s. l.], 10, p. 3863-3881, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.10.062>. Acesso em: 11 out. 2023.

PEREIRA, C. D. *et al.* **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E): Florianópolis, 2015.

_____. Avaliação experimental do espectrômetro Alta II e sua aplicação na normatização brasileira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 197-2013, out./dez. 2017.

PIRAEI, F.; MATUSIAK, B.; LO VERSO, V. R. M. Evaluation and optimization of daylighting in heritage buildings: a case-study at high latitudes. **Buildings**, [s. l.], v. 12, p. 1-24, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12122045>. Acesso em: 11 out. 2023.

QIU, Z. *et al.* Identification of passive solar design determinants in office building envelopes in hot and humid climates using data mining techniques. **Building and Environment**, [s. l.], v. 196, n. February, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107566>. Acesso em: 20 jan. 2022.

RAFATI, N.; HAZBEI, M.; EICKER, U. Louver configuration comparison in three Canadian cities utilizing NSGA-II. **Building and Environment**, [s. l.], v. 229, n. December 2022, p. 1-17, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109939>. Acesso em: 11 out. 2023.

SAMADI, S. *et al.* A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. **Frontiers of Architectural Research**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 335-349, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.004>. Acesso em: 20 jan. 2022.

SEPÚLVEDA, A. *et al.* Assessing the applicability of the European standard EN 17037:2018 for office spaces in a cold climate. **Building and Environment**, [s. l.], v. 225, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109602>. Acesso em: 11 out. 2023.

SRISAMRANRUNGRUANG, T.; HIYAMA, K. Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF). **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 210, p. 1-14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109765>. Acesso em: 29 out. 2023.

VERMA, T.; GOPALAKRISHNAN, P. Categorising the existing irradiance based blind control occupant behavior models (BC-OBMs) using unsupervised machine learning approach: A case of office building in India. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 279, p. 1-15, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112700>Get rights and content. Acesso em: 29 out. 2023.

WACZYNSKA, M.; SOKOL, N.; MARTYNIUK-PECZEK, J. Computational and experimental evaluation of view out according to European Standard EN17037. **Building and Environment**, [s. l.], v. 188, p. 1-20, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107414>. Acesso em: 29 out. 2023.

WANG, Y.; YANG, W.; WANG, Q. Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 275, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112441>. Acesso em: 20 dez. 2022.

WEN, S. *et al.* Comparing the performance of four shading strategies based on a multi-objective genetic algorithm: A case study in a university library. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 63, n. PA, p. 1-21, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105532>. Acesso em: 20 out. 2023.

WU, H.; ZHANG, T. Multi-objective optimization of energy, visual, and thermal performance for building envelopes in China's hot summer and cold winter climate zone. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 59, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105034>. Acesso em: 10 abr. 2024.

YU, F.; WENNERSTEN, R.; LENG, J. A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching 'thermal-daylighting balance'. **Building and Environment**, [s. l.], v. 186, n. October, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107330>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ZANI, A. *et al.* Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 180, p. 1473-1483, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.310>. Acesso em: 10 fev. 2022.

5. ANÁLISE DOS EFEITOS DA INTEGRAÇÃO ENTRE MATERIAL, DESEMPENHO ESTRUTURAL E FORMA NA PROPOSIÇÃO DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR ESTÁTICOS

Resumo: A aplicação de estratégias de projeto passivas é essencial no estágio inicial do projeto arquitetônico para maximizar o aproveitamento da iluminação natural e, deste modo, minimizar o consumo de outras fontes de energia. Ao controlar a luz natural, é possível garantir sua distribuição de modo mais uniforme e reduzir os efeitos do brilho excessivo na visão dos usuários. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da integração do material, do desempenho estrutural da peça e de sua forma no desempenho luminoso verificado para dispositivos de proteção solar concebidos a partir de processos *form-finding*. A metodologia empregada foi baseada em uma abordagem quantitativa que usou simulações computacionais na concepção e otimização da geometria de elementos de controle solar do tipo *brise* e avaliação de desempenho luminoso destes dispositivos de proteção. Os resultados mostraram que a forma otimizada resultou em uma diminuição dos deslocamentos horizontais, na ordem de 34 a 60%, em comparação ao modelo de referência. Sugerem, ainda, que a integração do material, do desempenho estrutural do elemento e de sua forma ao fluxo de trabalho para avaliação do desempenho luminoso de dispositivos de proteção solar implica em melhores índices para os indicadores UDI, com valores próximos a 80% na faixa 100-2000lx e DGP.

Palavras-chave: Desempenho estrutural. *Brise-soleil*. Iluminação natural. Processos *form-finding*.

5.1. INTRODUÇÃO

O sistema de sombreamento exerce uma importante função na eficiência das edificações, sendo uma das estratégias mais utilizadas para melhoria do desempenho das envoltórias (Kirimtat *et al.*, 2016). Por um lado, permite o controle da irradiação solar direta e atenua os efeitos da exposição à luz solar de alta intensidade no verão, o que reduz as cargas internas de calor e a dependência de sistemas de ar condicionado (Liu *et al.*, 2020; Hakimazari *et al.*, 2024). Por outro, garante a admissão de quantidades adequadas de luz natural difusa, propiciando uma distribuição mais uniforme dos níveis de iluminância e aumentando, assim, o conforto dos usuários (Khidmat *et al.*, 2022).

A aplicação de dispositivos de sombreamento pode contribuir, portanto, para a melhoria da eficiência luminosa e energética das edificações. Contudo, garantir uma adequada iluminação dos espaços internos em regiões de trópicos apresenta desafios devido à natureza dinâmica do céu tropical (Al-Obaidi *et al.*, 2017), com mudanças repentinas de nebulosidade e, consequentemente, dos níveis de iluminância nos ambientes internos (Al-Obaidi *et al.*, 2015).

Com o propósito de englobar diferentes condições de céu, os elementos de controle solar exibem, usualmente, diferentes morfologias que variam de estáticas ou fixas a configurações ajustáveis ou cinéticas. Em estudo desenvolvido por Al-Masrani *et al.* (2018) para proteções solares em regiões tropicais, foram propostos padrões de classificação para estes

dispositivos com base no conceito do processo de projeto, aprimoramento tecnológico e interesses atuais no campo da arquitetura. Segundo os autores, dispositivos de sombreamento fixos são elementos estáticos em termos de suas geometrias, cuja forma pode ser concebida a partir de processos de projeto convencionais, estocásticos e modelos paramétricos.

Especificamente quanto a abordagens paramétricas, esta metodologia utiliza processos de projeto algorítmico-paramétricos para desenvolver diferentes padrões. Esta vertente de modelagem, combinada às ferramentas de simulação computacional, tem possibilitado a criação de soluções arquitetônicas que correspondam a um melhor desempenho do edifício e permitido uma ampla exploração da forma no processo de projeto.

Para exemplificar esta abordagem na proposição e análise de elementos de controle solar externos fixos, para cenários brasileiros, Cartana, Pereira e Mayer (2018) conduziram um estudo para análise da transmissão da radiação solar, do desempenho luminoso e da capacidade de redução do ofuscamento de painéis com formas complexas, desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. A proposição e a análise de *brises* horizontais e verticais foram foco do trabalho de Venâncio (2020), cujo objetivo era desenvolver e testar modelos paramétricos para serem utilizados ainda nas fases iniciais do projeto de proteções solares. E Leone e Florio (2021) ampliaram a condução dos estudos, avaliando *brises* horizontais propostos para fachadas de diferentes orientações, com o objetivo de investigar o desempenho da iluminação natural e da insolação de edifícios não ortogonais durante o processo de projeto.

Pesquisas conduzidas a partir de modelagem algorítmico-paramétrica refletem como o avanço tecnológico e as técnicas de uso das ferramentas computacionais potencializaram a dimensão experimental e a investigação projetual a partir dos anos 2000. As abordagens emergentes de processos de projeto baseados em computação diferem significativamente das anteriores, pois fundamentam a representação do processo de projeto em sua lógica computacional em detrimento de seus aspectos geométricos (Caetano; Leitão, 2020). Isto possibilita que os projetos arquitetônicos tirem vantagens destes métodos, empregando o desempenho para guiar a definição da forma final.

Este contexto permitiu que a forma fosse encontrada através das relações entre o material, sua estrutura e o desempenho verificado, típicas de processos *form-finding*, foco deste trabalho. Para esta pesquisa, estes processos são abordados como a investigação do projeto arquitetônico com a finalidade de atender aos critérios predeterminados de desempenho do

edifício, por meio da otimização computacional e com o objetivo de gerar informações suficientes para auxiliar as tomadas de decisão (Ekici *et al.*, 2019).

Verificou-se na literatura que alguns trabalhos focaram na concepção e avaliação de elementos de controle solar a partir do emprego de processos *form-finding*, em investigações direcionadas ao desempenho luminoso e energético e ao acesso à vista externa. Zani *et al.* (2017) desenvolveram um estudo de dispositivos de concreto de alto desempenho, caracterizados por formas curvas e complexas. No trabalho de Khidmat *et al.* (2022), o metal expandido foi utilizado como material de construção e a definição da geometria do elemento de proteção foi avaliada a partir de critérios relacionados às dimensões do modelo e a parâmetros do próprio material. Métodos combinados de processos *form-finding* foram adotados por Pouyanmehr *et al.* (2022) para concepção de um dispositivo de sombreamento conformado por persianas externas.

Ainda que o modo de se conceber a forma do elemento de controle solar varie nestes trabalhos, o que estudos como estes vêm apresentando em comum é a concepção e, por vezes, otimização da geometria do dispositivo baseada apenas em simulações computacionais voltadas ao seu desempenho luminoso, térmico e/ou energético, sem considerar a relação entre o desempenho estrutural da peça e a forma final obtida.

Ao investigar o comportamento de elementos de controle solar, o objetivo desta pesquisa é avaliar os efeitos da integração do material, do desempenho estrutural da peça e de sua forma no desempenho luminoso verificado para dispositivos de proteção solar concebidos a partir de processos *form-finding*. Deste modo, têm-se a junção de abordagens diferentes sobre uma ação projetual que, sob o ponto de vista do conforto, analisa o desempenho luminoso e, quanto à materialidade, investiga o uso e a otimização do material empregado.

Diferente destas pesquisas, este trabalho avalia proteções solares em clima tropical de baixa latitude. Para tanto, são concebidos e analisados dispositivos de sombreamento do tipo *brise*, aplicados a um ambiente de escritório localizado em edificação da Universidade Federal de Viçosa, em Minas Gerais.

Deste modo, este estudo foi conduzido a partir de um experimento com foco em um fluxo de trabalho baseado em um código para obtenção e otimização do elemento de proteção, cuja geometria foi desenvolvida a partir de simulações que adicionaram o desempenho estrutural da peça aos critérios luminosos. Para tanto, foram avaliados diferentes cenários de proteção solar e comparados os resultados de desempenho luminoso obtidos. Considerou-se um

cenário base (sem dispositivo de proteção), a condição existente (dispositivo do tipo painel microperfurado) e cenários com dispositivos do tipo *brise*, sendo um elemento opaco de referência (desenvolvido como uma curva de forma livre a partir do modelador 3D *Non-uniform rational basis spline* - NURBS), uma variação perfurada desta peça e três modelos otimizados.

Como resultado, a análise destes dispositivos mostrou que a integração do material, do desempenho estrutural da peça e de sua forma durante a proposição de elementos de controle solar gerados a partir de processos *form-finding* pode contribuir positivamente no desempenho da luz do dia. Neste sentido, a principal contribuição desta pesquisa é incorporar a dimensão material do dispositivo de sombreamento ao processo de investigação de seu desempenho luminoso.

5.1.1. O desempenho estrutural do elemento

A verificação do desempenho estrutural das aletas foi realizada a partir de ferramentas de análise e otimização estrutural da forma. A otimização de um modelo implica na melhor combinação de parâmetros que resulta no desempenho ideal dos padrões desenvolvidos. Significa, deste modo, encontrar a(s) melhor(es) solução(ões) em um conjunto de alternativas viáveis, ou seja, aquelas que satisfazem todas as restrições impostas (Arora, 2015).

Segundo Bendsøe e Sigmund (2003), a otimização estrutural pode ser abordada a partir de três aspectos: otimização dimensional, da forma e topológica. O primeiro busca definir as dimensões da estrutura que reduzam seu custo de fabricação ou peso, sendo que sua principal característica é que o domínio do modelo de projeto e das variáveis de estado é conhecido *a priori* e é fixo durante todo o processo de otimização. O objetivo do segundo é encontrar a forma ótima deste domínio, ou seja, a forma é definida em um domínio variável de projeto. Por fim, o terceiro tem por objetivo estabelecer a distribuição ótima de material que minimize a flexibilidade da estrutura.

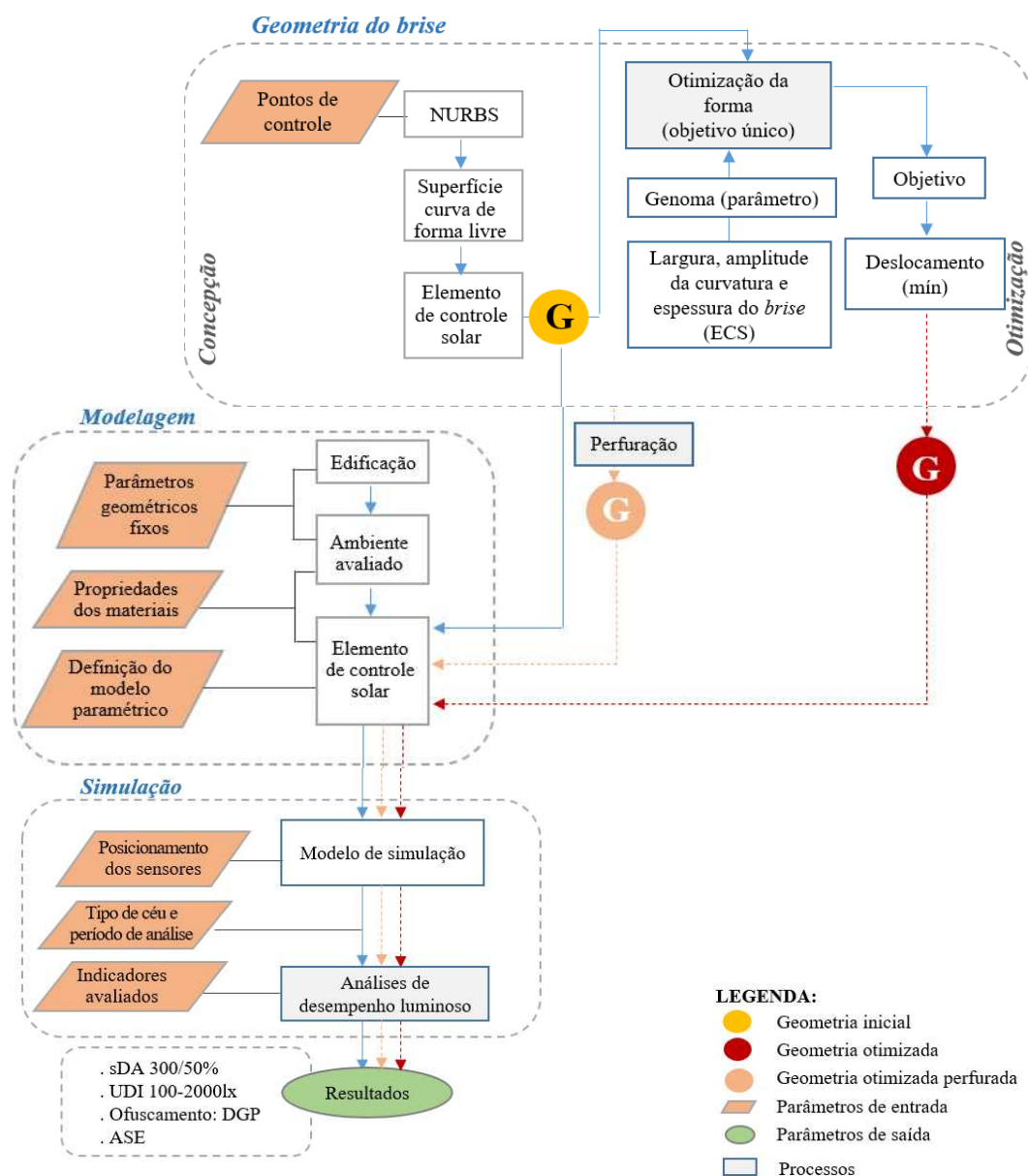
Uma demanda de otimização geralmente trata da maximização ou minimização de uma função real, através da escolha de valores de entrada. No caso de escolhas arquitetônicas, a otimização pode ser utilizada em diferentes domínios e está usualmente associada a questões estruturais e à eficiência dos materiais empregados, obtidas por meio do refinamento da forma, da configuração dos ambientes, das dimensões ou da topologia da edificação (Kheiri, 2018; Rynska *et al.*, 2020).

Como ferramenta para estes processos, a otimização estrutural permite obter uma configuração da estrutura que resulta em um desempenho ótimo para alguma medida pré-definida, satisfazendo restrições tanto sobre as variáveis de projeto, quanto sobre seu comportamento. Neste estudo, a otimização estrutural buscou integrar a modelagem geométrica, a análise do desempenho estrutural da peça e a otimização da forma em um processo automatizado auxiliado por ferramentas computacionais. Esta análise buscou atenuar os efeitos da aplicação das cargas sobre a peça, avaliados a partir do deslocamento horizontal percebido, que é uma das opções do *plugin* de avaliação estrutural para visualização dos dados de saída. Ele quantifica, em centímetros, a movimentação da peça em relação à sua condição inicial (sem aplicação das cargas), considerando o eixo perpendicular à sua superfície. Representa, deste modo, como o material se deforma.

5.2. MÉTODO

Nesta pesquisa é utilizada uma abordagem combinada de desenvolvimento e otimização da forma de um dispositivo de sombreamento, a partir de modelagem algorítmico-paramétrica. Para o experimento foram propostas três etapas metodológicas: (i) concepção formal do modelo de referência, (ii) análise de desempenho estrutural da peça, a partir da otimização estrutural da forma e (iii) investigação do desempenho luminoso do dispositivo e comparação entre os resultados obtidos para os cenários estabelecidos. Abaixo, a Figura 1 representa o método empregado nesta pesquisa.

Figura 1 – Diagrama de fluxo ilustrando o método empregado



Fonte: A autora.

5.2.1. Estudo de caso

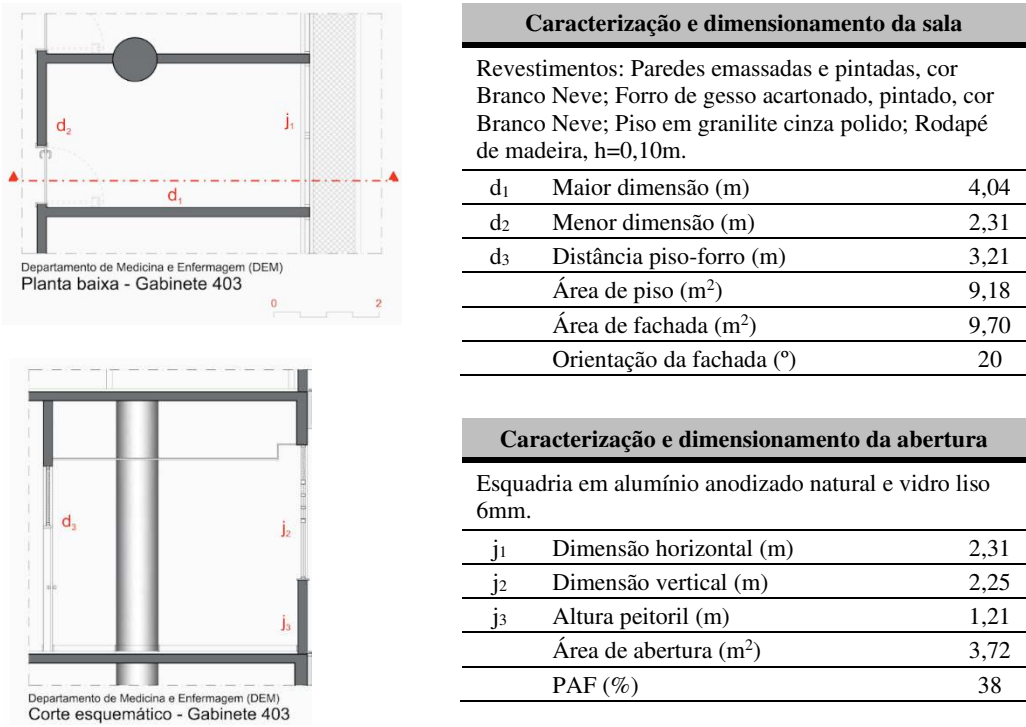
Este estudo é direcionado a uma sala de escritório individual (gabinete) do edifício do Departamento de Medicina e Enfermagem (DEM) da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil (20,77° S, 42,87° O), representado na Figura 2. Trata-se de um ambiente com fachada de orientação norte, para o qual suas características e dimensionamentos seguem indicados na Figura 3.

Figura 2 – Vista área parcial do Campus, com identificação do edifício do Departamento de Medicina e Enfermagem (DEM) e imagem da fachada com indicação do ambiente avaliado



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagem do Google Maps. Fotografia do acervo da autora.

Figura 3 – Representação em planta e corte do ambiente (a) e suas dimensões (b)



Fonte: A autora.

Nesta pesquisa, as variáveis relacionadas com a forma do ambiente são consideradas como parâmetros fixos e os valores referentes ao elemento de controle solar são indicados como parâmetros variáveis. Os parâmetros fixos relacionados à sala são as dimensões do modelo, já apresentadas na Figura 3 e incluem altura, comprimento, largura e porcentagem de abertura na fachada (PAF). Os critérios variáveis, para o dispositivo de sombreamento, são suas dimensões (largura e amplitude de curvatura da aleta) e sua espessura, bem como o grau da curva NURBS.

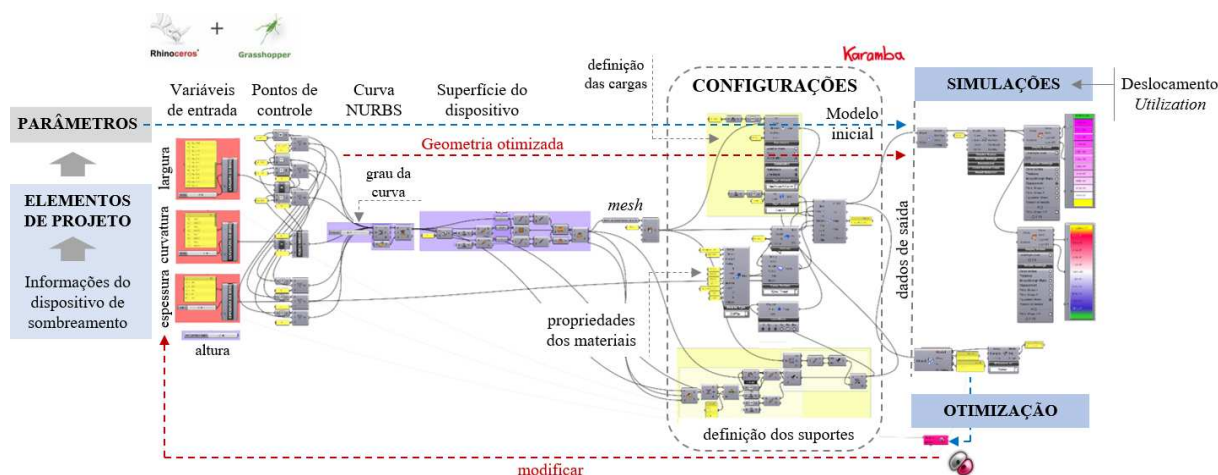
Como estabelecido no zoneamento bioclimático brasileiro, a cidade de Viçosa é definida como Zona Bioclimática 3, caracterizada por um clima tropical de altitude, com verão chuvoso e inverno seco (ABNT, 2005). Atualmente, em um estudo que considera o zoneamento bioclimático por desempenho, o local foi reclassificado como zona 2M, caracterizada como fria com inverno moderado, cuja temperatura média anual de bulbo seco (DBTmean) varia entre 18,8°C e 20,9°C (Machado *et al.*, 2024).

5.2.2. Concepção formal do dispositivo de proteção

A primeira etapa se dedicou à avaliação de parâmetros de composição geométrica para definição da seção transversal da peça, considerando a dimensão dos segmentos e a definição da curvatura. Para tanto, a concepção da peça foi realizada por meio da suíte de modelagem parametricamente acoplada Rhinoceros + Grasshopper.

A seção da peça foi definida como uma curva de forma livre a partir do modelador 3D *Non-uniform rational basis spline* (NURBS), que opera a partir de uma fórmula matemática para obtenção da geometria. Esta curva consiste de um ângulo e pontos de controle ponderados que determinam o grau da forma obtida, sendo que os menores graus retornam geometrias mais facetadas e mais próximas aos pontos de controle. De maneira oposta, os maiores graus darão origem a curvas mais suaves e mais afastadas daqueles pontos.

Na etapa inicial, foi proposto um modelo de aleta de referência, baseado no dimensionamento dos *brises* já instalados na UFV, em outras edificações, com largura aproximada de 28cm, amplitude de curvatura de 7cm e espessura inicial de 0,6mm. O modelo gerado considera a superfície opaca e, a partir dele, resultaram modelos com face perfurada e outros com superfície opaca otimizada, tendo sido estes últimos obtidos a partir da análise do desempenho estrutural da peça, realizada com o *plugin* Karamba. O código utilizado está representado na Figura 4.

Figura 4 – Código de trabalho para concepção e otimização da geometria do *brise*

Fonte: A autora.

5.2.3. Análise do desempenho estrutural do elemento

O desempenho estrutural da peça foi avaliado a partir da forma assumida pelo dispositivo de sombreamento e de sua espessura, por meio da otimização estrutural da forma, na qual a geometria é definida em um domínio variável de projeto (Bendsøe; Sigmund, 2003). Para este processo, utilizou-se o *plugin* de análise de elementos finitos Karamba3D e o *plugin* de otimização Galapagos, acoplados ao Grasshopper.

O método empregado é baseado em uma otimização de objetivo único, introduzida em um processo *form-finding*, tendo por propósito a minimização do deslocamento horizontal devido às cargas atuantes na peça. A proposta da análise do desempenho estrutural da peça teve por foco a integração com sua estrutura e forma; deste modo, não foi realizada uma análise de desempenho estrutural completa no sistema de sombreamento, bem como não englobou sua estrutura de suporte. Para esta pesquisa, a aleta foi avaliada como uma casca, produzida com uma liga de alumínio tipo 6060, têmpera T5. As propriedades empregadas para o material, no modelo Karamba3D, estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades do alumínio 6060 T5 utilizadas no modelo de elementos finitos

Propriedades	Valores
Módulo de Young (E)	7000 kN/cm ²
Módulo de cisalhamento no plano (G)	2600 kN/cm ²
Módulo de cisalhamento transversal (G')	2600 kN/cm ²
Peso específico	26,6 kN/m ³
Coefficiente de expansão térmica	23,6 x 10 ⁻⁶ /°C
Resistência à tração média	225 kN/cm ²
Resistência à compressão média	195 kN/cm ²
Tensão de escoamento média	130 kN/cm ²

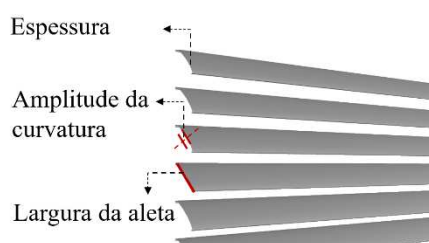
Fonte: a autora.

Esta análise considerou as cargas correspondentes ao peso próprio e aquelas devidas à ação do vento, aplicadas uniformemente distribuídas na superfície da peça. Conforme a ABNT NBR 6123 (ABNT, 2023), Viçosa/MG está inserida entre as isopletras de velocidade básica (V_0) 30 e 35m/s. Para efeitos de cálculo, foi adotado o valor de $0,65\text{kN/m}^2$ como a carga devida ao vento.

Na simulação, foram considerados os valores do componente *Utilization* do *plugin* Karamba3D que, calculados para cascas, referem-se à razão entre a resistência à tração ou compressão e a tensão comparativa do material em cada uma de suas faces (tensão de escoamento). Para tanto, empregou-se a tensão de Von Mises, cujos critérios são mais adequados para materiais dúcteis. Deste modo, considerou-se os valores de *Utilization* de tração e compressão como índices que quantificam a capacidade de carga média da peça, ou seja, o quanto a aleta é utilizada em comparação com seu limite de escoamento.

No processo de otimização, os parâmetros variáveis (genoma) utilizados foram a largura, a amplitude de curvatura e a espessura da aleta (Figura 5), aplicados a três padrões de curvas NURBS (graus 2, 4 e 6). O tamanho da população e o número máximo de gerações foram definidos em 50, para todos os casos. As simulações foram realizadas individualmente para cada um dos perfis de curvas. Os intervalos de trabalho seguem indicados na Tabela 2.

Figura 5 – Representação das variáveis



Fonte: a autora.

Tabela 2 – Variáveis para otimização

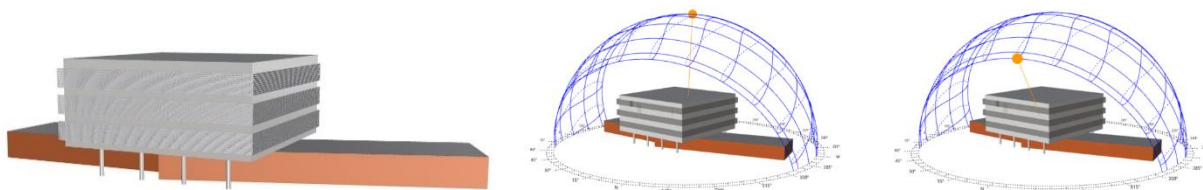
Variáveis	Intervalo de trabalho	Nº. de dados
Largura da aleta (cm)	14 a 42 (incremento 5%)	21
Amplitude de curvatura da aleta (cm)	3,5 a 10,5 (incremento 5%)	21
Espessura da aleta (mm)	0,4 a 0,8 (incremento 0,1mm)	5

Fonte: a autora

5.2.4. Investigação do desempenho luminoso do elemento de proteção

Na fase final, a modelagem do ambiente e as simulações computacionais foram realizadas através da suíte de modelagem parametricamente acoplada Rhinoceros + Grasshopper, a partir do emprego dos *plug-ins* de análise ambiental Ladybug e Honeybee. A Figura 6 ilustra o modelo computacional elaborado e as trajetórias solares verificadas para os solstícios de verão e inverno.

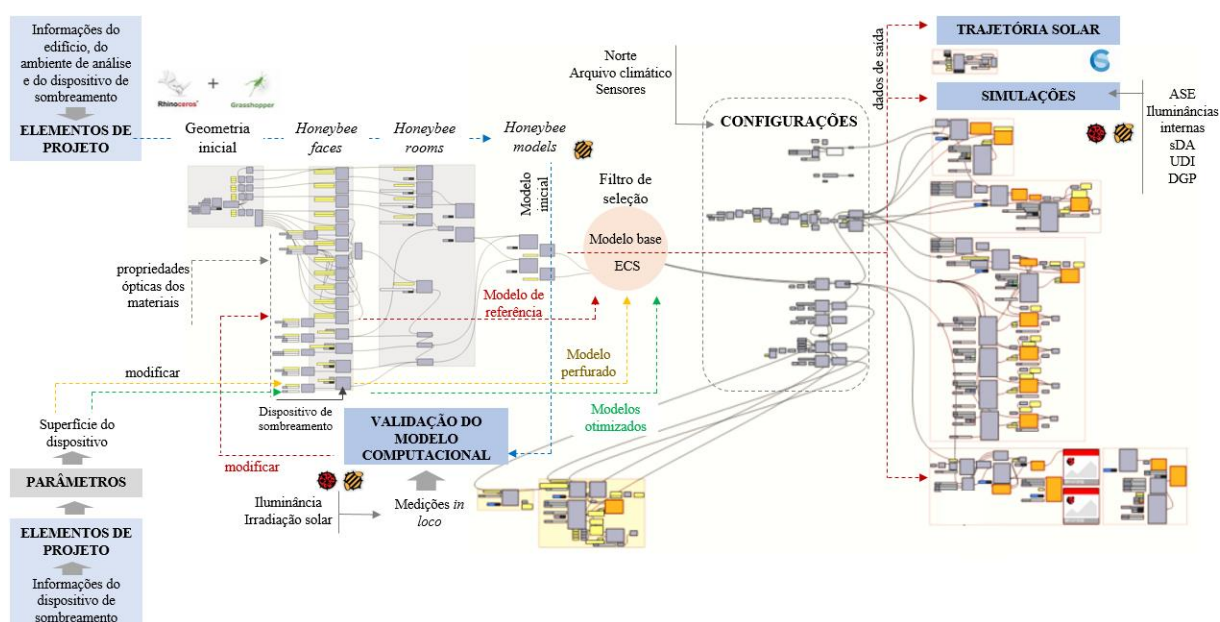
Figura 6 – Modelo computacional e trajetórias solares (verão e inverno), com posicionamento do sol às 12h



Fonte: Modelo elaborado a partir da plataforma Rhinoceros + Grasshopper e trajetórias solares por meio da plataforma Rhinoceros + ClimateStudio.

O código desenvolvido para este estudo segue representado na Figura 7. Inicialmente é definida a geometria do edifício (perímetro dos pavimentos e platibanda) e do ambiente avaliado (piso, forro e paredes internas e externa). Estas superfícies são convertidas em faces, nas quais são acrescidas as geometrias das aberturas e do elemento de controle solar. Para estas faces são indicadas as propriedades ópticas dos materiais de revestimento. A interpolação destas geometrias origina os ambientes que, somados, definem os modelos de análise. Para os elementos de controle solar, são inseridas as geometrias do modelo existente, do *brise* de referência e de suas versões perfurada e otimizadas. O filtro de seleção permite alternar entre os modelos a serem avaliados. Os dados das configurações incluem o arquivo climático, a indicação do Norte e as malhas de análise empregadas. A etapa final do código compreende as simulações realizadas.

Figura 7 – Código de trabalho para avaliação dos modelos de referência



Fonte: A autora.

Os indicadores avaliados incluem a Autonomia da luz do dia espacial (sDA), a Iluminância útil da luz do dia (UDI), a Probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP) e a Exposição anual à luz solar (ASE). A meta para sDA é que pelos menos 75% do espaço receba luz natural suficiente (300lx / 50% das horas ocupadas por ano) (Kheiri, 2019; De Luca; Sepúlveda; Varjas, 2022; Khidmat *et al.*, 2022; Piraei; Matusiak; Lo Verso, 2022; Wang; Yang; Wang, 2022). O UDI é categorizado em três faixas com referência nos níveis de iluminação, definindo a iluminância útil como a faixa entre 100 e 2000lx (Khidmat *et al.*, 2022; Nazari *et al.*, 2023; Rafati; Hazbei; Eicker, 2023). Valores inferiores ao mínimo estabelecido propiciariam espaços muito escuros, enquanto que níveis superiores ao limite máximo são considerados brilhantes.

O DGP estima a probabilidade de ofuscamento para os ocupantes e considera valores iguais ou inferiores a 0,34 como brilho imperceptível e valores superiores a 0,45 como brilho intolerável (ABNT, 2024) (De Luca; Sepúlveda; Varjas, 2022), como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Categorização dos valores de DGP

Critério	DGP
O ofuscamento não é percebido	$DGP \leq 0,34$
O ofuscamento é percebido, mas na maioria das vezes não perturba	$0,34 < DGP \leq 0,38$
O ofuscamento é percebido e, muitas vezes, perturba	$0,38 < DGP \leq 0,45$
O ofuscamento é percebido e, na maioria das vezes, é intolerável	$DGP > 0,45$

Fonte: ABNT (2024).

O ASE mede a quantidade de luz solar direta recebida e determina a porcentagem da área medida com iluminância diurna de 1000lx durante pelo menos 250 horas ocupadas ($ASE_{1000,250}$) (Kheiri, 2019; Khidmat *et al.*, 2022; Piraei; Matusiak; Lo Verso, 2022). Para este indicador, está estabelecido um limite inferior a 10% da área útil. Neste trabalho, são realizadas avaliações anuais e, especificamente para o ofuscamento, as análises são simuladas para os períodos de verão e inverno, considerando-se o solstício de verão (22 de dezembro) e solstício de inverno (21 de junho), com referência no ano de 2023.

A avaliação do modelo de iluminação natural se refere a um *grid* de pontos de sensores de 0,50 x 0,50m, posicionado a 0,75m acima do nível do piso. Para o indicador DGP, são empregados pontos de análise localizados a 1,20m acima do nível do piso, tendo por referência o nível dos olhos de uma pessoa sentada. A simulação foi conduzida a partir da análise do modelo base (sem dispositivo de sombreamento), da condição existente (dispositivo

do tipo painel microperfurado) e dos cenários com dispositivos do tipo *brise*: um elemento opaco de referência, uma variação perfurada desta peça e três modelos otimizados.

As propriedades ópticas dos materiais de revestimento foram definidas a partir dos procedimentos apresentados por Dornelles (2008) e Pereira *et al.* (2015; 2017). Identificou-se refletâncias de 0,95 para paredes internas, 0,94 para o forro de gesso, 0,45 para o piso em granilite cinza, 0,94 para a porta tipo prancheta (pintura branca) e transmitância do vidro igual a 0,60. A refletância do painel microperfurado foi de 0,80, que foi empregada, também, para os *brises* propostos.

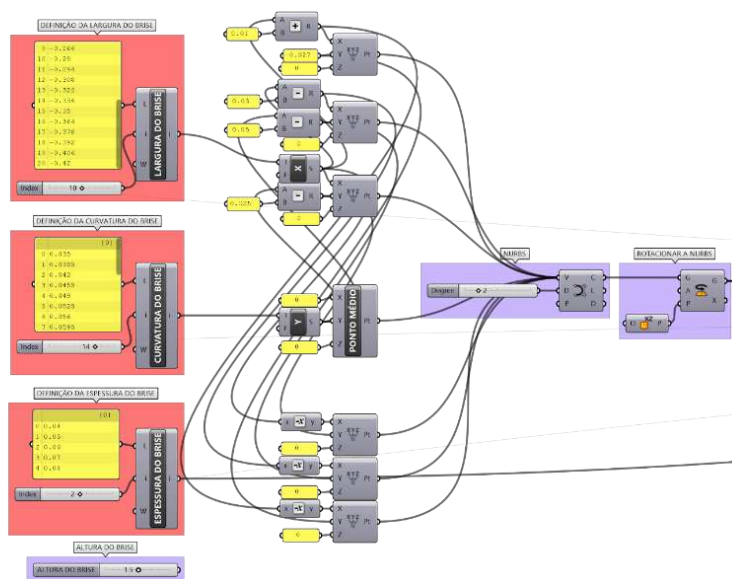
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção descreve os resultados obtidos para a concepção e otimização da geometria do *brise* e para as avaliações de desempenho do ambiente analisado em termos de disponibilidade de luz natural e probabilidade de ofuscamento.

5.3.1. A geometria da aleta

Com base no método de avaliação do desempenho estrutural da peça, apresentado na seção 5.2.3, a geometria da aleta foi concebida por meio de uma curva de forma livre (NURBS) gerada a partir de sete pontos de controle. A Figura 8 apresenta o trecho do código referente a esta fase inicial do trabalho, que compreende a definição dos pontos de controle a partir das variáveis largura, amplitude da curvatura e espessura do *brise* e grau da curva.

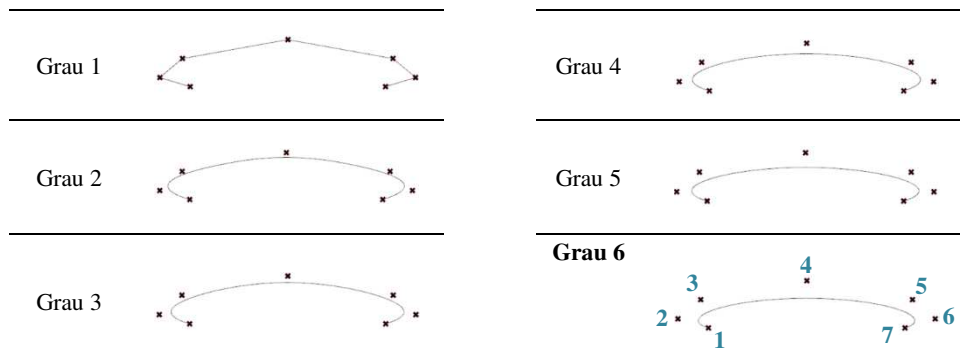
Figura 8 – Proposição da curva NURBS



Fonte: Elaborado a partir da plataforma Rhinoceros 3D + Grasshopper.

Na sequência, a Figura 9 mostra as possibilidades de graus para esta curva e aponta aquela empregada no modelo de referência (Grau 6), indicando os pontos abordados anteriormente.

Figura 9 – Possibilidades de graus da curva NURBS e indicação da geometria do modelo de referência

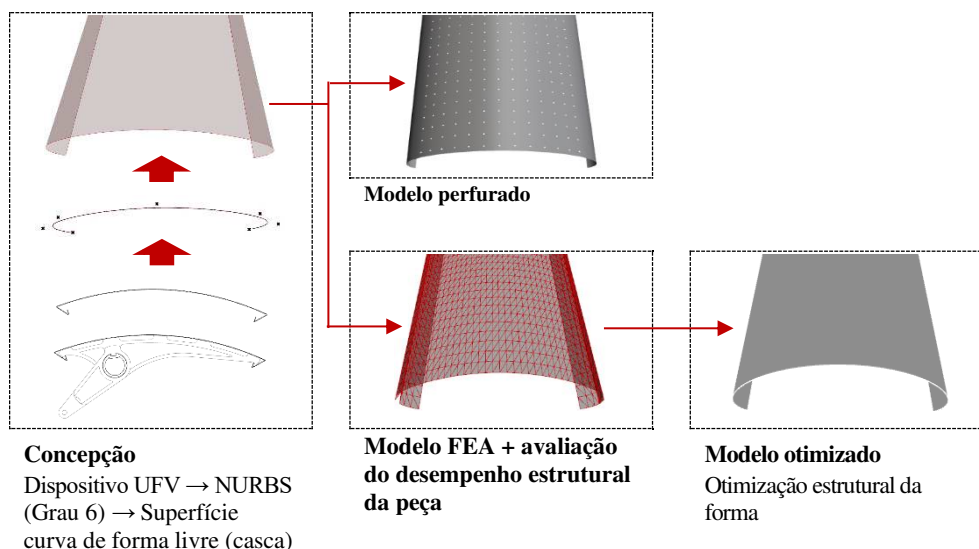


Fonte: A autora.

A forma inicial foi determinada a partir do ponto médio – ponto 4 (0,0.07,0). Os pontos 1 a 3 foram definidos com referência naquele ponto e os demais pontos, 5 a 7, são resultado do espelhamento dos três pontos iniciais, estabelecendo-se, assim, uma geometria com simetria entre seus lados.

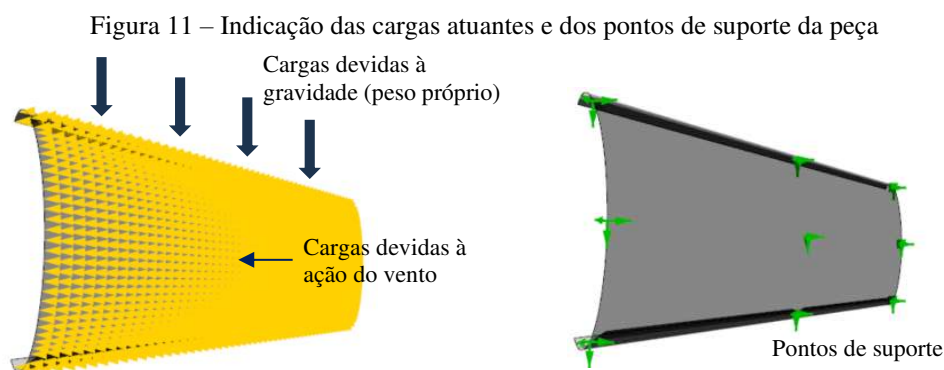
A curva selecionada deu origem à geometria da aleta de referência e, na sequência, aos demais modelos, como sintetizado na Figura 10. A forma inicial de sua superfície tem largura aproximada de 28cm, amplitude de curvatura de 7cm, espessura de 0,6mm e altura de 150cm. O modelo empregado como referência exemplifica elementos opacos, um tipo de solução que é amplamente utilizada em estudos de avaliação de desempenho luminoso de *brises* externos fixos.

Figura 10 – Fluxo da proposição e avaliação de desempenho da geometria, utilizado na investigação



Fonte: A autora.

Como apontado no método deste trabalho, a aleta foi avaliada como uma casca e a análise considerou as cargas correspondentes ao peso próprio e aquelas devidas à ação do vento, aplicadas uniformemente distribuídas na superfície da peça. Para avaliação do cenário menos favorável, adotou-se as cargas de vento incidindo perpendicularmente à superfície avaliada. Nove pontos de suporte foram estabelecidos, distribuídos nas extremidades e na linha central da peça. A representação das cargas atuantes e dos pontos de suporte está indicada na Figura 11.



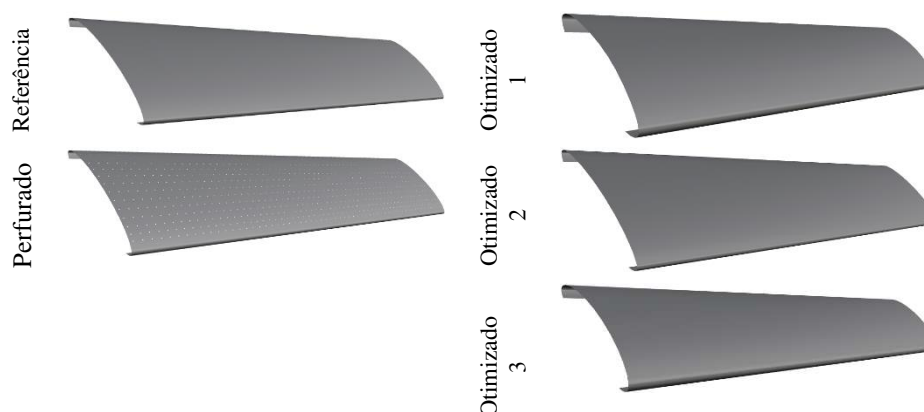
Fonte: A autora.

Para potencializar os resultados obtidos para o desempenho estrutural da peça, empregou-se a otimização estrutural da forma, conduzida para três padrões de curvas NURBS distintos, tendo sido utilizadas formas com graus 2, 4 e 6.

Considerando o aspecto estrutural, a hipótese mais recorrente é que a redução do deslocamento horizontal poderia implicar no aumento da espessura da peça e, consequentemente, em sua massa. Tendo em vista que o objeto deste estudo é uma superfície de pequeno porte e considerando, ainda, que o aumento de massa possivelmente resultaria em aumento dos custos com material, adotou-se um limite máximo de 50% para este acréscimo como referência para a escolha das soluções.

A indicação dos melhores resultados se pautou, ainda, na seleção de peças que representassem padrões geométricos diferenciados entre si, tanto na largura quanta na amplitude de curvatura. Na Figura 12 estão representadas as geometrias das cinco aletas avaliadas. Na sequência, o Quadro 1 traz os resultados obtidos na avaliação do desempenho estrutural da peça, para a superfície da geometria inicial e para as formas das três geometrias otimizadas.

Figura 12 – Apresentação das peças projetadas



Fonte: A autora.

Quadro 1 – Resultado da avaliação das geometrias da aleta de referência e das superfícies otimizadas

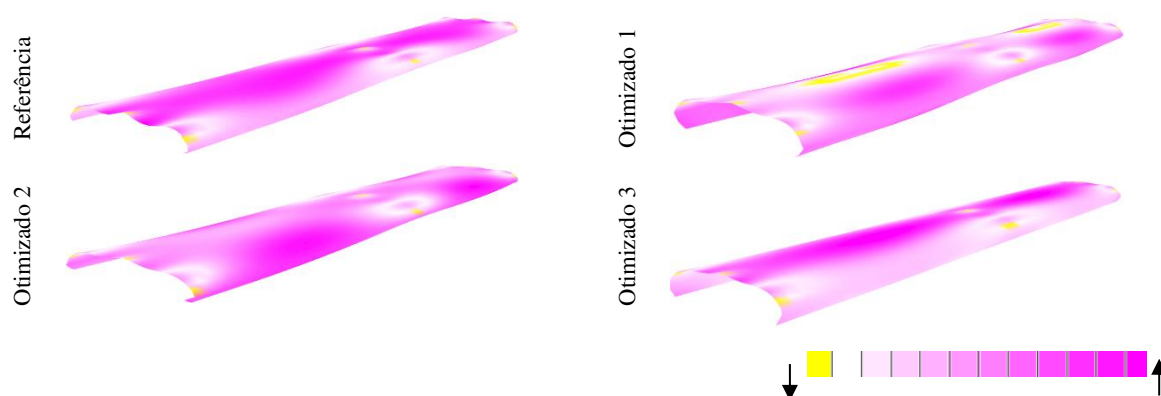
	Modelo	Deslocamento horizontal máximo / <i>Utilization</i>	Configurações
Referência			Dimensões (cm): 28 x 7 x 150 Espessura (mm): 0,6 Padrão NURBS: 6 Deslocamento máximo (mm): 0,44 Massa (Kg): 0,955 <i>Utilization</i> (%): 2,1 Tensão equiv. máx. (kN/cm ²): -1,05 / +1,41
Otimizado 1			Dimensões (cm): 28 x 8,4 x 150 Espessura (mm): 0,6 Padrão NURBS: 2 Deslocamento máximo (mm): 0,29 Massa (Kg): 1,329 <i>Utilization</i> (%): 1,7 Tensão equiv. máx. (kN/cm ²): -0,63 / +0,632
Otimizado 2			Dimensões (cm): 29,4 x 5,6 x 150 Espessura (mm): 0,8 Padrão NURBS: 4 Deslocamento máximo (mm): 0,26 Massa (Kg): 1,379 <i>Utilization</i> (%): 1,5 Tensão equiv. máx. (kN/cm ²): -0,921 / +1,04
Otimizado 3			Dimensões (cm): 25,2 x 10,5 x 150 Espessura (mm): 0,7 Padrão NURBS: 6 Deslocamento máximo (mm): 0,18 Massa (Kg): 1,346 <i>Utilization</i> (%): 0,9 Tensão equiv. máx. (kN/cm ²): -0,538 / +0,6

Fonte: A autora.

Para o modelo otimizado 1, verificou-se que o deslocamento horizontal máximo foi reduzido em 34%, porém, houve um aumento de 39% na sua massa em relação ao modelo de referência. O modelo otimizado 2 apresentou um comportamento estrutural similar ao anterior,

com redução no deslocamento próximo a 41% e aumento de massa de 44%. Por fim, para o modelo otimizado 3 foi observada a maior redução no deslocamento máximo (cerca de 60%), com um aumento de massa em torno de 41%. Para elas, verificou-se baixos valores de *Utilization*, que foram inferiores àquele obtido para o modelo de referência. Estes dados indicam que os modelos otimizados estão sendo menos solicitados, estruturalmente, que o elemento inicial. A Figura 13, a seguir, apresenta perspectivas destas peças, nas quais se pode observar os deslocamentos verificados em cada uma delas, em escala ampliada.

Figura 13 – Perspectivas das quatro soluções com representação dos deslocamentos horizontais verificados



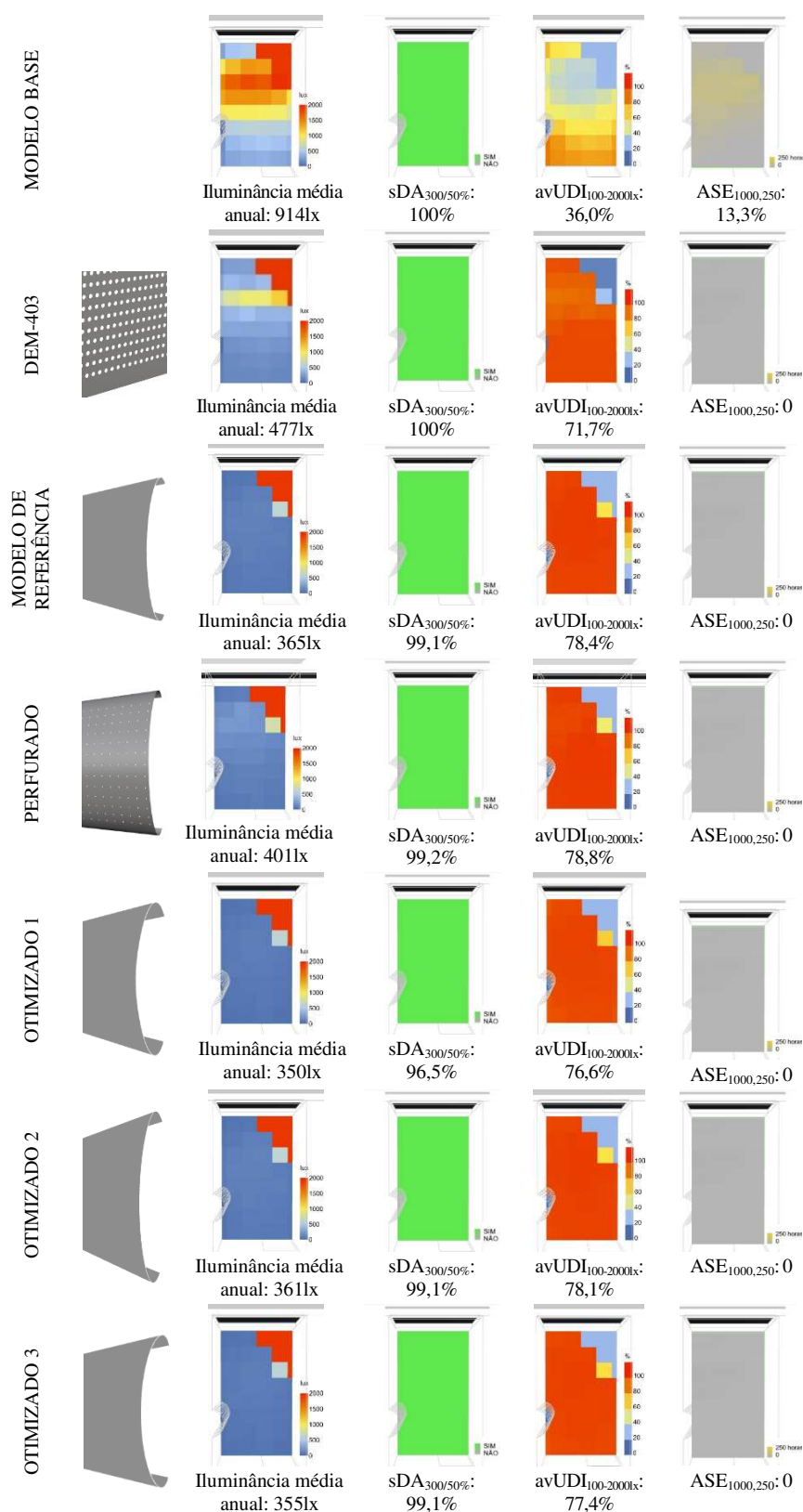
Fonte: A autora.

Esses resultados sugerem que o método proposto, que é baseado em otimização de objetivo único, é capaz de reduzir os deslocamentos horizontais do elemento, ainda que implique no aumento de sua massa. Assim, a consideração de variáveis que afetam o comportamento estrutural do modelo computacional conduz à definição da geometria da aleta de modo mais realístico, possibilitando que o elemento seja capaz de suportar de forma mais adequada aos esforços aos quais será submetido ao longo de sua vida útil.

5.3.2. O desempenho luminoso verificado

A simulação da luz do dia foi conduzida para analisar o desempenho do ambiente, a partir de indicadores relacionados aos níveis de iluminância ($sDA_{300/50\%}$ e $UDI_{100-2000lx}$), ao nível de exposição solar ($ASE_{1000,250}$) e à probabilidade de ofuscamento (DGP). Para tanto, foram feitas avaliações anuais, sendo que, para este último, a investigação do ofuscamento incluiu também análises para verão e inverno. O desempenho luminoso foi analisado separadamente para cada um dos cenários avaliados. Estas simulações ajudaram a entender o impacto da integração entre a geometria, o material e o desempenho estrutural da peça na proposição de elementos de proteção estáticos. Os resultados obtidos seguem apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Resultados e visualização dos desempenhos verificados



Fonte: A autora.

Para o modelo avaliado, os resultados verificados para o cenário sem dispositivo de sombreamento refletem os altos níveis de admissão da luz do dia, sobretudo próximo à abertura.

O valor médio da iluminância obtida foi de 914lx, sendo que índices superiores a 2000lx foram observados em 51,2% da ocorrência anual, para o plano avaliado.

A inserção do dispositivo de sombreamento reduziu os níveis médios de iluminância interna para todos os casos analisados. Os elementos do tipo *brise*, com aletas opacas apresentaram o maior percentual de diminuição, tendo atingido valores próximos a 60%. As superfícies perfuradas, por sua vez, obtiveram deduções de 48% para o painel e 56% para a aleta, permitindo, portanto, maior admissão da luz do dia no interior do ambiente. Esta condição permitiu que maiores índices também fossem verificados em uma porção mais central da sala e não apenas próximo à abertura, sobretudo para o cenário existente, com painel microperfurado.

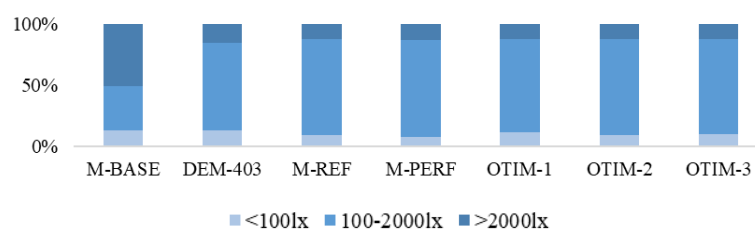
Esta diferença nos resultados reflete as características geométricas destes dispositivos, que interferem no bloqueio e na difusão da luz solar direta, sobretudo nos elementos do tipo *brise*. Outro ponto a ser destacado nesta análise diz respeito à condição de instalação, quanto à proteção total ou parcial da abertura. Se por um lado o painel garante apenas um bloqueio parcial, por estar situado acima do nível do peitoril da janela, os *brises* recobrem completamente a abertura. Isto impacta diretamente a admissão da luz do dia e, por consequência, os níveis de iluminância internos.

Se considerarmos o nível de iluminância mínimo requerido para ambientes do tipo “Salas dos professores”, para os quais é indicado 300lx segundo a NBR ISSO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013), todos os cenários atingiram o valor de referência. Sob este aspecto, os dispositivos perfurados obtiveram um melhor desempenho, quando comparado às soluções com aletas opacas.

Para o cenário com painel microperfurado, a menor admissão da luz natural não foi capaz de alterar o resultado verificado para sDA, que reproduziu aquele observado para o modelo base. Assim, a integralidade do espaço apresentou um valor mínimo de iluminância de 300lx em pelo menos 50% das horas ocupadas. Por outro lado, verificou-se uma pequena redução no valor de sDA nas avaliações do desempenho de *brises* com aletas perfuradas e opacas, atingindo-se um valor mínimo de 96,5% para o modelo otimizado 1.

Em termos de avaliação da Iluminância útil da luz do dia (UDI), o emprego de elementos de controle solar possibilitou a redução dos valores observados para o modelo base, predominantemente superiores a 2000lx. Para todas as possibilidades de geometria avaliada houve um aumento desses índices no intervalo de 100-2000lx, destacando-se os modelos de referência, o perfurado e o otimizado 2, para os quais este percentual foi ampliado em quase 200%. A Figura 15 apresenta a comparação entre os percentuais alcançados.

Figura 15 – Visualização dos percentuais obtidos para UDI

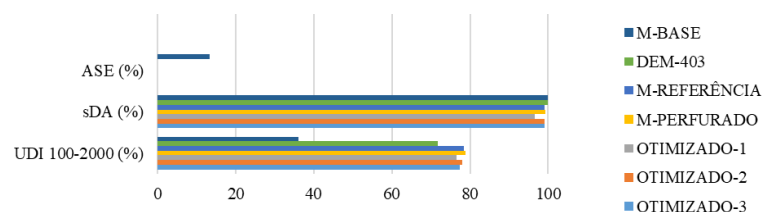


Fonte: A autora.

O resultado verificado para a exposição anual à luz solar (ASE), por sua vez, já apontava valor inferior a 15% para o cenário base. Com a inserção dos dispositivos de sombreamento, os níveis verificados se igualaram a zero em todos os casos avaliados.

A relação entre os valores obtidos na avaliação de desempenho luminoso dos elementos de controle solar, para os indicadores descritos acima, pode ser observada na Figura 16, a partir da qual se visualiza a melhoria nos percentuais relativos ao ASE e ao UDI_{100-2000lx}. Observa-se, ainda, pouca influência da variação dos cenários para o indicador sDA. Os resultados da simulação confirmam, portanto, uma melhoria no desempenho dos dispositivos de sombreamento propostos, em comparação ao caso base.

Figura 16 – Comparação do desempenho dos elementos de controle solar

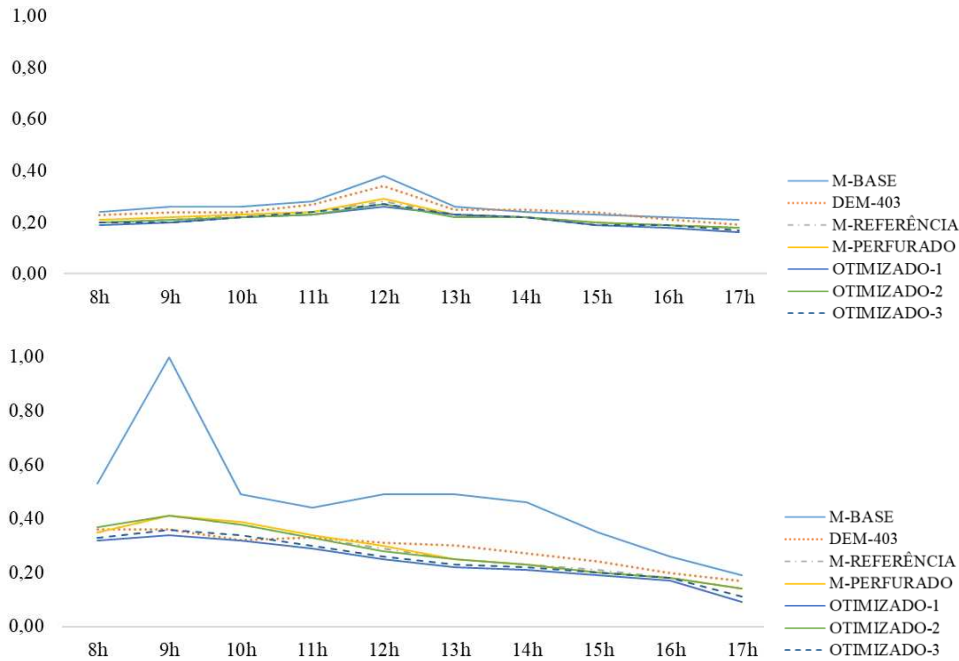


Fonte: A autora.

Considerando o indicador UDI, para o qual foram obtidos maiores índices na faixa de 100-2000lx, tanto para a aleta perfurada, quanto para as aletas opacas, observa-se o efeito positivo da fusão das tipologias abordadas e do efeito da otimização da forma no desempenho luminoso. Isto demonstra, possivelmente, o impacto da alteração da geometria na admissão da luz natural, sobretudo quanto à luz difusa.

A análise seguinte tratou da avaliação da probabilidade de ofuscamento ao longo do ano (DGP). Para o modelo base, verificou-se índices mais expressivos para o inverno, que apresentou limites intoleráveis em 70% do período avaliado (8 às 14 horas). Para demonstrar o efeito da instalação dos dispositivos de sombreamento sobre a redução do brilho, a Figura 17 apresenta os resultados atingidos para o verão e o inverno, ao longo do período de simulação.

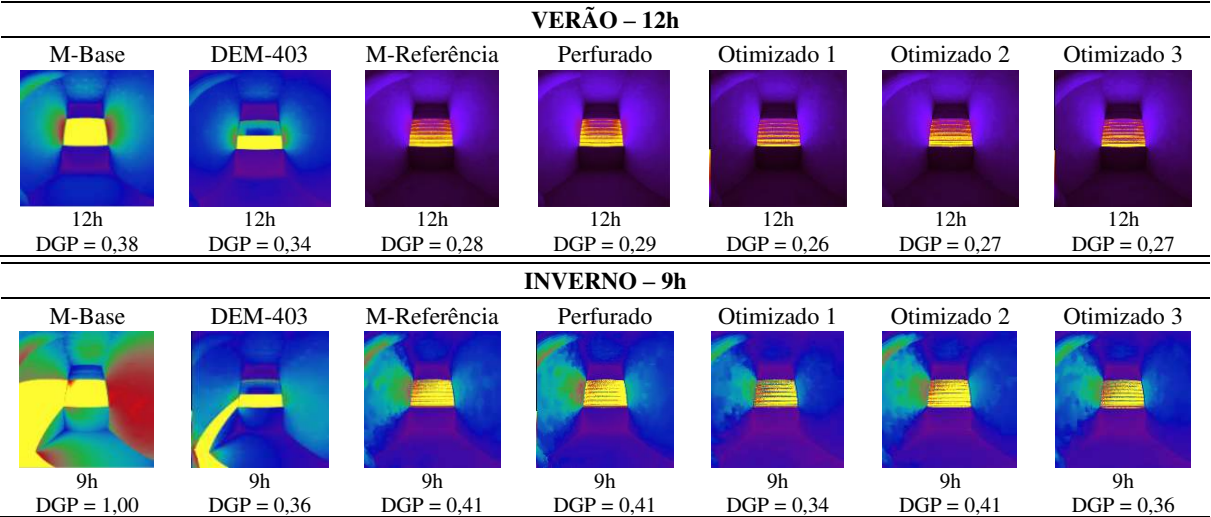
Figura 17 – Resultados de DGP obtidos para os períodos de verão e inverno



Fonte: A autora.

Na sequência, a Figura 18 apresenta mapas de iluminância obtidos para todos os cenários avaliados, considerando o horário mais crítico do dia.

Figura 18 – Mapas de iluminância obtidos para o horário mais crítico



Fonte: A autora.

Para o ambiente avaliado, com fachada de orientação norte, destaca-se o mês de junho como o período mais crítico. Isto se justifica pelo menor ângulo de altitude solar, quando comparado ao verão. Como se pode observar na Figura 16, para o período de verão, a instalação de dispositivo de sombreamento na fachada, ainda que reduza numericamente os níveis de DGP

atingidos, não produz efeitos sobre a probabilidade de ofuscamento. Cabe destacar que os valores deste indicador já estavam em níveis satisfatórios para o cenário sem dispositivo de proteção.

Em contrapartida, a inserção de elementos de proteção solar refletiu em melhorias na redução de cenários de ofuscamento no período de inverno. Esta diminuição já havia sido alcançada para a condição verificada em contexto real, com a instalação do painel microperfurado; contudo, ainda havia a possibilidade de ocorrer ofuscamento. Considerando todos os padrões avaliados, o modelo de referência, o modelo perfurado e o modelo otimizado 2 apresentaram os piores resultados de DGP. Contudo, as demais versões otimizadas, que exemplificam elementos com menor largura, foram capazes de impedir o ofuscamento.

5.4. CONCLUSÃO

Neste estudo foi realizada uma avaliação do desempenho da luz do dia de elementos de controle solar com diferentes geometrias, representativas de um contexto real, da fusão de tipologias e do emprego de processos *form-finding* para proposição e otimização das aletas. Para tanto, buscou-se avaliar os efeitos da integração entre a forma do elemento de proteção solar, seu material e o desempenho estrutural da peça.

Empregou-se um método de processo de projeto computacional que combina o processo criativo com a busca por uma solução de melhor desempenho. Neste contexto, o desempenho foi utilizado para guiar a definição da forma final. Cabe destacar que esta pesquisa não visa propor um fluxo de trabalho totalmente consolidado, mas em vez disso, fornece um ponto de partida para promover discussões adicionais que se movam em direção a investigações mais aprimoradas e completas.

Para os cenários avaliados, os resultados demonstraram que a inserção de dispositivos de proteção solar às envoltórias do edifício possibilitou o controle da admissão da luz natural, a redução da transmissão da radiação e da probabilidade de ocorrência de ofuscamento. As principais conclusões desta investigação estão apresentadas a seguir:

- A otimização da aleta, considerando o desempenho estrutural da peça, resultou em uma diminuição dos deslocamentos horizontais dos modelos na ordem de 34 a 60%, em comparação ao modelo de referência. Entretanto, isso implicou em um aumento da massa do elemento e um menor aproveitamento estrutural da peça sinalizado pelo componente *Utilization*. Este comportamento sugere que o método

proposto se mostrou eficaz na otimização da forma da aleta e capaz de conduzir a uma resposta mecânica mais adequada aos esforços atuantes na peça.

- De modo geral, para as geometrias propostas, a inserção do dispositivo de sombreamento reduziu os níveis médios de iluminância interna em cerca de 60% para todos os ambientes avaliados, com menor impacto verificado para a aleta microperfurada (56%).
- Os elementos de controle solar incorporados à fachada possibilitaram a melhoria da distribuição da luz natural, com valores de $UDI_{100-2000lx}$ próximos a 80%. Para todos os casos, os valores médios de iluminância interna, para avaliação anual, indicam que mais de 50% do espaço da sala recebe uma média de 300lx durante o horário laboral. Portanto, os níveis atingidos atendem ao disposto em norma quanto à iluminância interna mínima para este tipo de ambiente.
- A avaliação do $ASE_{1000,250}$ indicou que a inserção dos dispositivos de sombreamento reduziu completamente o potencial de desconforto visual devido à incidência de radiação solar direta. Quanto ao $sDA_{300/50\%}$, verificou-se que este indicador foi pouco sensível à instalação dos sistemas de sombreamento.
- A instalação de dispositivos de proteção garantiu a redução da probabilidade de ocorrência de ofuscamento no inverno, identificado como o período mais crítico, em pelo menos 70% dos resultados. Os elementos otimizados, de modo geral, foram os que obtiveram os melhores resultados, sobretudo o modelo otimizado 1, que foi capaz de reduzir completamente a ocorrência de ofuscamento. Por outro lado, o pior cenário foi verificado para a aleta microperfurada.
- O conjunto de todos os resultados analisados sugere que a integração do material, do desempenho estrutural da peça e de sua forma ao fluxo de trabalho para avaliação do desempenho luminoso de dispositivos de proteção solar implica em melhores índices para os indicadores Iluminância útil da luz do dia (UDI) e Probabilidade de ofuscamento pela luz do dia (DGP). Estes resultados, somados à eficácia da otimização da forma da aleta que conduziu a uma resposta mecânica mais adequada aos esforços atuantes na peça, indicam a viabilidade do emprego deste método.
- Elementos otimizados foram capazes de aumentar, em até duas vezes, os percentuais obtidos para UDI na faixa de 100 a 2000lx e de reduzir a possibilidade de ocorrência de ofuscamento, no período mais crítico do ano.

A partir do cenário avaliado, é possível inferir que a inclusão da análise do desempenho estrutural da peça à avaliação de seu desempenho luminoso possibilitou uma investigação que vai além de uma análise do elemento de controle solar como simples superfície. Esta abordagem resulta em uma percepção mais realista do comportamento do dispositivo de proteção solar, que pode ser esperada após sua instalação em contextos reais.

Deve-se destacar, como principal limitação deste trabalho, a inviabilidade de verificação do desempenho estrutural para a geometria conformada por aletas microperfuradas e, também, a impossibilidade de sua otimização, devido à capacidade computacional requerida para a realização do processamento. Portanto, este trabalho abordou apenas a avaliação do desempenho luminoso do *brise* microperfurado. Estudos futuros poderiam explorar análises do desempenho estrutural, para estas condições e a otimização da peça, para diferentes padrões de perfuração.

Neste estudo foi apresentado um fluxo de trabalho linear, pautado em otimização de objetivo único, em decorrência do dispêndio computacional necessário. Considerando que, ao longo deste trabalho, tenha se definido um banco de dados com informações referentes a características da edificação e do ambiente avaliado, às medições em contexto real e aos parâmetros normativos, novas estratégias de pesquisa poderiam, ainda, empregar outras estratégias de avaliação. Assim, deve-se considerar o emprego de abordagens multiobjetivo a partir de outros sistemas, como métodos de Aprendizado de Máquina (*Maching Learning*) e Redes Neurais.

Esta pesquisa focou na avaliação da geometria do dispositivo de sombreamento, considerando um conjunto de parâmetros variáveis, relacionados às características e dimensionamento da peça (aleta) proposta e parâmetros fixos referentes à sua condição de instalação. Deste modo, os resultados obtidos não consideram os efeitos da variação da distância entre o elemento avaliado e à superfície da fachada, bem como a influência da estrutura de sustentação. Pesquisas futuras podem, também, explorar a variabilidade das condições de instalação destes dispositivos.

REFERÊNCIAS

AL-MASRANI, S. M. *et al.* Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. **Solar Energy**, [s. l.], v. 170, p. 849–872, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047>. Acesso em: 29 jan. 2022.

AL-OBAIDI, K. M. *et al.* Assessing the allowable daylight illuminance from skylights in single-storey buildings in Malaysia: a review. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 236-248, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/2093761X.2015.1129369>. Acesso em: 08 jul. 2024.

AL-OBAIDI, K. M. *et al.* Designing an integrated daylighting system for deep-plan spaces in Malaysian low-rise buildings. **Solar Energy**, [s. l.], v. 149, p. 85-101, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.001>. Acesso em: 08 jul. 2024.

ARORA, R. K. **Optimization**. Algorithms and applications. London and New York: Taylor & Francis Group, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 15220-3**. Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **ABNT NBR 6123**. Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

_____. **ABNT NBR 15215-3**. Iluminação natural. Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1**. Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods and applications**. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2003.

CAETANO, I.; LEITÃO, A. Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. **Architectural Science Review**, [s. l.], 63:2, p. 164-174, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1680524>. Acesso em 20 out. 2024.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; MAYER, A. Estudo piloto para elementos de controle solar desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 67–82, 2018. Acesso em: 29 jan. 2023.

DE LUCA, F.; SEPÚLVEDA, A.; VARJAS, T. Multi-performance optimization of static shading devices for glare, daylight, view and energy consideration. **Building and Environment**, [s. l.], v. 217, n. April, p. 1-17, 2022. Acesso em: 29 jan. 2023.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA**. 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

EKICI, B. *et al.* A Methodology for daylight optimisation of high-rise buildings in the dense urban district using overhang length and glazing type variables with surrogate modelling. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1343, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1343/1/012133>. Acesso em: 20 jan. 2022.

HAKIMAZARI, M. *et al.* Multi-objective optimization of daylight illuminance indicators and energy usage intensity for office space in Tehran by genetic algorithm. **Energy Reports**, [s. l.], v. 11, p. 3283-3306, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.03.011>. Acesso em: 08 jul. 2024.

KHEIRI, F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 92, n. March, p. 897–920, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.080>. Acesso em: 21 jan. 2022.

_____. Optimization of building fenestration and shading for climate-based daylight performance using the coupled genetic algorithm and simulated annealing optimization methods. **Indoor and Built Environment**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 195–214, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1420326X19888008>. Acesso em: 30 jan. 2022.

KHIDMAT, R. P. *et al.* Investigation into the daylight performance of expanded-metal shading through parametric design and multi-objective optimisation in Japan. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 51, n. November 2021, p. 1-23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104241>. Acesso em: 30 nov. 2022.

KIRIMTAT, A. *et al.* Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 53, p. 23–49, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>. Acesso em: 30 nov. 2022.

LEONE, C.; FLORIO, W. Análise paramétrica de iluminação natural e de proteção solar de edifícios torcidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 247-270, out./dez. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000400568>. Acesso em out. 2023.

LIU, S. *et al.* Effectiveness of passive design strategies in responding to future climate change for residential buildings in hot and humid Hong Kong. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 228, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110469>. Acesso em: 29 out. 2023.

MACHADO, R. M. S. *et al.* Bioclimatic zoning for building performance using tailored clustering method and high-resolution climate data. **Energy and Buildings**, [s. l.], 311, p. 1-21, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114157>. Acesso em: 23 jul. 2024.

NAZARI, S. *et al.* Designing energy-efficient and visually-thermally comfortable shading systems for office buildings in a cooling-dominant climate. **Energy Reports**, [s. l.], 10, p. 3863-3881, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.062>. Acesso em: 11 out. 2023.

PEREIRA, C. D. *et al.* **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E): Florianópolis, 2015.

_____. Avaliação experimental do espectrômetro Alta II e sua aplicação na normatização brasileira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 197-213, out./dez. 2017.

PIRAEI, F.; MATUSIAK, B.; LO VERSO, V. R. M. Evaluation and optimization of daylighting in heritage buildings: a case-study at high latitudes. **Buildings**, [s. l.], v. 12, p. 1-24, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12122045>. Acesso em: 11 out. 2023.

POUYANMEHR, M. *et al.* External shading form-finding: simulating daylighting and dynamic view access assessment. **Journal of Building Performance Simulation**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 398–409, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19401493.2022.2058089>. Acesso em: 10 out. 2022.

RAFATI, N.; HAZBEI, M.; EICKER, U. Louver configuration comparison in three Canadian cities utilizing NSGA-II. **Building and Environment**, [s. l.], v. 229, n. December 2022, p. 1-17, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109939>. Acesso em: 11 out. 2023.

RYNSKA, E. *et al.* Smart energy solutions as an indispensable multi-criteria input for a coherent urban planning and building design process-two case studies for smart office buildings in warsaw downtown area. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 15, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13153757>. Acesso em: 10 fev. 2022.

VENÂNCIO, R. Sombreamento com iluminação: desenvolvimento e teste de modelo paramétrico para facilitar o projeto de proteções solares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 59-77, out./dez. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400460>. Acesso em out. 2023.

WANG, Y.; YANG, W.; WANG, Q. Multi-objective parametric optimization of the composite external shading for the classroom based on lighting, energy consumption, and visual comfort. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 275, p. 1-16, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112441>. Acesso em: 20 dez. 2022.

ZANI, A. *et al.* Computational design and parametric optimization approach with genetic algorithms of an innovative concrete shading device system. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 180, p. 1473–1483, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.310>. Acesso em: 10 fev. 2022.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES DA TESE

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa apresentou a investigação de um fluxo de trabalho auxiliado por ferramentas computacionais para avaliação do desempenho de dispositivos de sombreamento estáticos, para ambientes naturalmente iluminados. Como aspecto original, este desempenho é aqui abordado a partir da relação entre a geometria, o material e a estrutura durante a proposição e avaliação destes elementos. Neste sentido, a integração do material, do desempenho estrutural da peça e de sua forma na abordagem proposta permite uma avaliação do dispositivo de sombreamento que vai além de uma análise do elemento de controle solar como simples superfície.

De modo geral, a pesquisa teve o objetivo de propor um fluxo de trabalho baseado em processos *form-finding*, a partir de um código para obtenção e otimização de elementos de controle solar com geometrias desenvolvidas por meio de simulações que adicionam o desempenho estrutural da peça.

Para atender ao objetivo proposto, foram realizadas investigações quanto:

- (1) Às aplicações de processos *form-finding* dentro dos processos de projetos auxiliados por ferramentas computacionais, com foco em estudos de simulações de desempenho de edifícios naturalmente iluminados. Também foram avaliadas as principais abordagens, limites e aplicabilidade do conceito *form-finding*.
- (2) Ao mapeamento dos processos de projeto para concepção e otimização da geometria de dispositivos de sombreamento para controle da iluminação natural em ambientes internos.
- (3) Ao comportamento de dispositivos de sombreamento à luz do dia, para conceber e aplicar um fluxo de trabalho para avaliação do desempenho de dispositivos de sombreamentos já instalados. O estudo incorporou processo de validação às análises de simulação computacionais, a partir da realização de medições em contexto real.
- (4) Ao desempenho luminoso de elementos de controle solar em cenários de análise que integram material, desempenho estrutural da peça e a forma durante a concepção e a avaliação de dispositivos gerados a partir de processos *form-finding*.

As investigações acima foram o objeto de estudo de cada um dos artigos elaborados. Os capítulos 2 e 3 apresentaram as revisões integrativas de literatura realizadas, com o objetivo de analisar as características teóricas envolvidas nos processos *form-finding* e nas avaliações de desempenho de elementos de controle solar. Os trabalhos elencados promoveram análises sobre questões teóricas e práticas, demonstrando o estado da prática arquitetônica, o impacto de novas ferramentas e técnicas e a aplicabilidade da pesquisa científica e as preocupações sociais, como por exemplo problemas ambientais atuais e necessidades dos usuários.

Os capítulos 4 e 5, por sua vez, dedicaram-se à aplicação do referencial teórico em simulações para avaliação do desempenho luminoso de dispositivos de sombreamento, a partir de processos de projeto computacionais. Estas análises demonstraram estes métodos de projeto aplicados aos projetos arquitetônicos em um nível de representação, modelagem e simulação. Neste sentido, foi possível combinar o processo criativo com a busca por uma solução de melhor desempenho, que guiou a definição da forma final.

A primeira etapa experimental, apresentada no capítulo 4, analisou elementos de proteção em contexto real, instalados em quatro edificações da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa. Ao todo foram avaliados três dispositivos do tipo *brise* e outros três do tipo painel microperfurado. Para tanto, empregou-se parâmetros de projeto verificados *in loco* e foram realizadas medições de iluminância e irradiação solar que tornaram possível a validação do modelo computacional utilizado nas simulações de desempenho.

No capítulo 5, novos modelos de dispositivo de sombreamento foram concebidos e otimizados, considerando a geometria (largura e espessura da aleta e amplitude da curva), o material (alumínio) e o desempenho estrutural da peça (deslocamento horizontal). Neste segundo experimento, foram avaliados sete cenários que consideraram um modelo base (sem dispositivo de proteção), a condição existente (dispositivo do tipo painel microperfurado) e cenários com dispositivos do tipo *brise*, sendo um elemento opaco de referência, uma variação perfurada desta peça e três modelos otimizados.

6.2. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Neste estudo foram apresentadas metodologias que aprofundaram a investigação sobre a análise de desempenho luminoso de elementos de controle solar externos fixos. As principais contribuições que se originaram do seu desenvolvimento foram:

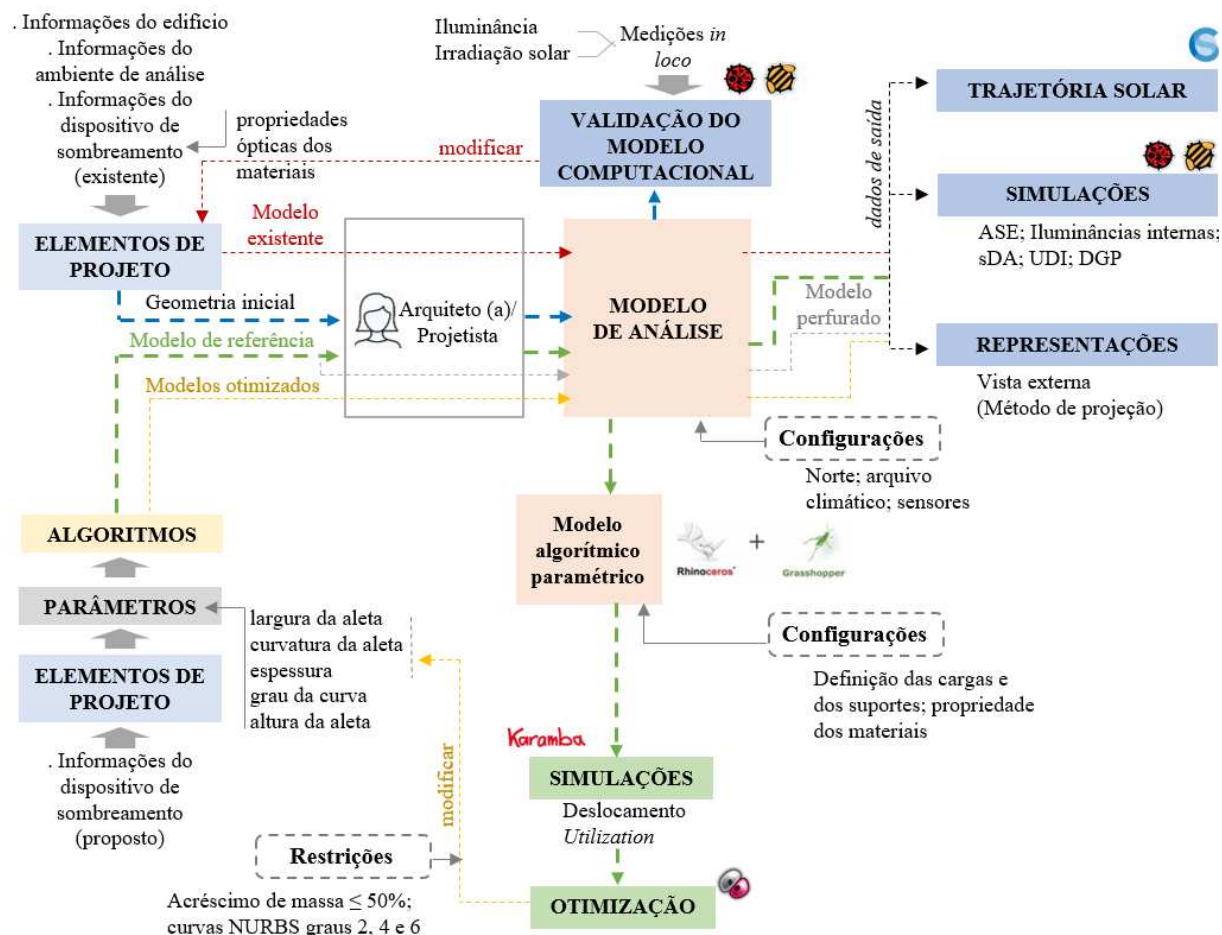
- (1) Na investigação da aplicabilidade dos processos *form-finding* foram apontados metodologias, ferramentas e parâmetros para avaliação. Demonstrou-se que a aplicação destes processos possibilita um novo contexto espacial e temporal para explorações da forma do edifício. Foi apontada a relação da geometria com o material e a estrutura, mostrando que a inserção de restrições estruturais às pesquisas trouxe um avanço ao permitir uma descrição mais precisa da geometria em todas as fases do processo de mudança da forma. Além disso, possibilitou o equilíbrio entre as restrições geométricas e estruturais, gerando soluções viáveis em um intervalo em que os parâmetros podem variar.
- (2) Quanto ao mapeamento das metodologias de processo de projeto para avaliação de dispositivos de sombreamento, foram apresentados dois modelos de fluxo de trabalho: um método simplificado - que abrange a modelagem e a simulação de desempenho, expansível para incorporar o processo de otimização da geometria e um método amplo - que traz a validação do modelo ou processo propostos.
- (3) Na avaliação do comportamento de elementos de proteção já instalados, a contribuição foi a aplicação de um método de trabalho que considera o comportamento de dispositivos de sombreamento já instalados, a partir da realização de experimento para calibrar o modelo e validar as simulações computacionais. Desta forma, confronta os resultados obtidos *in loco* com aqueles verificados em ambiente digital.
- (4) A proposição de novos elementos de controle solar se pautou na variabilidade geométrica destes dispositivos, considerando variáveis de projeto relacionadas ao seu dimensionamento. A principal contribuição do experimento desenvolvido foi a incorporação da dimensão material do dispositivo de sombreamento e do desempenho estrutural da peça no processo de investigação de seu desempenho luminoso.

De certo modo, esta pesquisa reflete o impacto que a tecnologia pode ter na arquitetura e como o uso de processos de projeto computacionais aborda e apoia as necessidades dos arquitetos. Neste sentido, a capacidade computacional destas ferramentas e a diversidade destes métodos de processo de projeto permitem que os profissionais aprimorem o processo de projeto arquitetônico, tanto tornando-o mais eficiente quanto expandindo seus limites conceituais.

A metodologia empregada não tem por objetivo a proposição de um fluxo de trabalho totalmente consolidado, mas em vez disso, fornece um ponto de partida para promover discussões adicionais que se movam em direção a investigações mais aprimoradas e completas.

Esta abordagem se pauta no emprego do desempenho para guiar a definição da forma final e segue representada na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama geral de fluxo da metodologia empregada na pesquisa



Fonte: A autora.

6.3. CONCLUSÕES FINAIS

Considerando as revisões integrativas de literatura realizadas, verificou-se que os trabalhos elencados apresentam, sobretudo, estudos de simulação computacional, com avaliações destinadas, em sua maioria, ao desempenho luminoso das edificações ou dos dispositivos de sombreamento, destacando-se indicadores relacionados à disponibilidade e à distribuição da luz natural.

Em processos *form-finding*, a incorporação do desempenho estrutural ocorreu tanto para a definição da geometria, em uma fase inicial do processo, quanto para a otimização da forma já definida. No primeiro caso, caracterizou-se como um fluxo de trabalho linear.

Nos casos de otimização, os indicadores estruturais na condição de genoma ou parâmetros se uniram aos indicadores luminosos, térmicos, entre outros, inseridos como objetivos.

A análise da literatura direcionada à avaliação de elementos de controle solar demonstrou que a concepção do dispositivo de sombreamento é baseada, sobretudo, em elementos retangulares opacos, com geometrias de base euclidiana, conformados por aleta única ou conjunto de aletas (como persianas e *brises* compostos). Verificou-se, ainda, para estes casos, que a avaliação do desempenho da luz do dia está, preferencialmente, associada à avaliação de desempenho energético (41,9%).

Os resultados das investigações conduzidas na primeira etapa experimental retrataram melhorias no desempenho verificadas com a aplicação da metodologia de trabalho proposta, que compreendeu a realização de medições *in loco* para validação do modelo computacional, modelagem dos ambientes e dos elementos de controle solar e simulações computacionais. Tal fato vai de encontro aos resultados apontados na literatura revisada. A inserção do dispositivo de sombreamento reduziu os níveis médios de iluminância interna em 54,6% para os ambientes com elementos de proteção do tipo *brise* e 66,5% para elementos do tipo painel microperfurado. Comparando-se as geometrias dos elementos de controle solar, dispositivos do tipo *brise* garantiram uma distribuição mais uniforme da luz do dia, contudo, menores níveis de vista externa máximos, devido à sua opacidade.

A segunda etapa experimental demonstrou a viabilidade do emprego de um fluxo de trabalho que integra a avaliação do desempenho estrutural da peça (a partir da análise dos deslocamentos horizontais) a avaliações de desempenho luminoso de dispositivos de controle solar. Elementos otimizados foram capazes de aumentar, em até duas vezes, os percentuais obtidos para UDI na faixa de 100 a 2000lx e de reduzir a possibilidade de ocorrência de ofuscamento, no período mais crítico do ano. Contudo, cabe destacar que as soluções otimizadas implicaram em aumento da massa do elemento e, conseqüentemente, no aumento dos custos com o sistema de sombreamento. Isto, a princípio, sugere que a otimização da forma não foi eficaz na economia de materiais.

De modo geral, a partir do método empregado, é possível apontar que a integração do material, do desempenho estrutural da peça e de sua forma durante a proposição de elementos de controle solar gerados a partir de processos *form-finding* pode contribuir positivamente no desempenho da luz do dia, embora ainda seja necessária uma investigação que conduza a um melhor aproveitamento da capacidade do material.

6.4. LIMITAÇÕES DA PESQUISA E CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A abordagem apresentada reflete a adoção de processos de projeto computacionais que combinam o processo criativo com a busca por uma solução de melhor desempenho. Neste sentido, simboliza um caminho inicial para o emprego do desempenho estrutural na definição da geometria de elementos de controle solar. O envolvimento de métodos de análise com processo de projeto arquitetônico permite, ainda, a adoção de processos de projeto colaborativos, possibilitando a participação de profissionais com diferentes habilidades.

O fluxo de trabalho apresentado foi pensado para ampliar a autonomia do arquiteto/projetista, dando-lhe ferramentas para definição da geometria de dispositivos de sombreamento que melhor se adequem à sua demanda de projeto. Entretanto, o código desenvolvido se configura como uma proposta embrionária. Ele necessita ser aprimorado quanto ao modo de inserção e manipulação dos dados e à visualização dos resultados, tornando-o mais amigável ao usuário e, conseqüentemente, viabilizando sua implementação em maior escala.

No que se refere às etapas experimentais apresentadas nesta Tese, a pesquisa se inclinou para a análise de dispositivos de sombreamento já instalados e para a proposição de novos elementos de controle solar que se basearam nas características e condições de instalação destes modelos existentes. Deste modo, não foram considerados os efeitos da variação do valor de cada um destes parâmetros no desempenho verificado.

A partir dos resultados obtidos para o dispositivo de sombreamento concebido, seguem sugeridas outras recomendações para continuidade da pesquisa:

- (1) Estabelecer e avaliar intervalos de valores para as condições de instalação do dispositivo de sombreamento, como aqueles relacionados à distância do elemento até à fachada e o percentual de cobertura da abertura, para investigação do desempenho em diferentes cenários de pesquisa.
- (2) Explorar estratégias de fabricação digital para protótipos e modelos em escala reduzida, com o objetivo de validar o processo de projeto proposto, a partir da confrontação entre os resultados de desempenho obtidos por meio de medições e das simulações computacionais. Esta abordagem permite, ainda, avaliar a processos de padronização e viabilidade técnica de fabricação em escala comercial.
- (3) Desenvolver e avaliar novos parâmetros para conversão do dispositivo concebido em um sistema de sombreamento dinâmico, visando avaliar como a integração do material,

da estrutura e da geometria impacta na investigação do desempenho deste elemento neste novo cenário.

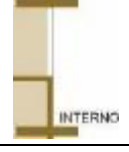
- (4) Introduzir a influência da estrutura dos suportes.
- (5) Investigar outros métodos de simulação e otimização multiobjetivo que permitam um processamento computacional simultâneo entre todos os indicadores avaliados, como métodos de Aprendizado de Máquina (*Maching Learning*) e Redes Neurais.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Caracterização dos modelos de elementos de controle solar instalados na Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Minas Gerais

Recurso do sistema	Modelo		Edifício	Orientação das fachadas
	Descrição	Representação (corte transv.)		
Sistemas ajustados manualmente	Saliências verticais fixas (concreto) com aletas horizontais metálicas móveis – instalação externa ao plano da envoltória		DBG	NE; SE; SO; NO
	Aletas verticais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		BBT	NE; SO
	Saliências verticais fixas (concreto) com aletas verticais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		BBT	SE; NO
	Aletas verticais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		PLI	NO; SO
			CCH II	SO
	Aletas horizontais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		PLI	SE
			CCH II	N
	Aletas verticais metálicas – instalação no plano da envoltória		DHI/DHG	NO
	Aletas verticais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		IPP	O
	Placas verticais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		DEA	NO; SE

Recurso do sistema	Modelo		Edifício	Orientação das fachadas
	Descrição	Representação (corte transv.)		
Sistemas fixos	Painel metálico perfurado – instalação externa ao plano da envoltória		DBA Anexo DEA	NE NO
			DEM	N; O; S; L
	Painel em placa pré-fabricada de concreto, com perfurações – instalação externa ao plano da envoltória		BIOAGRO CCE	SO; NE NO; SE
	Painel metálico curvo com veneziana metálica – instalação externa ao plano da envoltória		INCT	SO; NE
	Modelo do tipo “caixa de ovo” em concreto – execução na envoltória		DEF	SO; NE
	Aletas verticais metálicas – instalação externa ao plano da envoltória		Pavilhão de Educação Física	NO
	Saliências horizontais metálicas – instalação na envoltória		DEQ	N; L; O
	Modelo do tipo “caixa de ovo” em concreto com veneziana horizontal metálica – execução na envoltória		DEQ	O; L
	Aletas verticais em concreto – execução na envoltória		DFT	NE; SE; SO; NO

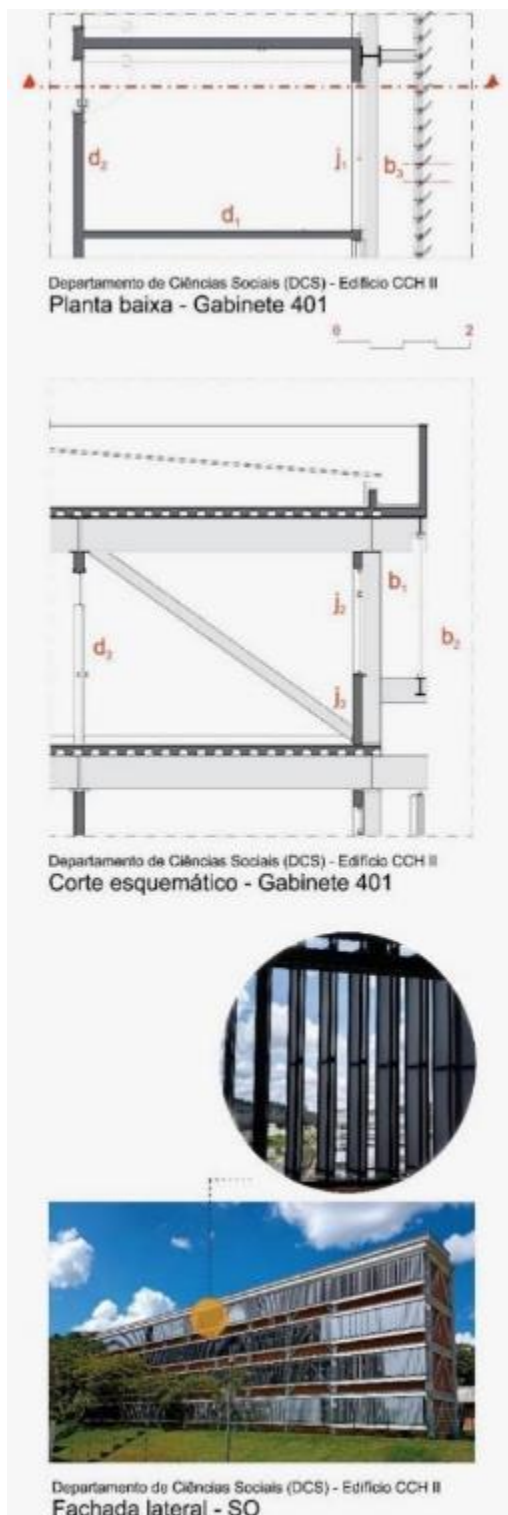
Fonte: a autora.

APÊNDICE B

Caracterização dos ambientes avaliados

Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise DCS-401

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS (DCS) – EDIFÍCIO CCH II / GABINETE 401



Caracterização do elemento de controle solar

Elemento de controle solar ¹	Brise metálico AS288 retrátil, Refax. Pannel ondulado, sem perfuração.
Matéria-prima	Alumínio (2,600 kg/m ²) e Aço/Aluzinc (6,000 Kg/m ²)
Cor	Alumínio R99
Sistema de sombreamento	Passivo – Sistema ajustado manualmente
Metodologia	Processo de projeto convencional
Instalação	Aletas móveis
Condições de análise	Posição fixa – 45°

1. Informações extraídas do catálogo do Fabricante. Refax. Brise AS288. Disponível em: <https://www.refax.com.br/wp-content/uploads/2020/09/brise_as288_alta.pdf> Acesso em 01/12/2022.

Dimensionamento do elemento de controle solar

b ₁	Distância fachada-brise (m)	0,85
b ₂	Dimensão vertical da aleta (m)	2,24
b ₃	Distância entre aletas (m) (eixo)	0,28

Caracterização e dimensionamento da sala

Revestimentos: Paredes emassadas e pintadas, cor Branco Neve; Forro modular termocústico, placas 62,5x62,5x19cm; Piso em granilite cinza polido; Rodapé de granito Cinza Bressan, h=0,10m.

d ₁	Maior dimensão (m)	4,25
d ₂	Menor dimensão (m)	2,84
d ₃	Distância piso-forro (m)	2,84
	Área de piso (m ²)	12,07
	Área de fachada (m ²)	9,88
	Orientação da fachada (°)	217

Caracterização e dimensionamento da esquadria

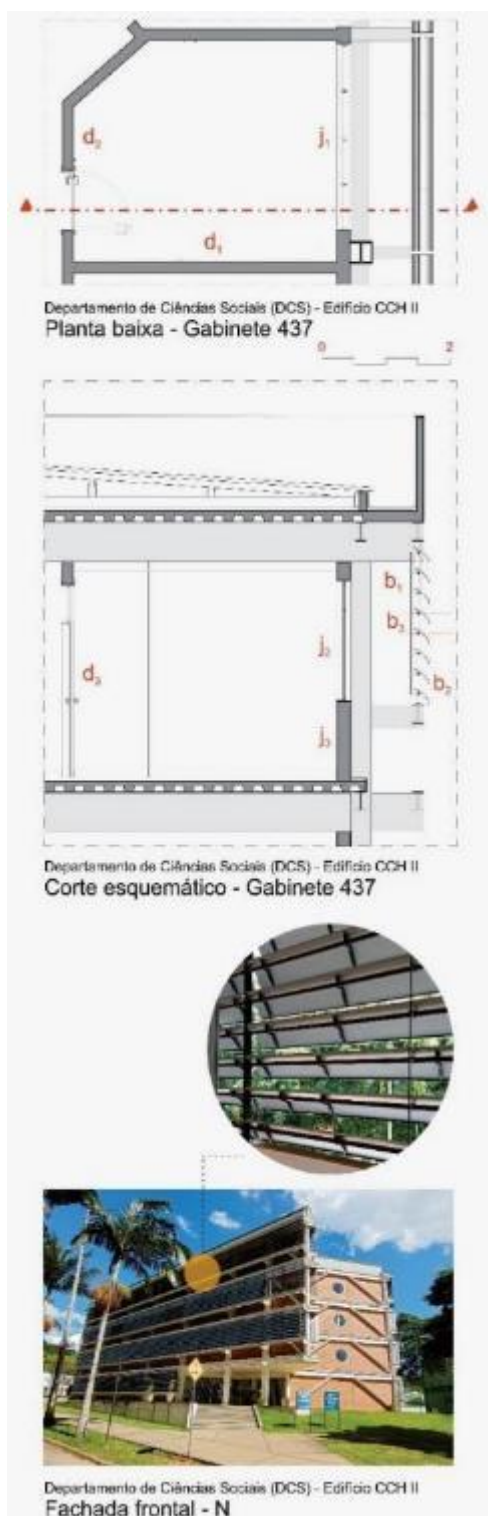
Esquadria em alumínio anodizado natural e vidro liso 6mm.

j ₁	Dimensão horizontal (m)	2,31
j ₂	Dimensão vertical (m)	1,66
j ₃	Altura peitoril (m)	1,07
	Área de abertura (m ²)	3,83
	PAF (%) ¹	39

¹ Percentual de abertura na fachada.

Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise DCS-437

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS (DCS) – EDIFÍCIO CCH II / GABINETE 437



Caracterização do elemento de controle solar

Elemento de controle solar ¹	Brise metálico AS288 retrátil, Refax. Pannel ondulado, sem perfuração.
Matéria-prima	Alumínio (2,600 kg/m ²) e Aço/Aluzinc (6,000 Kg/m ²)
Cor	Alumínio R99
Sistema de sombreamento	Passivo – Sistema ajustado manualmente
Metodologia	Processo de projeto convencional
Instalação	Aletas móveis
Condições de análise	Posição fixa – 45°

1. Informações extraídas do catálogo do Fabricante, Refax. Brise AS288. Disponível em: <https://www.refax.com.br/wp-content/uploads/2020/09/brise_as288_alta.pdf> Acesso em 01/12/2022.

Dimensionamento do elemento de controle solar

b ₁	Distância fachada-brise (m)	0,88
b ₂	Dimensão vertical conjunto de aletas (m)	2,24
b ₃	Distância entre aletas (m) (eixo)	0,28

Caracterização e dimensionamento da sala

Revestimentos: Paredes emassadas e pintadas, cor Branco Neve; Forro modular termoacústico, placas 62,5x62,5x19cm; Piso em granilite cinza polido; Rodapé de granito Cinza Bressan, h=0,10m.

d ₁	Maior dimensão (m)	3,69
d ₂	Menor dimensão (m)	3,05
d ₃	Distância piso-forro (m)	2,83
	Área de piso (m ²)	10,79
	Área de fachada (m ²)	10,68
	Orientação da fachada (°)	349

Caracterização e dimensionamento da esquadria

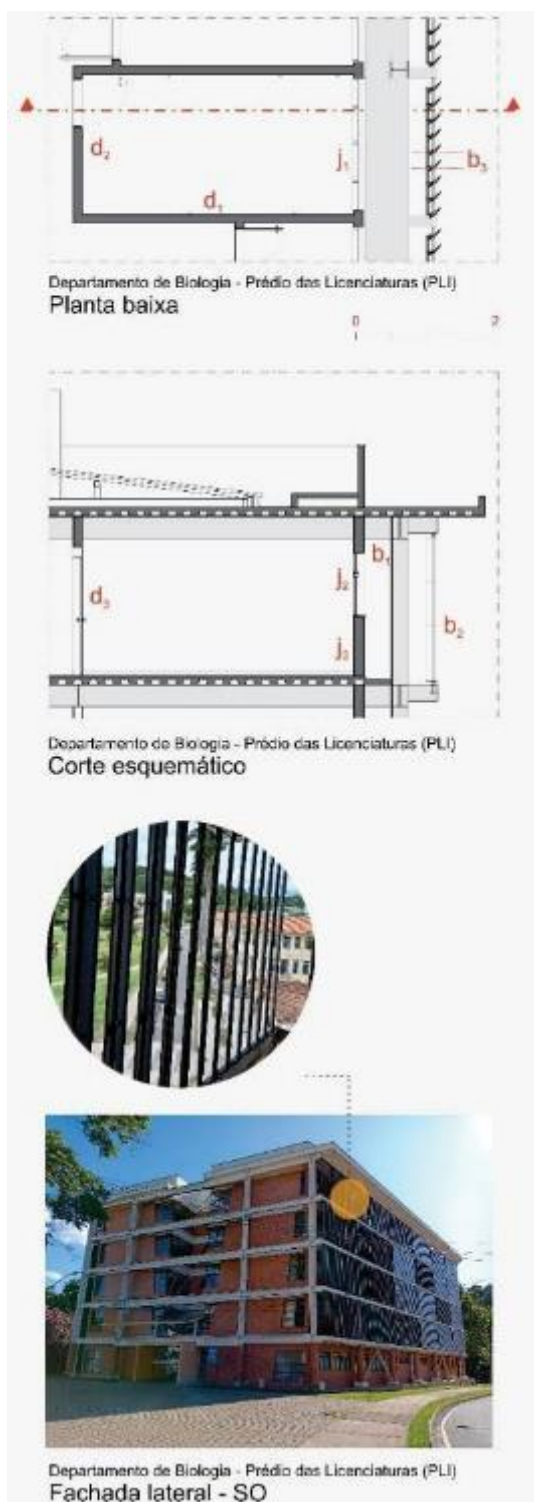
Esquadria em alumínio anodizado natural e vidro liso 6mm.

j ₁	Dimensão horizontal (m)	2,57
j ₂	Dimensão vertical (m)	1,64
j ₃	Altura peitoril (m)	1,06
	Área de abertura (m ²)	4,27
	PAF (%)	40

Fonte: acervo da autora, novembro/2022.

Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise PLI

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA – PRÉDIO DAS LICENCIATURAS (PLI)



Caracterização do elemento de controle solar

Elemento de controle solar ¹	Brise metálico AS288 retrátil, Refax. Pannel ondulado, sem perfuração.
Matéria-prima	Alumínio (2,600 kg/m ²) e Aço/Aluzinc (6,000 Kg/m ²)
Cor	Alumínio R99
Sistema de sombreamento	Passivo – Sistema ajustado manualmente
Metodologia	Processo de projeto convencional
Instalação	Aletas móveis
Condições de análise	Posição fixa – 45°

1. Informações extraídas do catálogo do Fabricante, Refax. Brise AS288. Disponível em: <https://www.refax.com.br/wp-content/uploads/2020/09/brise_as288_alta.pdf> Acesso em 01/12/2022.

Dimensionamento do elemento de controle solar

b ₁	Distância fachada-pannel (m)	1,20
b ₂	Dimensão vertical pannel (m)	2,69
b ₃	Distância entre aletas (m) (eixo)	0,28

Caracterização e dimensionamento da sala

Revestimentos: Paredes emassadas e pintadas, cor Branco Neve; Telha metálica aparente (sem forro); Piso em porcelanato bege claro; Rodapé de granito Cinza Bressan, h=0,10m.

d ₁	Maior dimensão (m)	4,83
d ₂	Menor dimensão (m)	2,50
d ₃	Distância piso-forro (m)	2,86
	Área de piso (m ²)	12,08
	Área de fachada (m ²)	7,13
	Orientação da fachada (°)	243

Caracterização e dimensionamento da esquadria

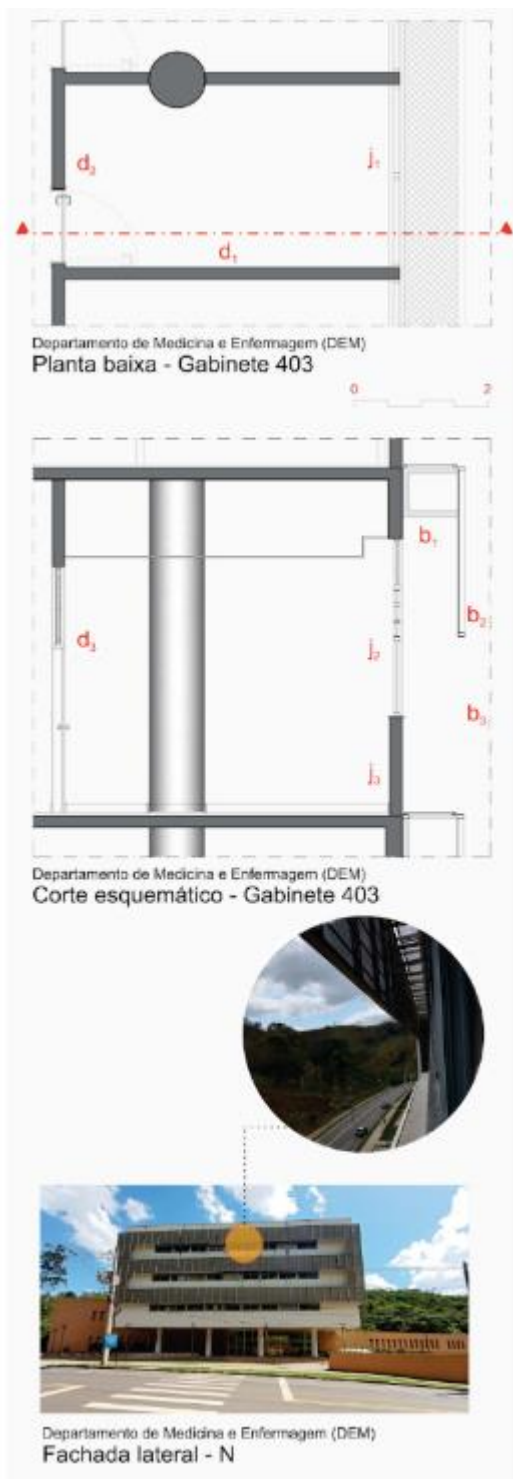
Esquadria em alumínio anodizado bronze e vidro liso 6mm.

j ₁	Dimensão horizontal (m)	2,38
j ₂	Dimensão vertical (m)	1,14
j ₃	Altura peitoril (m)	1,08
	Área de abertura (m ²)	2,71
	PAF (%)	38

Fonte: acervo da autora, novembro/2022.

Elemento de controle solar do tipo painel perfurado: Ambiente de análise DEM-403

DEPARTAMENTO DE MEDICINA E ENFERMAGEM (DEM) – GABINETE 403



Caracterização do elemento de controle solar

Elemento de controle solar ¹	Revestimento Metálico Painel MW270, Refax. Painel ondulado, perfurado. Padrão de perfuração paralela Ø2,4mm, abertura 16%.
Matéria-prima	Alumínio (2,450 Kg/m ²) e Aço/Aluzinc (6,125 Kg/m ²)
Cor	Alumínio R99
Sistema de sombreamento	Passivo - Sistema fixo
Metodologia	Processo de projeto convencional

1. Informações extraídas do catálogo do Fabricante. Refax. Painel MW270. Disponível em: <<https://www.refax.com.br/wp-content/uploads/2020/09/CAT%C3%81LOGO-MW270.pdf>> Acesso em 01/12/2022.

Dimensionamento do elemento de controle solar

b_1	Distância fachada-painel (m)	0,73
b_2	Dimensão vertical painel (m)	2,14
b_3	Dimensão vertical abertura (m)	2,26

Caracterização e dimensionamento da sala

Revestimentos: Paredes emassadas e pintadas, cor Branco Neve; Forro de gesso acartonado, pintado, cor Branco Neve; Piso em granilite cinza polido; Rodapé de madeira, $h=0,10$ m.

d_1	Maior dimensão (m)	4,04
d_2	Menor dimensão (m)	2,31
d_3	Distância piso-forro (m)	3,21
	Área de piso (m ²)	9,18
	Área de fachada (m ²)	9,70
	Orientação da fachada (°)	20

Caracterização e dimensionamento da abertura

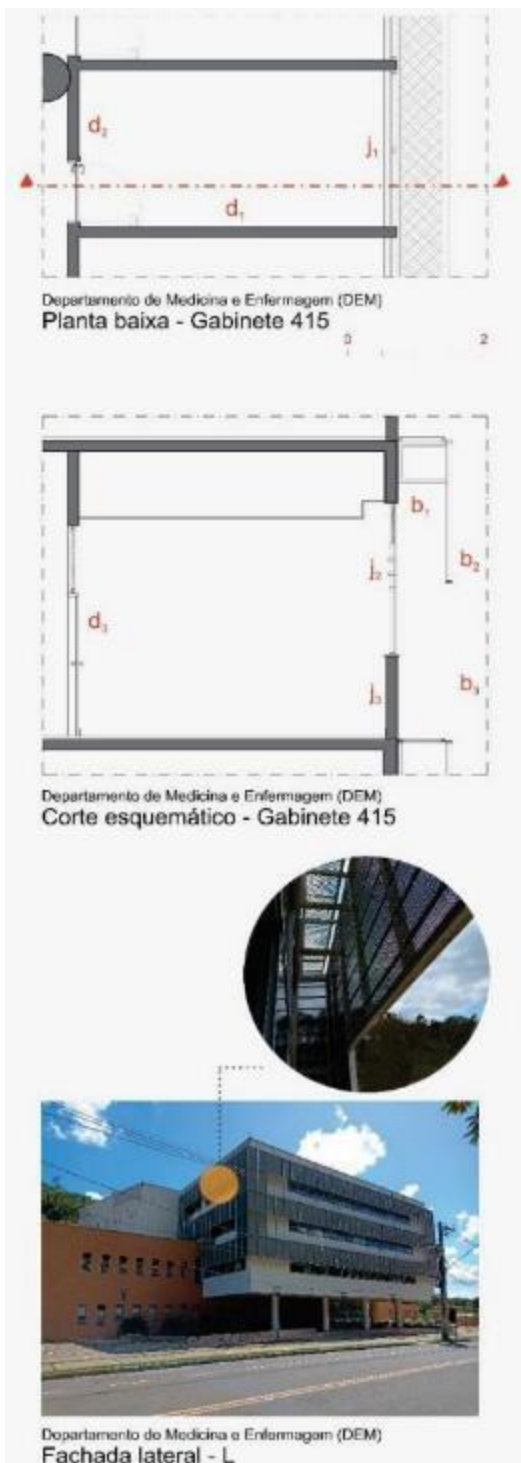
Esquadria em alumínio anodizado natural e vidro liso 6mm.

j_1	Dimensão horizontal (m)	2,31
j_2	Dimensão vertical (m)	2,25
j_3	Altura peitoril (m)	1,21
	Área de abertura (m ²)	3,72
	PAF (%)	38

Fonte: acervo da autora, novembro/2022.

Elemento de controle solar do tipo painel perfurado: Ambiente de análise DEM-415

DEPARTAMENTO DE MEDICINA E ENFERMAGEM (DEM) – GABINETE 415



Caracterização do elemento de controle solar

Elemento de controle solar ¹	Revestimento Metálico Painel MW270, Refax. Painel ondulado, perfurado. Padrão de perfuração paralela Ø2,4mm, abertura 16%.
Matéria-prima	Alumínio (2,450 kg/m ²) e Aço/Aluzinc (6,125 Kg/m ²)
Cor	Alumínio R99
Sistema de sombreamento	Passivo - Sistema fixo
Metodologia	Processo de projeto convencional

1. Informações extraídas do catálogo do Fabricante. Refax. Painel MW270. Disponível em: <<https://www.refax.com.br/wp-content/uploads/2020/09/CAT%C3%81LOGO-MW270.pdf>> Acesso em 01/12/2022.

Dimensionamento do elemento de controle solar

b ₁	Distância fachada-painel (m)	0,67
b ₂	Dimensão vertical painel (m)	2,12
b ₃	Dimensão vertical abertura (m)	2,32

Caracterização e dimensionamento da sala

Revestimentos: Paredes emassadas e pintadas, cor Branco Neve; Forro de gesso acartonado, pintado, cor Branco Neve; Piso em granilite cinza polido; Rodapé de madeira, h=0,10m.

d ₁	Maior dimensão (m)	4,36
d ₂	Menor dimensão (m)	2,31
d ₃	Distância piso-forro (m)	3,21
	Área de piso (m ²)	10,07
	Área de fachada (m ²)	9,70
	Orientação da fachada (°)	109

Caracterização e dimensionamento da abertura

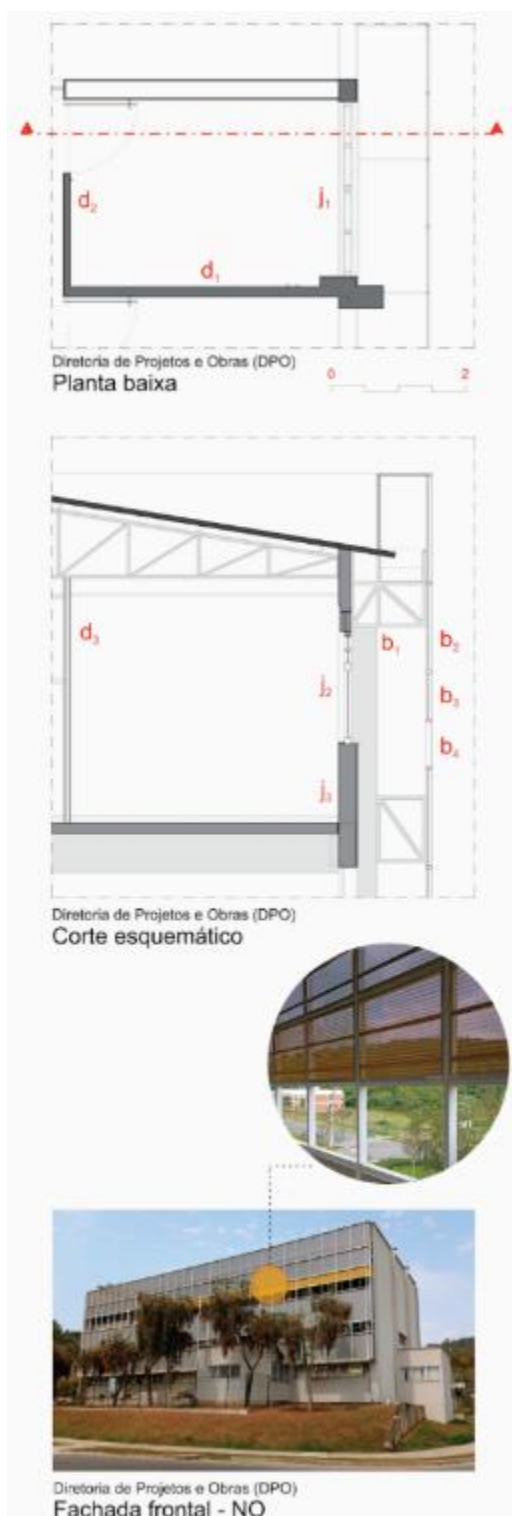
Esquadria em alumínio anodizado natural e vidro liso 6mm.

j ₁	Dimensão horizontal (m)	2,31
j ₂	Dimensão vertical (m)	2,25
j ₃	Altura peitoril (m)	1,20
	Área de abertura (m ²)	3,72
	PAF (%)	38

Fonte: acervo da autora, novembro/2022.

Elemento de controle solar do tipo painel perfurado: Ambiente de análise DPO

DIRETORIA DE PROJETOS E OBRAS (DPO)



Caracterização do elemento de controle solar

Elemento de controle solar ¹	Revestimento Metálico Painel MW270, Refax. Painel ondulado, perfurado. Padrão de perfuração paralela Ø2,4mm, abertura 16%.
Matéria-prima	Alumínio (2,450 kg/m ²) e Aço/Aluzinc (6,125 Kg/m ²)
Cor	Alumínio R99 e Amarelo Ouro R56
Sistema de sombreamento	Passivo - Sistema fixo
Metodologia	Processo de projeto convencional

1. Informações extraídas do catálogo do Fabricante. Refax. Painel MW270. Disponível em: <<https://www.refax.com.br/wp-content/uploads/2020/09/CAT%C3%81LOGO-MW270.pdf>> Acesso em 01/12/2022.

Dimensionamento do elemento de controle solar

b_1	Distância fachada-painel (m)	1,12
b_2	Dimensão vertical módulo superior (m)	1,29
b_3	Dimensão vertical módulo inferior (m)	0,68
b_4	Dimensão vertical abertura (m)	0,68

Caracterização e dimensionamento da sala

Revestimentos: Paredes emassadas e pintadas, cor Branco Neve; Forro modular termoacústico, placas 62,5x62,5x19cm; Piso em granilite cinza polido; Rodapé de granito Cinza Bressan, h=0,10m.

d_1	Maior dimensão (m)	4,00
d_2	Menor dimensão (m)	2,80
d_3	Distância piso-forro (m)	3,40
	Área de piso (m ²)	11,20
	Área de fachada (m ²)	9,70
	Orientação da fachada (°)	311

Caracterização e dimensionamento da abertura

Esquadria em alumínio anodizado natural e vidro liso 6mm.

j_1	Dimensão horizontal (m)	2,62
j_2	Dimensão vertical (m)	1,65
j_3	Altura peitoril (m)	1,22
	Área de abertura (m ²)	4,32
	PAF (%)	42

Fonte: acervo da autora, novembro/2022.

APÊNDICE C

Propriedades ópticas dos materiais de revestimento: determinação da refletância e absorptância solares

As características ópticas dos materiais de revestimento do interior das salas foram definidas a partir de uma metodologia de medição de refletância espectral em superfícies opacas, com a utilização do Espectrômetro portátil ALTA II *Reflectance Spectrometer*, Vernier *Software & Technology*. Neste trabalho, foram realizadas três medições diferentes para cada superfície e o valor médio foi utilizado para o cálculo da absorptância solar.

Este equipamento mede refletâncias correspondentes a radiações em 11 comprimentos de onda distintos, entre 470 e 940nm, dos quais sete são na região visível e quatro na região do infravermelho-próximo. O espectrômetro não fornece o valor absoluto da refletância do material, apenas indica voltagem, sendo necessária a execução de cálculos matemáticos para sua valoração e, posteriormente, para determinação dos valores de absorptância (DORNELLES, 2008; PEREIRA *et al.*, 2015; 2017). Estas operações matemáticas permitem determinar a porcentagem que cada amostra reflete, comparativamente a uma amostra de referência. Para esta pesquisa, adotou-se como referência uma folha de papel sulfite branco (marca Ripax, 75 g/m²) e os procedimentos de determinação da refletância apresentados por PEREIRA *et al.*, 2015; 2017. A seguir é apresentada a Equação 1, para obtenção da refletância espectral da amostra para cada comprimento de onda. São apresentadas, ainda, a curva de irradiação solar espectral (Figura 4) e a curva de refletância espectral do papel branco (Figura 5).

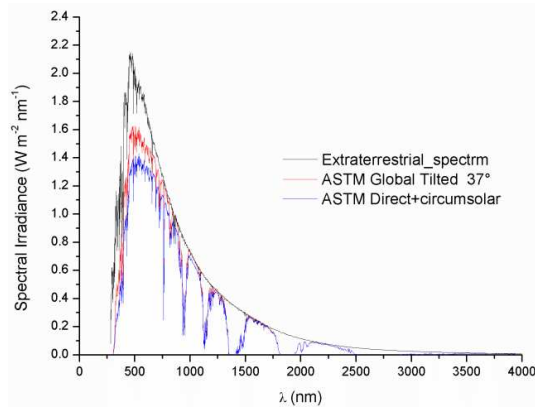
Equação 1

$$\rho_{\lambda,amostra} = \left(\frac{V_{\lambda,amostra} - V_{f,amostra}}{V_{\lambda,ref} - V_{f,ref}} \right) \times \rho_{\lambda,ref}$$

Fonte: Pereira *et al.* (2015; 2017).

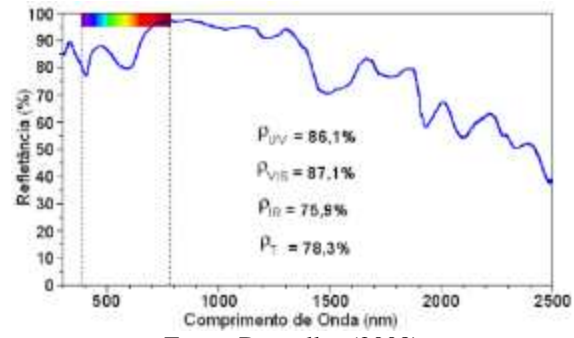
Em que, $\rho_{\lambda,amostra}$ é a Refletância da amostra para um determinado comprimento de onda λ (%), $V_{\lambda,amostra}$ é a Voltagem da amostra medida no comprimento de onda λ (mV), $V_{f,amostra}$ é a Voltagem de fundo da amostra (mV), $V_{\lambda,ref}$ é a Voltagem da amostra de referência medida no comprimento de onda λ (mV), $V_{f,ref}$ é a Voltagem de fundo da amostra de referência (mV) e $\rho_{\lambda,ref}$ é a Refletância da amostra de referência, no comprimento de onda λ (%).

Figura 4 – Irradiação solar espectral



Fonte: American Society for Testing and Materials (2012).

Figura 5 – Curva de refletância espectral do papel branco Ripax 75 g/m²



Fonte: Dornelles (2008).

Para o cálculo da refletância e da absortância solares, PEREIRA *et al.*, 2015 propuseram uma sequência de etapas, com base nas Equações 2 a 6.

Equação 2

$$G_{(\lambda)refletida} = \rho_{(\lambda)} \times G_{\lambda}$$

Fonte: Pereira *et al.* (2015).

Em que, $G_{(\lambda)refletida}$ é a Irradiação solar global espectral refletida pela amostra ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), $\rho_{(\lambda)}$ é a Refletância espectral da amostra (adimensional) e $G_{(\lambda)}$ é a Irradiação solar global espectral ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$).

Equação 3

$$I_{(\lambda_x-y)refletida} = ((G_{(\lambda_y)refletida} + G_{(\lambda_x)refletida})/2) \times (\lambda_y - \lambda_x)$$

Fonte: Pereira *et al.* (2015).

Em que, $I_{(\lambda_x-y)refletida}$ é a Intensidade de irradiação solar global refletida pela amostra no intervalo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), $G_{(\lambda_x)refletida}$ é a Irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda x ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), $G_{(\lambda_y)refletida}$ é a Irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda y ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), λ_x é o Comprimento de onda x (nm) e λ_y é o Comprimento de onda y (nm).

Equação 4

$$I_{(\lambda_x-y)} = ((G_{(\lambda_y)} + G_{(\lambda_x)})/2) \times (\lambda_y - \lambda_x)$$

Fonte: Pereira *et al.* (2015).

Em que, $I_{(\lambda_x-y)}$ é a Intensidade de irradiação solar global no intervalo ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), $G_{(\lambda_x)}$ é a Irradiação solar global no comprimento de onda x ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), $G_{(\lambda_y)}$ é a Irradiação solar global no comprimento de onda y ($\text{W/m}^2 \cdot \text{nm}$), λ_x é o Comprimento de onda x (nm) e λ_y é o Comprimento de onda y (nm).

Equação 5

$$\rho_{solar} = \left(\frac{\sum_{\lambda=300}^{\lambda=2500} I_{(\lambda_{x-y})refletida}}{\sum_{\lambda=300}^{\lambda=2500} I(\lambda_{x-y})} \right) \times 100$$

Em que, ρ_{solar} é a Refletância solar ajustada (%), $I_{(\lambda_{x-y})refletida}$ é a Intensidade de irradiação solar global refletida pela amostra no intervalo (W/m^2) e

$I_{(\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade de irradiação solar global no intervalo (W/m^2).

Equação 6

$$\alpha = 1 - \rho$$

Em que, α é a Absortância solar (adimensional) e ρ é a Refletância solar (adimensional).

Fonte: Dornelles (2008) e Pereira *et al.* (2015; 2017).¹

¹ DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas:** métodos de determinação e base de dados para tintas látex, acrílica e PVA. 2008. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PEREIRA, C. D. *et al.* **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas.** Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E): Florianópolis, 2015.

_____. Avaliação experimental do espectrômetro Alta II e sua aplicação na normatização brasileira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 197-203, out./dez. 2017.

APÊNDICE D

Caracterização e resultados das medições e simulações

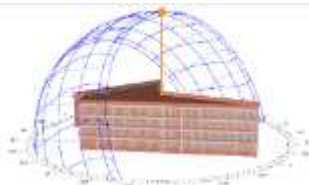
Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise DCS-401

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS (DCS) – EDIFÍCIO CCH II / GABINETE 401

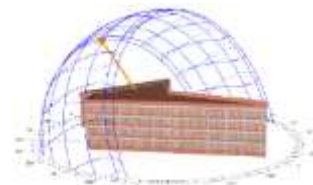
Modelagem



Volume. Fachada Sudoeste.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinoceros + Grasshopper.



Trajetória solar – verão (sol 12h).
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinoceros + ClimateStudio.



Trajetória solar – inverno (sol 12h).
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinoceros + ClimateStudio.

Validação do modelo computacional – medições em contexto real

Instrumentação



Vista da instrumentação interna a partir do fundo
da sala e a partir da janela da sala.



Vista da instrumentação externa.

Fonte: acervo da autora. Fev/2023.

Posicionamento dos sensores

ILUMINÂNCIA NO PLANO DE TRABALHO

- Quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso e sensores igualmente distribuídos
- Um ponto externo na cobertura, próximo à sala, afastado 4,35m do alinhamento da platibanda.

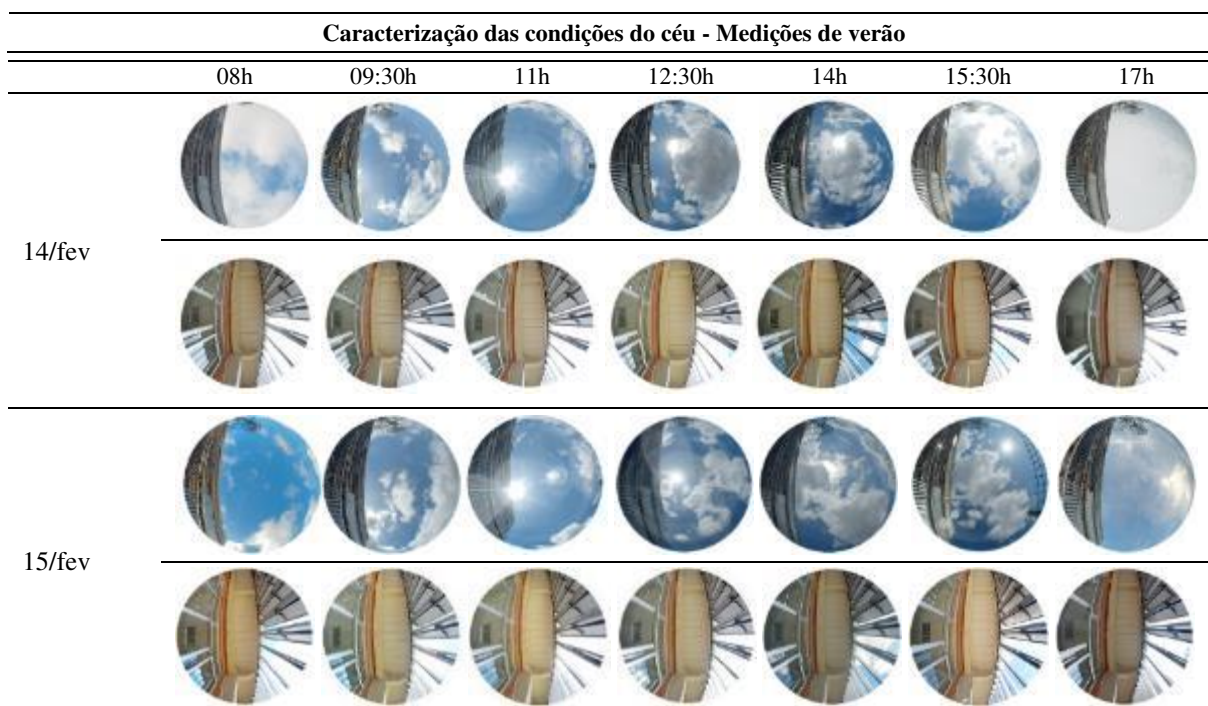
IRRADIAÇÃO

- Um ponto interno, afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso
- Um ponto externo na cobertura, próximo à sala, afastado 4,60m do alinhamento da platibanda.

Propriedades dos materiais de revestimento

Forro modular termoacústico (Branco) ¹	$\rho = 0,85$
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,71$
Piso cerâmico (Cinza)	$\rho = 0,62$
Porta do tipo prancheta de madeira (pintura Branco)	$\rho = 0,86$
Vidro incolor (6mm)	$\tau = 0,60$
<i>Brise soleil</i> (Cinza)	$\rho = 0,80$

¹ Informação extraída do catálogo do Fabricante. Armstrong World Industries. Forro termoacústico CIRRUS. Disponível em: <https://www.armstrongceilings.com/commercial/pt-br/commercial-ceilings-walls/mineral-fiber-and-fiberglass-ceiling-tiles.html#bbbh=%7B%22selectedItem%22%3A%7B%22namen%22%3A%22browse%22%2C%22itemIndex%22%3A%22%7D%7D>. Acesso em 01/12/2022.

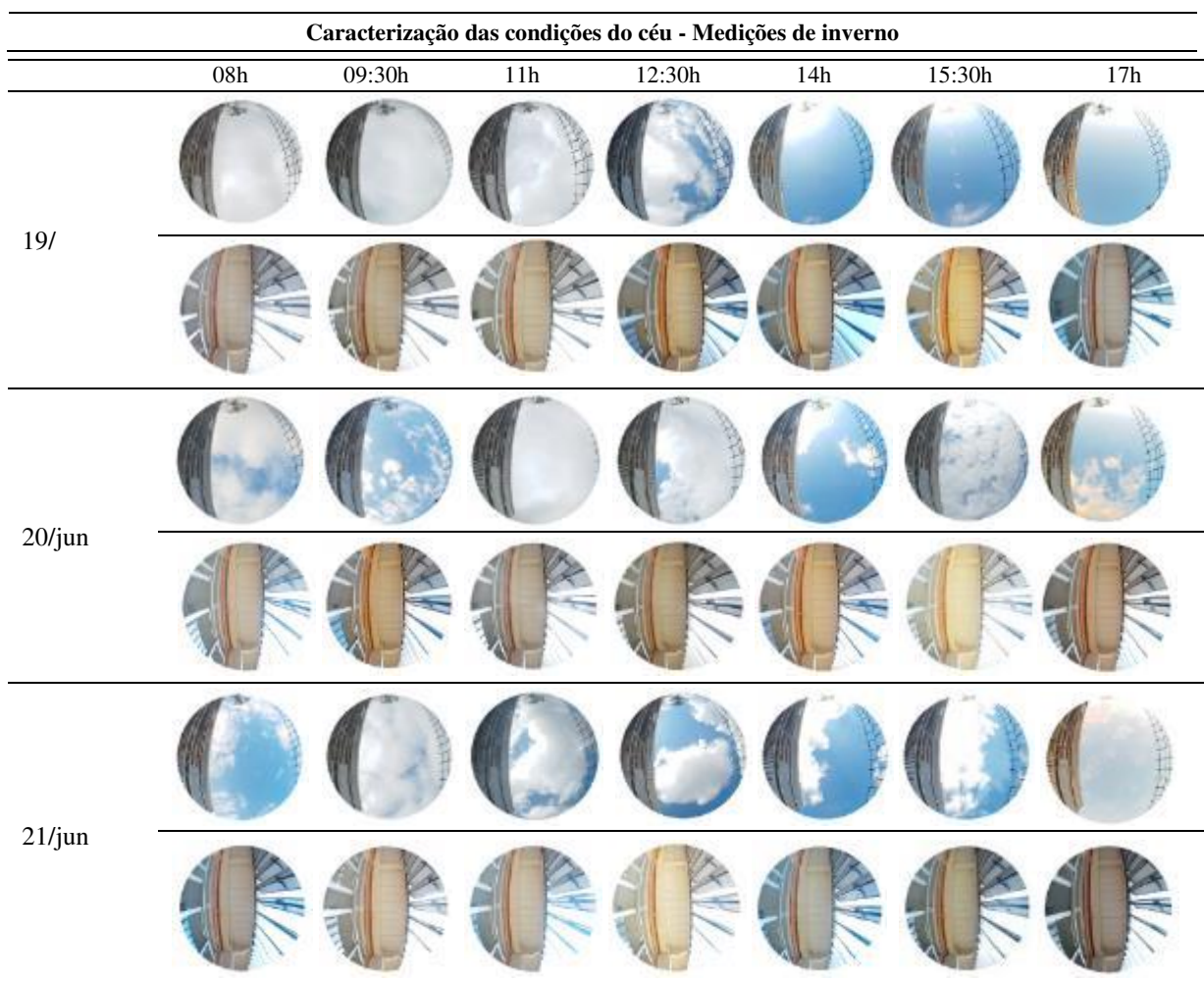


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

Irradiação (W/m ²) – medidas externas				Irradiação (W/m ²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	14/2	15/2	Média		14/2	15/2	Média		14/2	15/2	Média
09:00	260	382	321		10	12	11		27278	36344	31811
10:00	675	584	630		16	17	16		62781	40315	56548
11:00	661	734	698		21	18	19		54510	62678	58594
12:00	717	1100	909		21	17	19		56746	94282	75514
13:00	1032	1125	1078		20	18	19		86200	94196	90198
14:00	1182	822	1002		17	18	18		98839	66891	82865
15:00	926	926	926		17	17	17		74216	58568	66392
16:00	429	715	572		12	16	14		35613	58405	47009
17:00	84	279	182		2	9	5		13325	23504	18414

Iluminâncias (lx) - medidas internas												
	Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3			Sensor 4		
	14/2	15/2	Média	14/2	15/2	Média	14/2	15/2	Média	14/2	15/2	Média
09:00	277	357	317	424	516	470	788	910	849	448	565	507
10:00	462	449	455	640	642	641	1100	1163	1131	739	751	745
11:00	496	506	501	717	711	714	1343	1244	1293	848	828	838
12:00	500	554	527	728	744	736	1372	1190	1281	844	874	859
13:00	539	529	534	751	734	743	1318	1238	1278	904	899	902
14:00	549	499	524	753	702	727	1206	1237	1222	882	839	860
15:00	519	491	505	716	683	700	1165	1210	1187	876	859	868
16:00	337	525	431	491	707	599	948	1168	1058	624	913	768
17:00	66	272	169	116	399	257	243	718	481	121	495	308

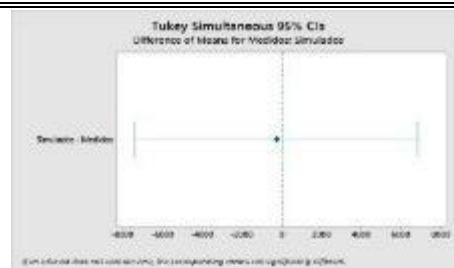
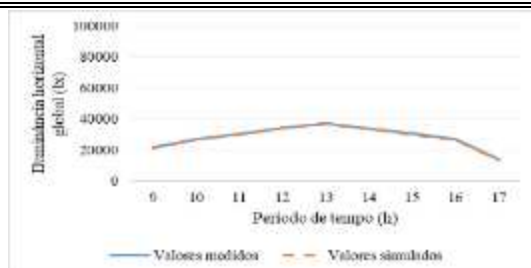


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

Irradiação (W/m²) - medidas externas					Irradiação (W/m²) - medidas internas					Iluminâncias (lx) – medidas externas				
	19/6	20/6	21/6	Média		19/6	20/6	21/6	Média		19/6	20/6	21/6	Média
09:00	120	207	265	164		5	8	4	6		16372	22717	25615	21568
10:00	180	335	269	257		8	8	10	9		20869	27704	32114	26896
11:00	256	291	287	273		9	9	10	9		26113	28521	35828	30154
12:00	444	198	315	321		13	9	12	11		32552	33530	36767	34283
13:00	646	517	364	582		11	12	13	12		40259	36507	34737	37168
14:00	498	654	331	576		9	9	10	9		35472	33688	31605	33588
15:00	615	615	551	615		8	8	6	7		30019	31913	29861	30598
16:00	402	526	191	464		5	9	7	7		25511	28034	26209	26585
17:00	162	197	86	180		3	4	3	3		11965	14565	14840	13790

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	19/6	20/6	21/6	Média	19/6	20/6	21/6	Média	19/6	20/6	21/6	Média	19/6	20/6	21/6	Média
09:00	125	193	209	176	210	299	312	273	424	556	444	475	240	331	280	284
10:00	183	272	279	245	291	408	414	371	583	662	701	649	346	415	437	399
11:00	249	274	331	285	383	423	483	430	770	828	768	789	462	490	499	484
12:00	332	197	370	300	490	310	522	440	862	634	850	782	553	375	574	501
13:00	355	330	386	357	499	476	547	507	804	831	895	843	563	541	602	569
14:00	309	327	318	318	445	453	455	451	691	697	696	695	467	494	499	487
15:00	289	256	289	278	399	365	399	388	595	551	619	588	422	393	422	412
16:00	198	242	212	218	299	348	325	324	455	594	537	529	299	406	351	352
17:00	109	123	111	114	180	197	184	187	289	337	303	309	170	202	185	186

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis externos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados²

Análise de Variância:
One-way ANOVA: Medido; Simulado

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Medido; Simulado

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	382812	382812	0,01	0,932
Error	16	821960822	51372551		
Total	17	822343635			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7167,46	0,05%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Medido	9	28288	7171	(23223; 33352)
Simulado	9	27996	7164	(22915; 33061)

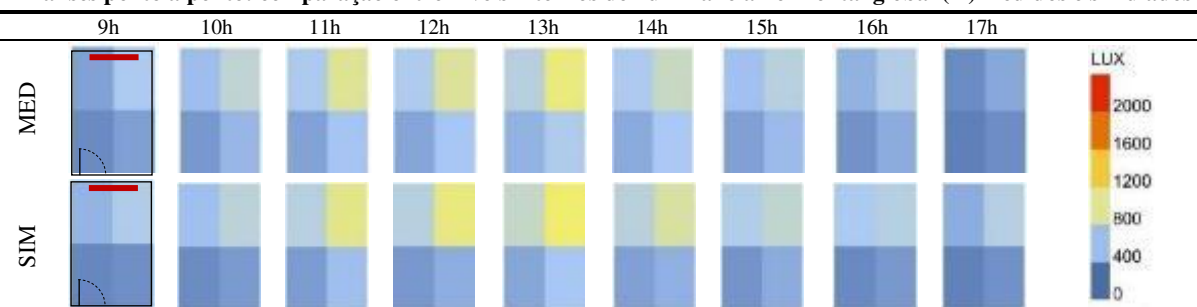
Pooled StDev = 7167,46

Tukey Pairwise Comparisons
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Medido	9	28288	A
Simulado	9	27996	A

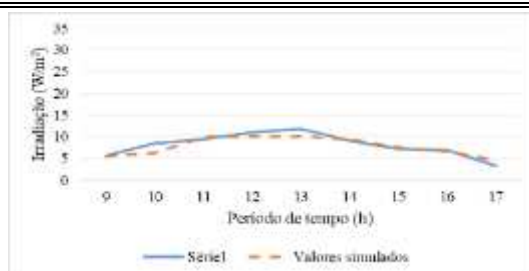
Means that do not share a letter are significantly different.

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno.

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados


$$MBE^2 = -6,9\% \text{ e } CV (RMSE) = 17,1\%$$

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno. Primeira imagem com indicação do posicionamento das esquadrias (janela em vermelho).

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de irradiação (W/m^2) medidos e simulados


$$MBE = 4,2\% \text{ e } CV (RMSE) = 9,3\%$$

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno.

² O componente utilizado na validação, *HB Point-in-time grid-based (PITGrid)*, solicita *_sky* como um de seus *inputs*. Pode-se utilizar um céu padrão CIE, valores específicos de iluminância ou dados de entrada baseados no clima. Inicialmente, foram empregados os valores medidos, mas estes não retornaram resultados satisfatórios. Optou-se, então, por dados de entrada baseados no clima. Assim, foram indicados estes dados para reprodução aproximada das condições do céu verificadas nas medições, que resultaram em níveis externos de iluminâncias obtidos por meio de simulação. Os valores obtidos foram confrontados com os valores de iluminância medidos, por meio de análise de variância.

² O erro de viés médio relativo (*Relative mean bias error – MBE_{rel}*) e o erro quadrático médio relativo (*Relative root mean square error – RMSE*) foram utilizados para avaliar o erro entre os valores de iluminâncias internos, simulados e medidos, em consonância com outros estudos (Lakhdari; Sriti; Painter, 2021; Verma; Gopalakrishnan, 2023).

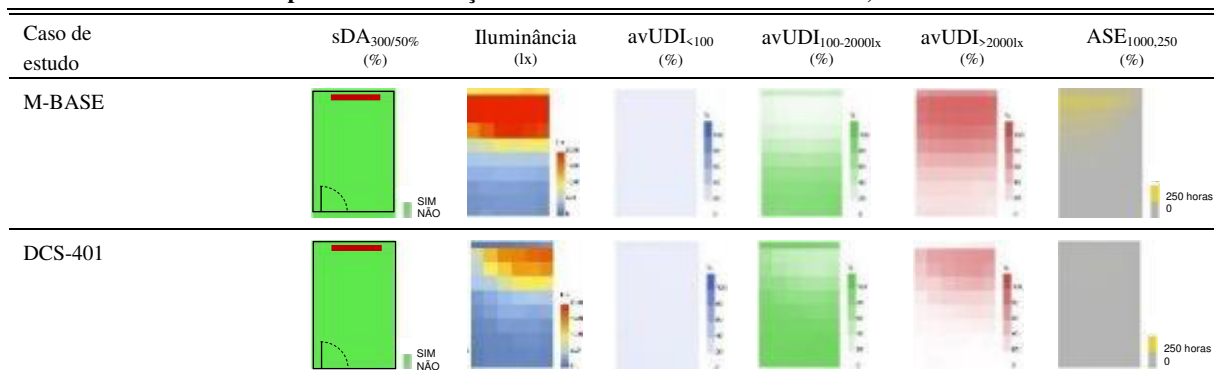
Simulação computacional

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	1192	11,3	36,5	52,2	13
DCS- 401	100	487	11,5	70,7	17,8	0

Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); DCS-401 = Elemento de controle solar – DCS sala 401.

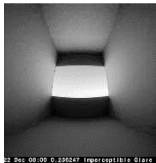
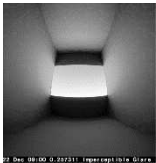
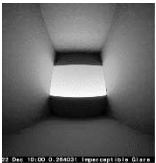
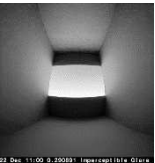
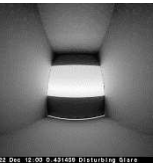
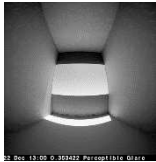
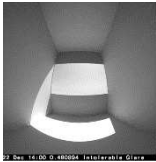
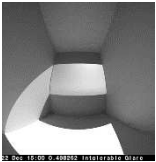
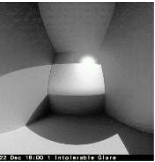
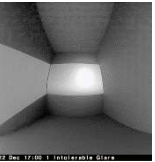
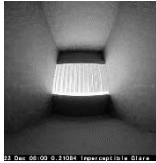
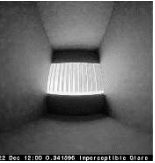
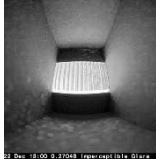
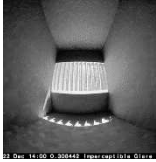
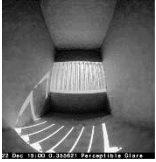
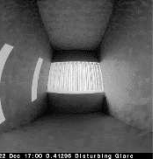
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias



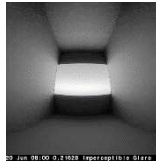
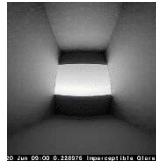
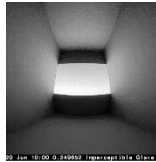
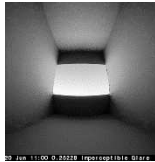
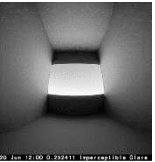
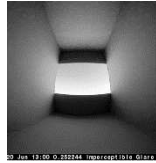
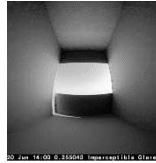
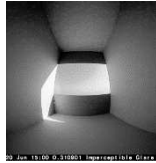
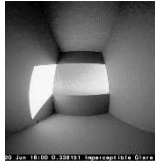
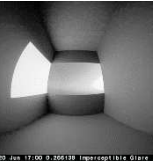
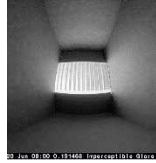
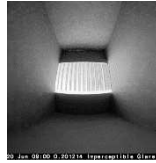
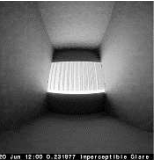
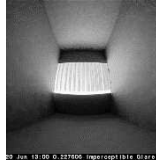
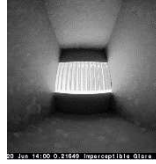
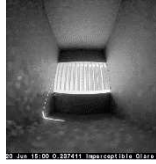
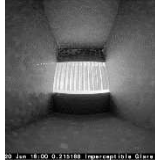
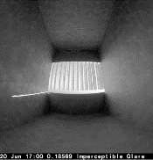
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual

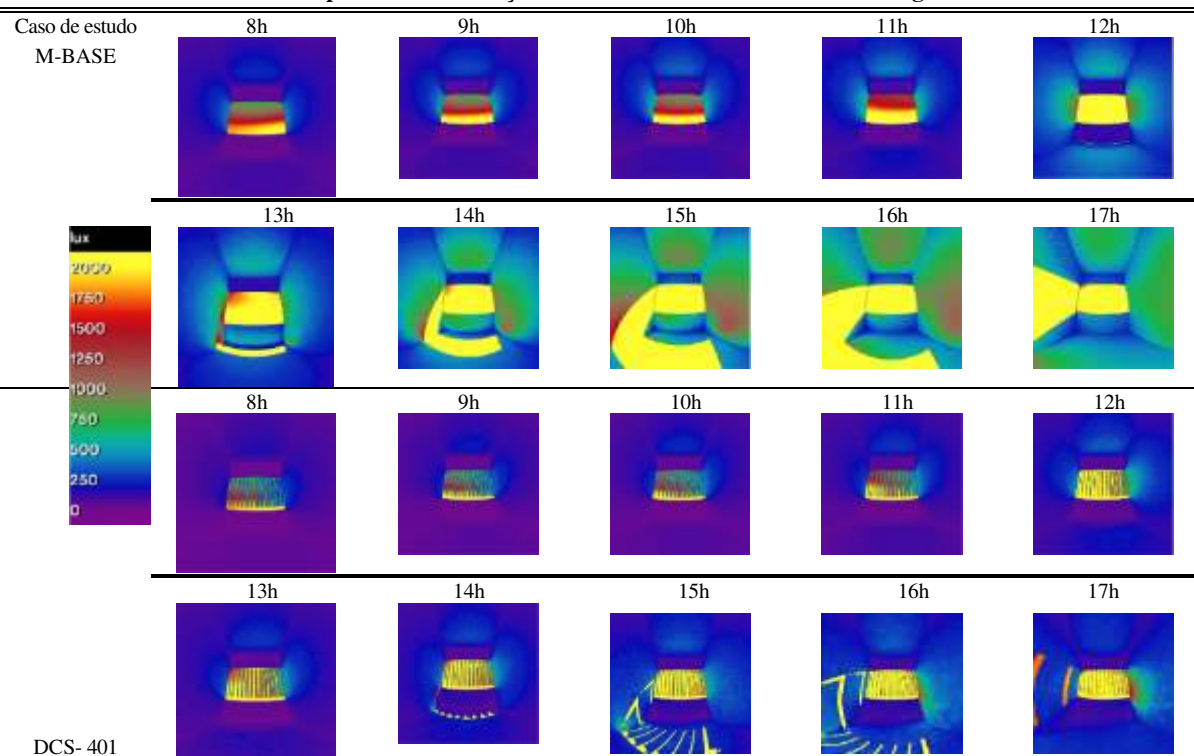
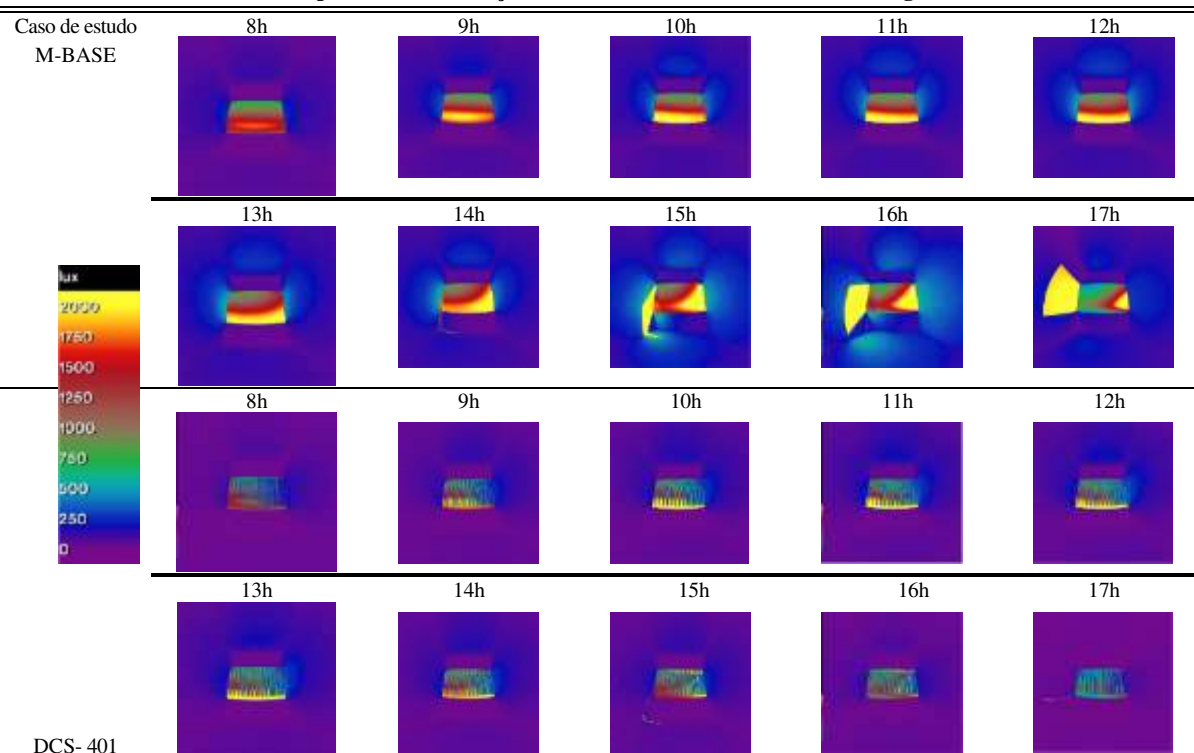


Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão

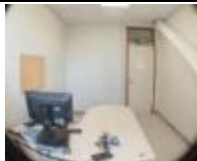
Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,24	 DGP = 0,26	 DGP = 0,26	 DGP = 0,29	 DGP = 0,43
	 DGP = 0,35	 DGP = 0,46	 DGP = 0,50	 DGP = 1,0	 DGP = 0,1,0
DCS-401	 DGP = 0,21	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24	 DGP = 0,26	 DGP = 0,34
	 DGP = 0,27	 DGP = 0,31	 DGP = 0,36	 DGP = 1,0	 DGP = 0,41

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

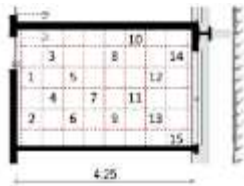
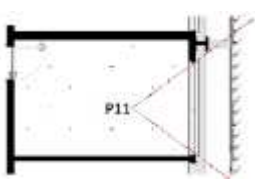
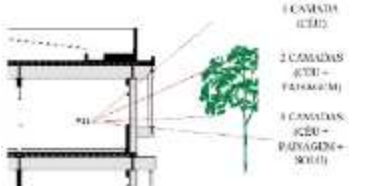
Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,22	 DGP = 0,23	 DGP = 0,25	 DGP = 0,25	 DGP = 0,25
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,26	 DGP = 0,31	 DGP = 0,34	 DGP = 0,27
DCS-401	 DGP = 0,19	 DGP = 0,20	 DGP = 0,23	 DGP = 0,23	 DGP = 0,23
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,24	 DGP = 0,22	 DGP = 0,19

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Verão.

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Inverno.


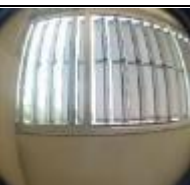
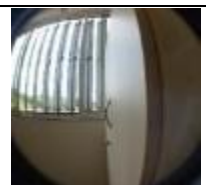
Avaliação da visão externa – Método de projeção

Dimensões da abertura PAF Orientação	Vistas do ambiente avaliado (altura = 1,50m)		
	Vista da paisagem externa a partir da janela	Vista a partir do fundo da sala	Vista a partir da frente da sala
Horizontal: 2,31m Vertical: 1,66m PAF: 39%			
Sudoeste (217°)			

Procedimento de avaliação para posição sentada (altura = 1,20m / malha 50x50cm)

Identificação dos pontos das fotografias	Ângulo de visão horizontal	Número de camadas visíveis
		

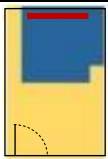
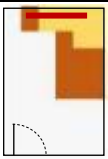
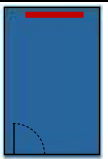
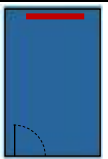
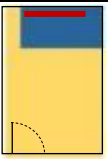
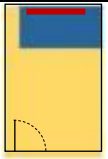
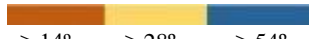
Fotografias das visadas selecionadas (fotografias olho de peixe)

				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15

Fonte: acervo da autora. Jan/2024.

Número de respostas para cada parâmetro.

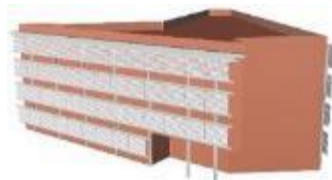
Ambiente analisado	Indicadores								
	Ângulo de visão horizontal			Distância da vista externa			Número de camadas visíveis		
	$\geq 14^\circ$	$\geq 28^\circ$	$\geq 54^\circ$	$\geq 6m$	$\geq 20m$	$\geq 50m$	1 camada	2 camadas	3 camadas
M-BASE	0	29	19	0	0	48	0	38	10
DCS-401	11	6	0	0	0	48	0	38	10

Ângulo de visão horizontal		Distância da vista externa		Número de camadas visíveis	
M-BASE	DCS-401	M-BASE	DCS-401	M-BASE	DCS-401
					
					

Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise DCS-437

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS (DCS) – EDIFÍCIO CCH II / GABINETE 437

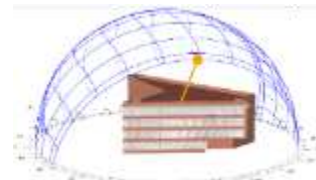
Modelagem



Volume. Fachada Norte.
Fonte: Elaborado na plataforma Rhinoceros + Grasshopper.



Trajatória solar – verão.
Fonte: Elaborado na plataforma Rhinoceros + ClimateStudio.



Trajatória solar – inverno.
Fonte: Elaborado na plataforma Rhinoceros + ClimateStudio.

Validação do modelo computacional – medições em contexto real

Instrumentação



Vista da instrumentação interna a partir do fundo da sala e a partir da janela da sala.



Vista da instrumentação externa.

Fonte: acervo da autora. Fev/2023.

Posicionamento dos sensores

ILUMINÂNCIA NO PLANO DE TRABALHO

- Quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso e sensores igualmente distribuídos
- Um ponto externo na cobertura, próximo à sala, afastado 1,45m do alinhamento da platibanda.

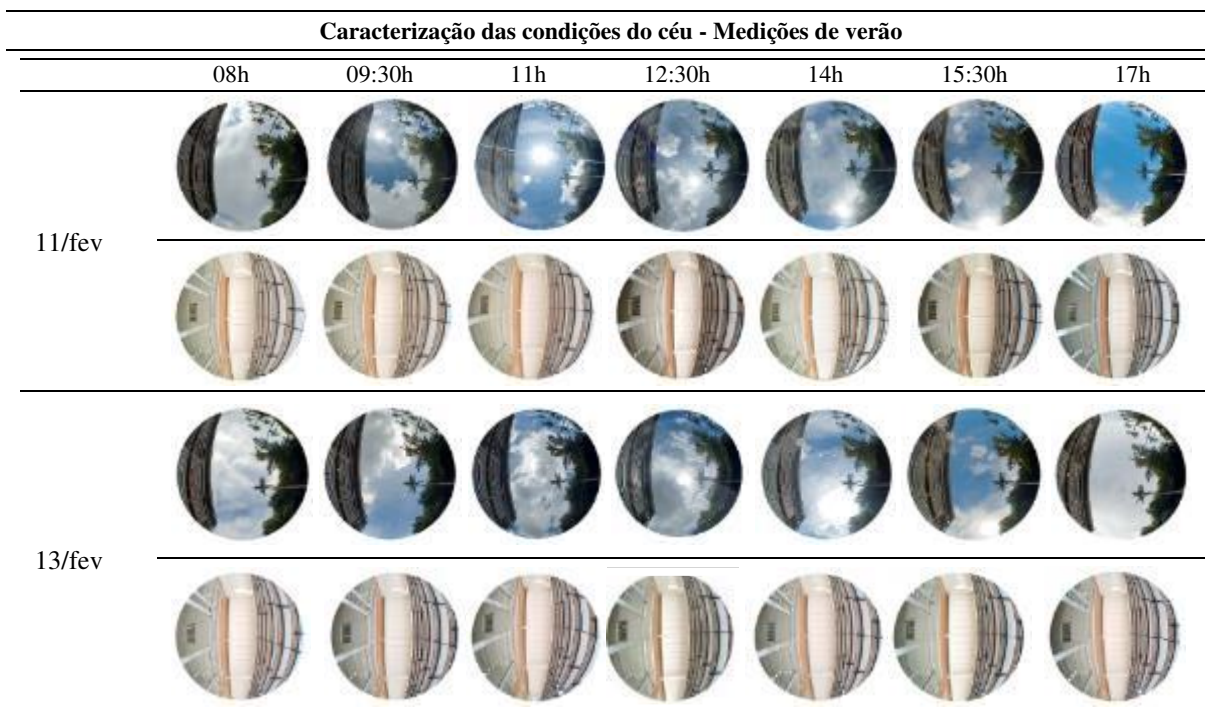
IRRADIAÇÃO

- Um ponto interno, afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso
- Um ponto externo na cobertura, próximo à sala, afastado 1,70m do alinhamento da platibanda.

Propriedades dos materiais de revestimento

Forro modular termoacústico (Branco) ¹	$\rho = 0,86$
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,70$
Piso cerâmico (Cinza)	$\rho = 0,62$
Porta do tipo prancheta de madeira (pintura Branco)	$\rho = 0,65$
Vidro incolor (6mm)	$\tau = 0,60$
<i>Brise soleil</i> (Cinza)	$\rho = 0,90$

¹ Informação extraída do catálogo do Fabricante. Armstrong World Industries. Forro termoacústico CIRRUS. Disponível em: <https://www.armstrongceilings.com/commercial/pt-br/commercial-ceilings-walls/mineral-fiber-and-fiberglass-ceiling-tiles.html#bbbh=%7B%22selectedItem%22%3A%7B%22namen%22%3A%22browse%22%2C%22itemIndex%22%3A%22%7D%7D>. Acesso em 01/12/2022.

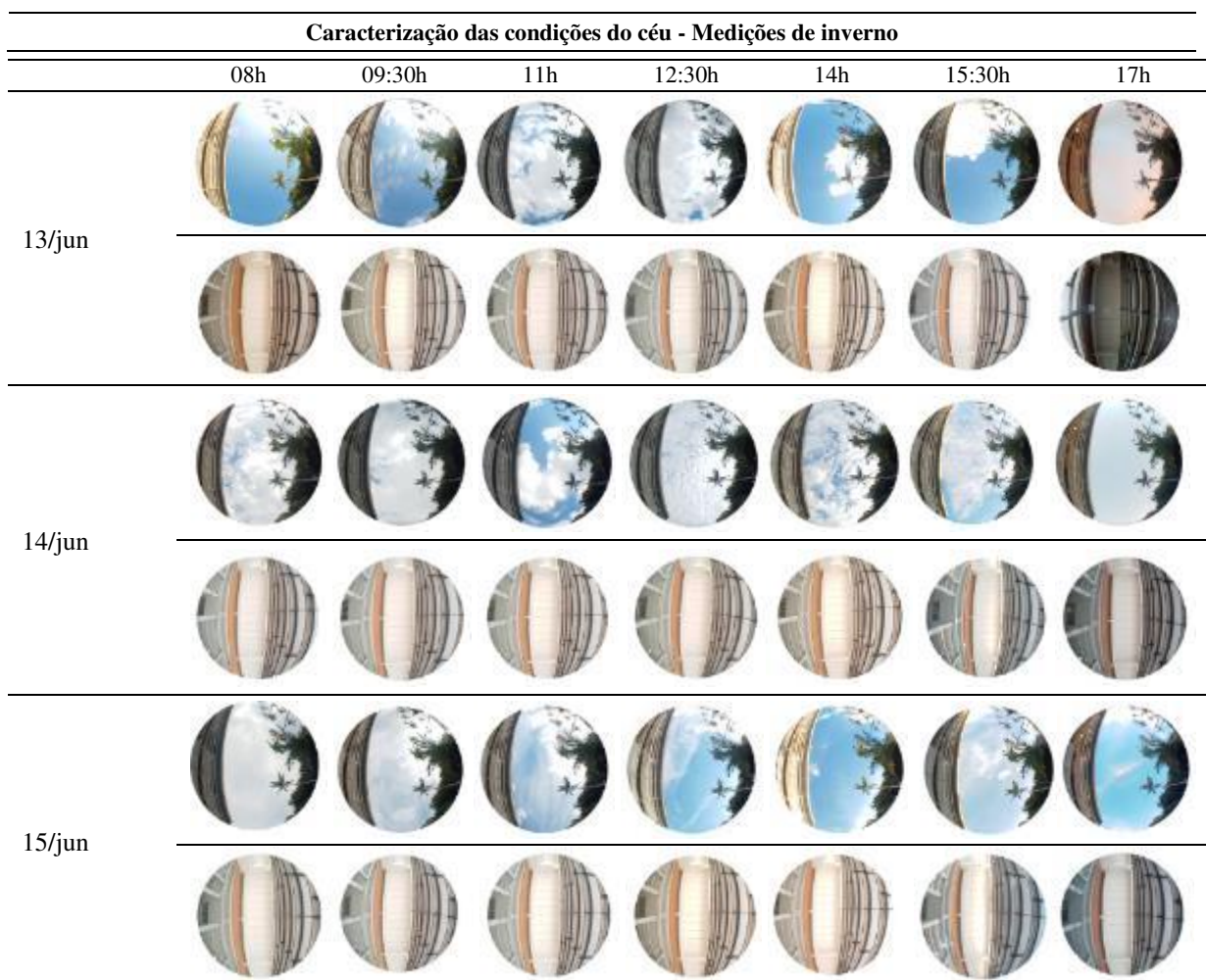


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

Irradiação (W/m ²) - medidas externas				Irradiação (W/m ²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	11/2	13/2	Média		11/2	13/2	Média		11/2	13/2	Média
09:00	538	389	463		4	3	4		42001	34960	38401
10:00	957	686	822		7	5	6		78205	61113	69659
11:00	954	964	959		6	6	6		77586	75987	76786
12:00	1186	1040	1113		7	7	7		92992	85323	89158
13:00	961	1008	985		7	7	7		85409	83380	84395
14:00	964	907	936		7	7	7		85048	78755	81902
15:00	926	926	926		7	7	7		86991	57287	72139
16:00	737	420	578		6	3	5		69367	37058	53212
17:00	330	171	250		3	1	2		33645	19614	26629

Iluminâncias (lx) - medidas internas												
	Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3			Sensor 4		
	11/2	13/2	Média	11/2	13/2	Média	11/2	13/2	Média	11/2	13/2	Média
09:00	190	161	176	202	175	189	295	276	285	294	253	274
10:00	298	228	263	291	235	263	413	342	378	463	356	409
11:00	285	277	281	272	269	270	391	398	394	442	427	434
12:00	318	307	312	306	303	304	446	446	446	506	484	495
13:00	314	319	316	312	308	310	456	451	454	521	516	518
14:00	332	304	318	338	311	324	497	457	477	555	510	532
15:00	342	244	293	341	252	296	504	386	445	579	408	493
16:00	267	162	214	278	182	230	406	284	345	456	270	363
17:00	135	85	110	155	105	130	246	179	212	236	138	187

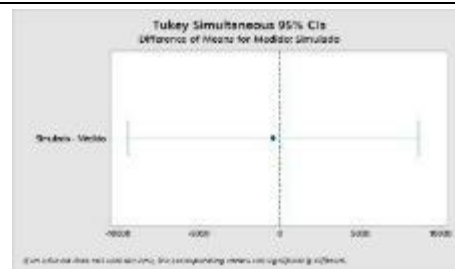


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

Irradiação (W/m²) - medidas externas					Irradiação (W/m²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	13/6	14/6	15/6	Média	13/6	14/6	15/6	Média	13/6	14/6	15/6	Média
09:00	422	306	227	318	5,5	3	2,8	3,8	27095	25552	23353	25333
10:00	489	284	273	349	4,9	5,3	4,7	4,9	30101	27068	26496	27888
11:00	419	435	391	415	5,8	4,5	5,2	5,2	33648	31990	33412	33017
12:00	445	485	655	528	5,0	5,2	7,2	5,8	37281	40223	35876	37794
13:00	450	413	558	473	6,5	5,2	6,1	6,0	39585	37883	44150	40539
14:00	609	461	469	513	6,1	6,2	5,4	5,9	33369	41649	38848	37955
15:00	470	470	249	397	7,5	7,5	2,3	5,8	40833	25967	40833	35878
16:00	303	305	248	285	3,8	3,9	3,9	3,9	28168	26433	25142	26581
17:00	39	77	63	60	2,5	2,6	2,1	2,4	10548	12066	11759	11458

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	13/6	14/6	15/6	Média	13/6	14/6	15/6	Média	13/6	14/6	15/6	Média	13/6	14/6	15/6	Média
09:00	198	127	97	141	206	140	113	153	342	244	203	263	358	222	166	249
10:00	225	119	116	153	225	128	129	161	387	228	228	281	410	207	206	275
11:00	195	211	207	204	192	210	207	203	337	360	356	351	332	371	354	353
12:00	208	217	335	253	212	209	330	250	362	384	569	438	330	372	563	422
13:00	215	176	312	234	218	183	314	238	390	328	497	405	352	300	528	393
14:00	356	243	270	290	366	254	279	300	427	424	421	424	478	394	506	459
15:00	319	132	319	257	344	148	344	278	552	270	415	412	480	249	480	403
16:00	141	127	129	132	181	151	167	166	307	313	309	310	270	246	269	261
17:00	100	62	61	74	113	70	86	90	127	113	118	119	118	100	94	104

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis externos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados

Análise de Variância:
One-way ANOVA: Medido; Simulado

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$
 Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Medido; Simulado

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	859360	859360	0,01	0,919
Error	16	1297394752	81087172		
Total	17	1298254113			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
9004,84	0,07%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Medido	9	30721	9053	(24357; 37084)
Simulado	9	30284	8957	(23920; 36647)

Pooled StDev = 9004,84

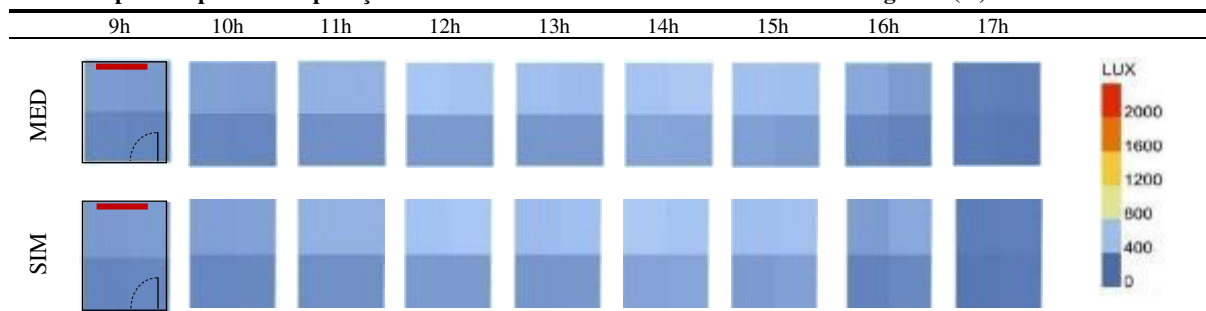
Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Medido	9	30721	A
Simulado	9	30284	A

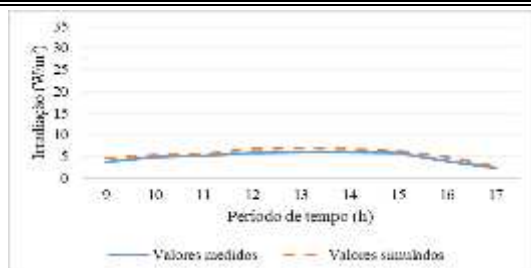
Means that do not share a letter are significantly different.

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno.

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados


MBE = -13,8% e CV (RMSE) = 12,6%

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno. Primeira imagem com indicação do posicionamento das esquadrias (janela em vermelho). Para a validação e simulações, o formato da sala foi considerado como retangular.

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de irradiação (W/m²) medidos e simulados


MBE = -13,7% e CV (RMSE) = 10,5%

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno.

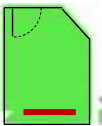
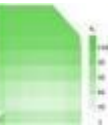
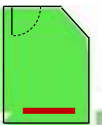
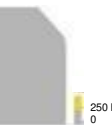
Simulação computacional

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado

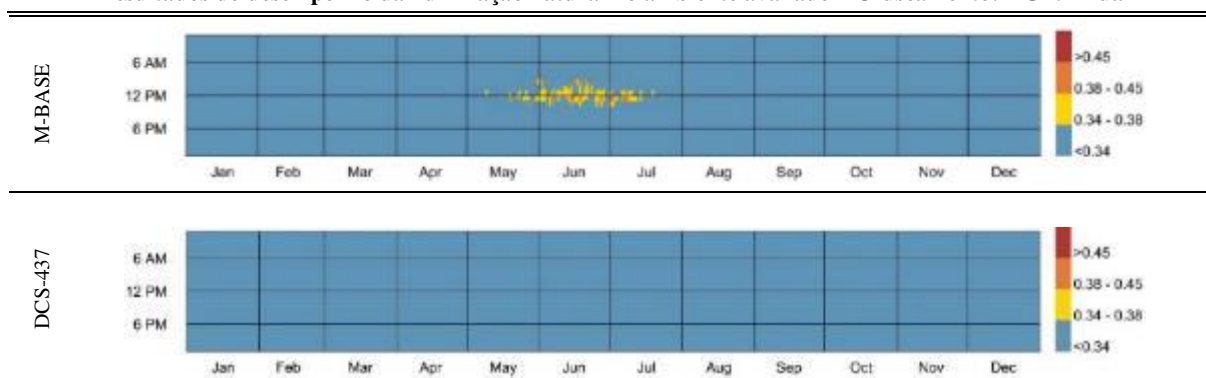
Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	1208	11,3	59,5	29,2	39
DCS- 437	100	154	12,1	87,9	0	0

Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); DCS-437 = Elemento de controle solar – DCS sala 437.

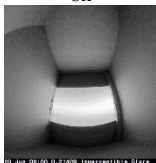
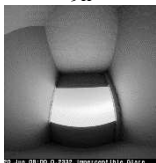
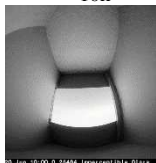
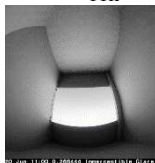
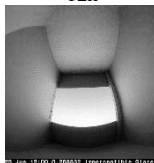
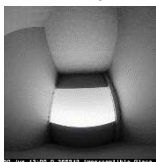
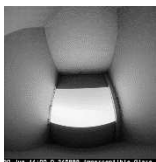
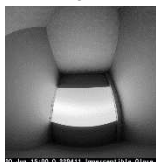
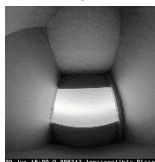
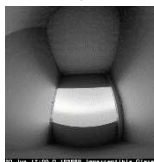
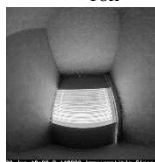
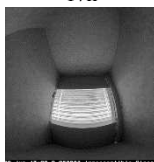
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância (lx)	avUDI _{<100} (%)	avUDI _{100-2000lx} (%)	avUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE						
DCS-437						

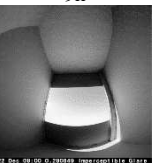
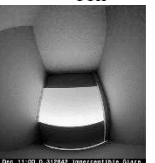
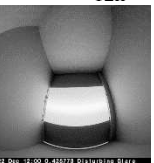
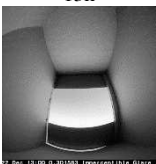
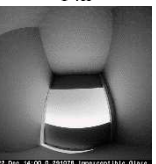
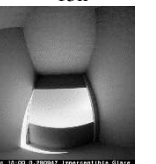
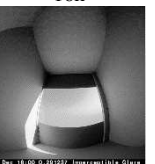
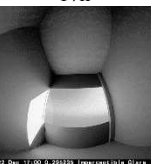
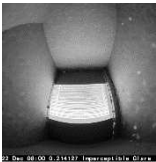
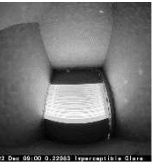
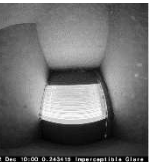
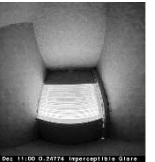
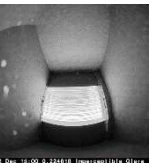
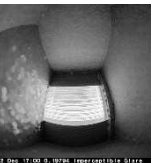
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual

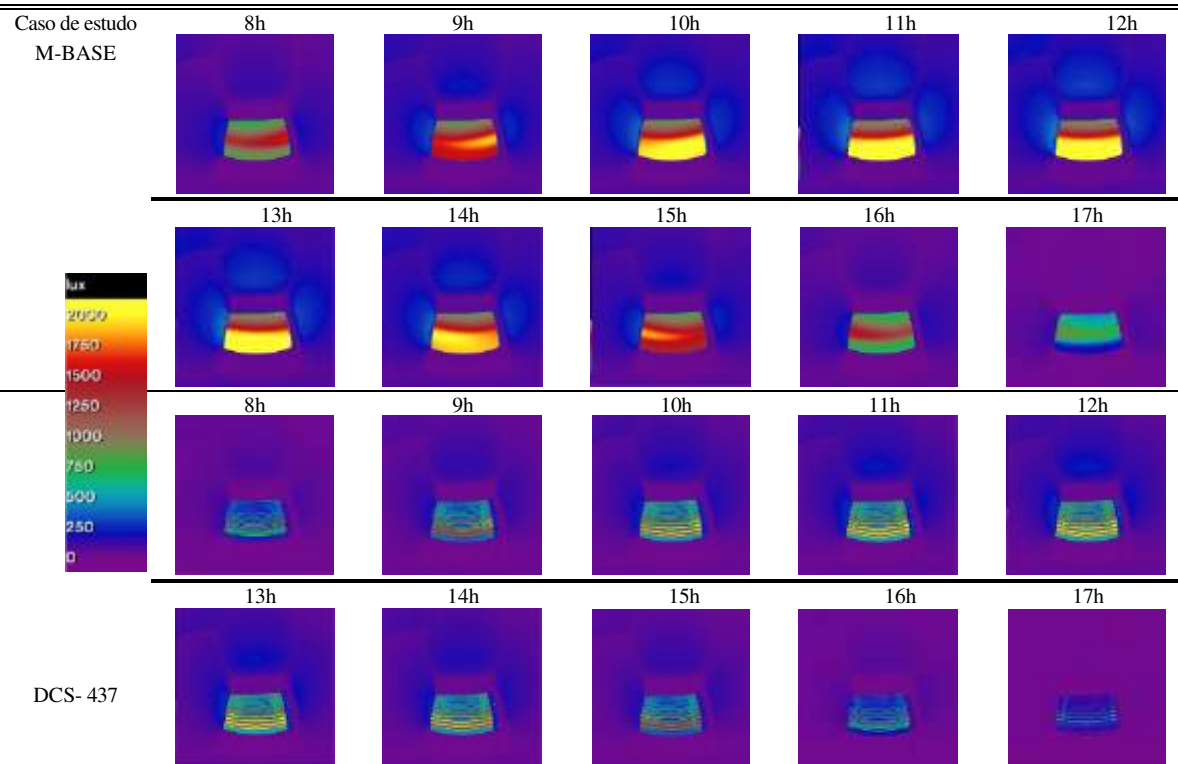
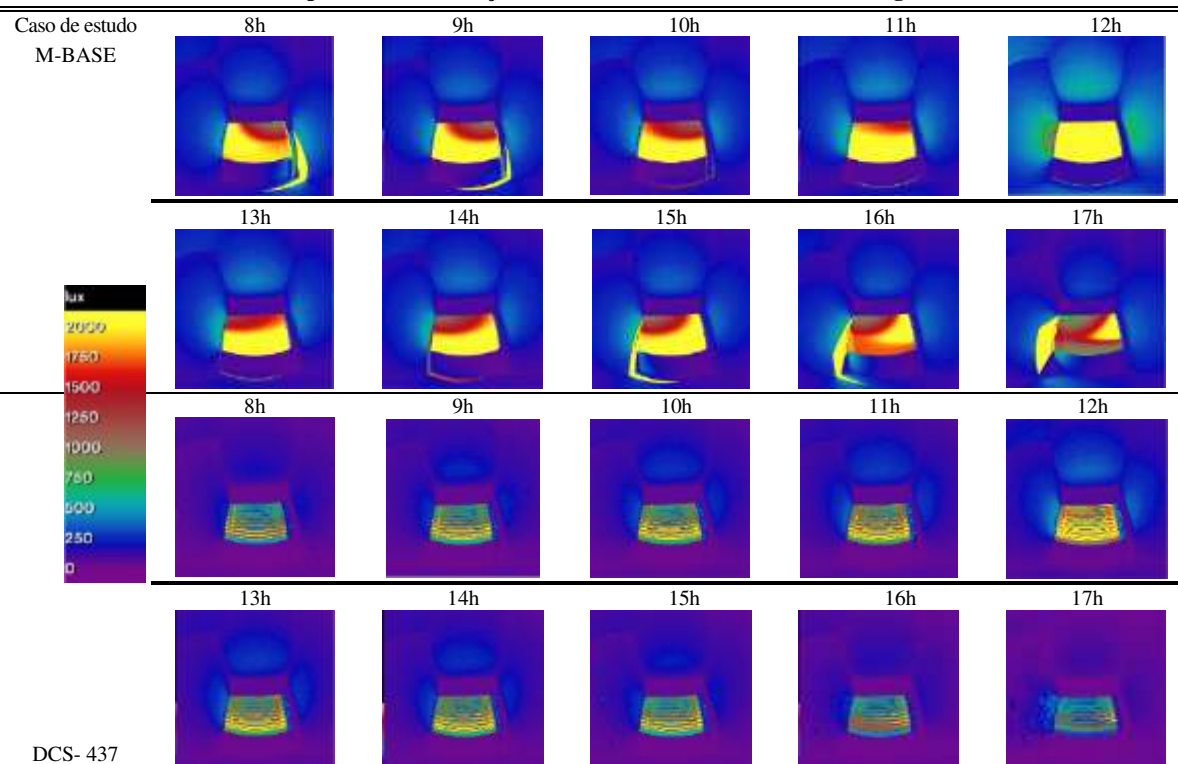


Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,21	 DGP = 0,23	 DGP = 0,25	 DGP = 0,27	 DGP = 0,27
	 DGP = 0,27	 DGP = 0,25	 DGP = 0,23	 DGP = 0,21	 DGP = 0,19
DCS- 437	 DGP = 0,18	 DGP = 0,19	 DGP = 0,21	 DGP = 0,22	 DGP = 0,22
	 DGP = 0,22	 DGP = 0,20	 DGP = 0,19	 DGP = 0,18	 DGP = 0,06

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,29	 DGP = 0,29	 DGP = 0,29	 DGP = 0,31	 DGP = 0,43
	 DGP = 0,30	 DGP = 0,29	 DGP = 0,29	 DGP = 0,29	 DGP = 0,30
DCS- 437	 DGP = 0,21	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,25	 DGP = 0,29
	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21	 DGP = 0,20

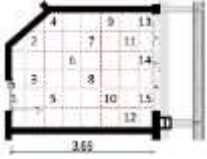
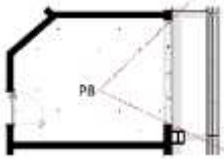
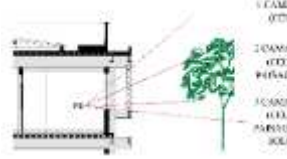
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Verão.

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Inverno.


Avaliação da visão externa – Método de projeção

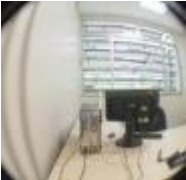
Dimensões da abertura PAF Orientação	Vistas do ambiente avaliado (altura = 1,50m)		
	Vista da paisagem externa a partir da janela	Vista a partir do fundo da sala	Vista a partir da frente da sala
Horizontal: 2,57m Vertical: 1,64m PAF: 40%			
Norte (349°)			

Fonte: acervo da autora.

Procedimento de avaliação para posição sentada (altura = 1,20m / malha 50x50cm)

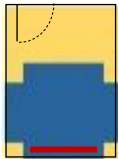
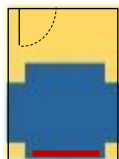
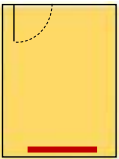
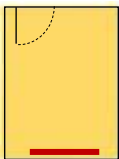
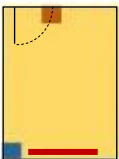
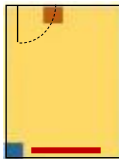
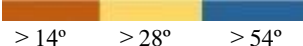
Identificação dos pontos das fotografias	Ângulo de visão horizontal	Número de camadas visíveis
		

Fotografias das visadas selecionadas (fotografias olho de peixe)

				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15

Número de respostas para cada parâmetro.

Ambiente analisado	Indicadores								
	Ângulo de visão horizontal			Distância da vista externa			Número de camadas visíveis		
	≥ 14°	≥ 28°	≥ 54°	≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m	1 camada	2 camadas	3 camadas
M-BASE	0	22	26	0	48	0	1	46	1
DCS-437	0	22	26	0	48	0	1	46	1

Ângulo de visão horizontal		Distância da vista externa		Número de camadas visíveis	
M-BASE	DCS-437	M-BASE	DCS-437	M-BASE	DCS-437
					
					

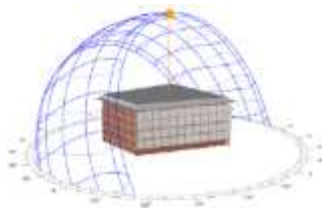
Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise PLI

DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA – PRÉDIO DAS LICENCIATURAS / SALA DE REUNIÕES

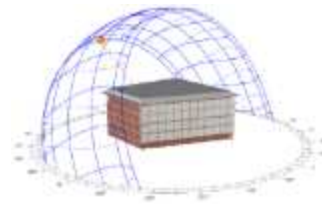
Modelagem



Volume. Fachada Sudoeste.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.



Trajatória solar – verão.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + ClimateStudio.



Trajatória solar – inverno.
Fonte: Elaborado na plataforma Rhinceros
+ ClimateStudio.

Validação do modelo computacional – medições em contexto real

Instrumentação



Vista da instrumentação interna a partir do fundo da sala e a partir da janela da sala



Vista da instrumentação externa a partir da calçada do edifício

Posicionamento dos sensores

ILUMINÂNCIA NO PLANO DE TRABALHO

- Quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso e sensores igualmente distribuídos
- Um ponto externo, afastado 0,40m do alinhamento do elemento de controle solar.

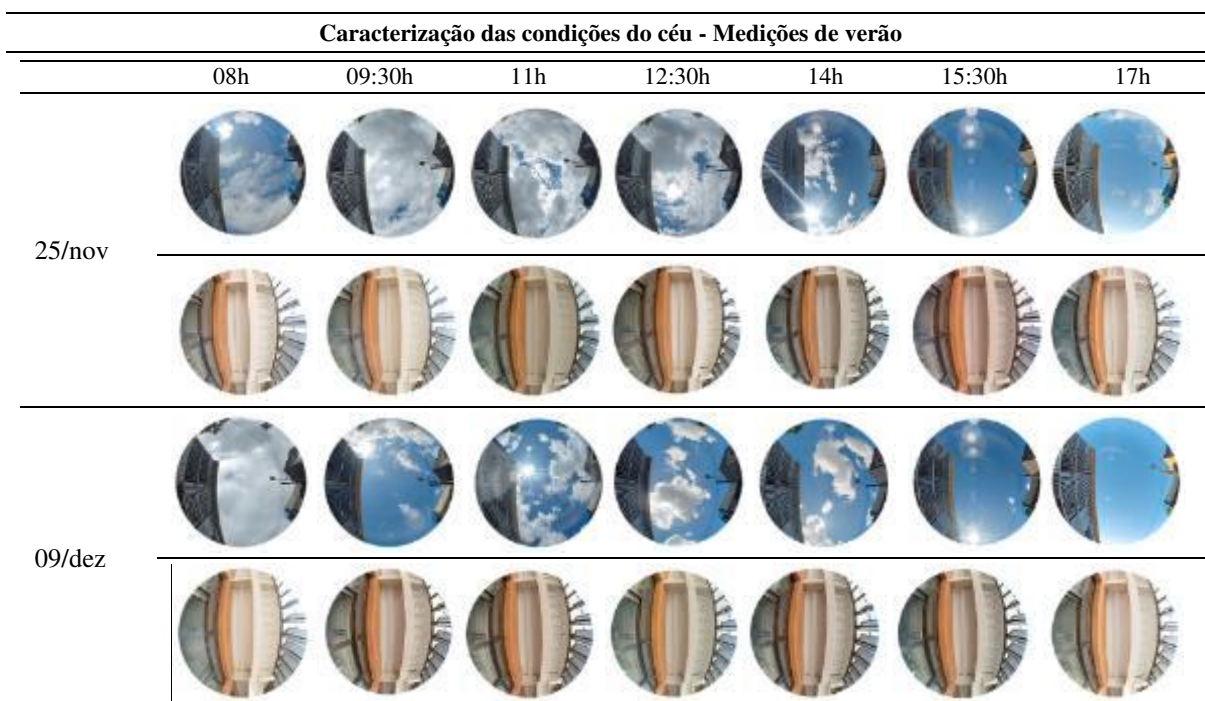
IRRADIAÇÃO

- Um ponto interno, afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso
 - Um ponto externo, afastado 0,15m do alinhamento do elemento de controle solar
-

Propriedades dos materiais de revestimento

Teto metálico (pintura Branco)	$\rho = 0,85$
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,71$
Piso cerâmico (Bege claro)	$\rho = 0,62$
Porta do tipo prancheta de madeira (pintura Branco)	$\rho = 0,86$
Vidro incolor (6mm)	$\tau = 0,60$
Brise soleil (Cinza)	$\rho = 0,90$

Fonte: acervo da autora. Fev/2023.



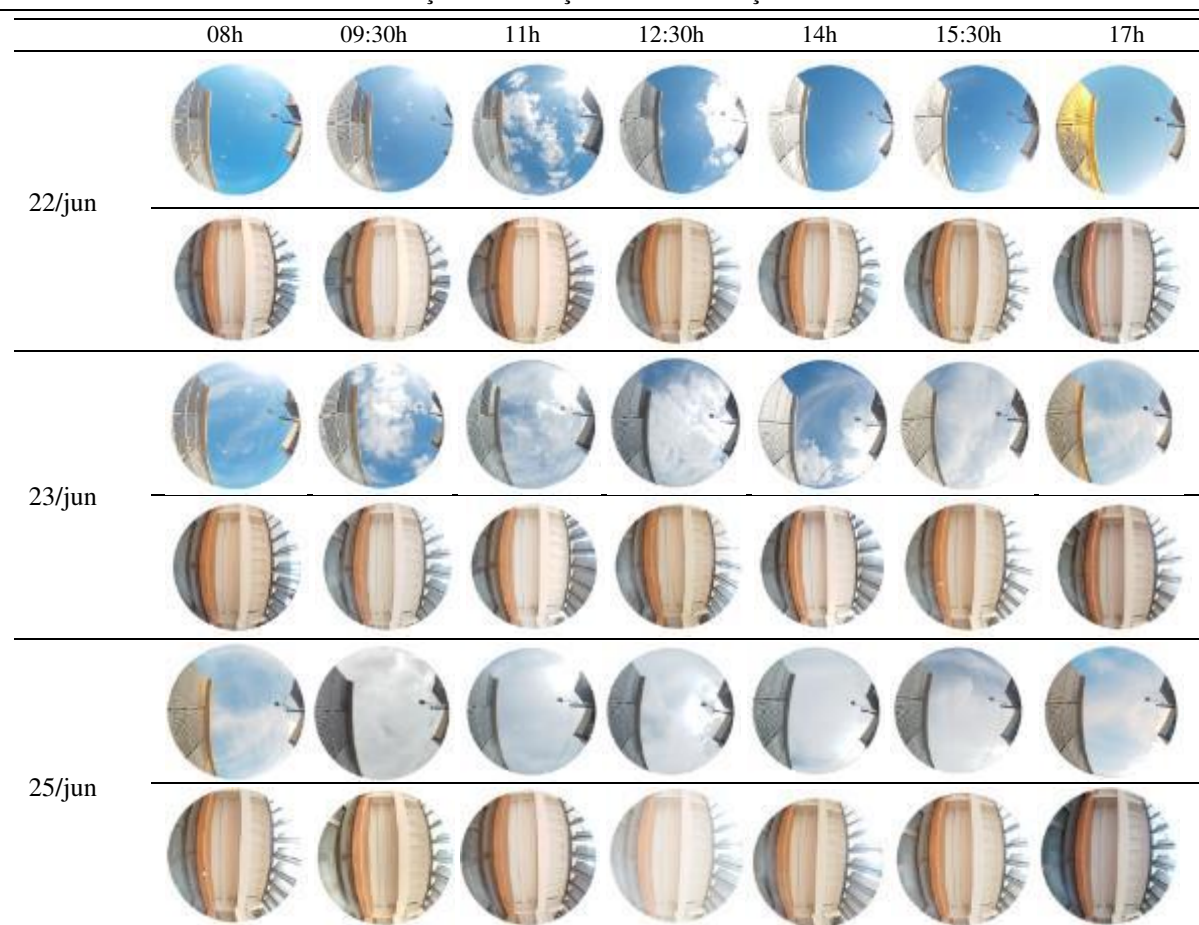
Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

	Irradiação (W/m ²) - medidas externas			Irradiação (W/m ²) - medidas internas			Iluminâncias (lx) – medidas externas		
	25/11	9/12	Média	25/11	9/12	Média	25/11	9/12	Média
09:00	119	127	123	3	4	3	17086	16989	17037
10:00	144	123	134	5	5	5	23062	23697	23379
11:00	186	117	151	5	5	5	25609	24238	24924
12:00	158	132	145	5	6	6	28380	28466	28423
13:00	191	100	145	6	6	6	23938	20982	22460
14:00	122	93	108	5	5	5	22211	19234	20723
15:00	71	71	71	4	4	4	18540	17697	18118
16:00	102	54	78	3	3	3	16968	15749	16358
17:00	89	37	63	2	2	2	15258	14241	14750

Iluminâncias (lx) - medidas internas												
	Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3			Sensor 4		
	25/11	9/12	Média	25/11	9/12	Média	25/11	9/12	Média	25/11	9/12	Média
09:00	111	122	116	83	159	121	269	265	267	328	275	301
10:00	152	184	168	156	189	172	372	353	363	443	350	396
11:00	172	215	193	180	219	200	358	347	352	433	382	407
12:00	186	226	206	192	229	211	352	380	366	429	402	416
13:00	193	198	195	201	204	203	372	322	347	462	351	407
14:00	186	191	188	192	202	197	367	312	339	449	346	397
15:00	152	169	160	163	182	173	296	286	291	349	309	329
16:00	126	133	129	139	152	146	272	234	253	305	239	272
17:00	107	112	109	119	133	126	235	204	219	270	196	233

Caracterização das condições do céu - Medições de inverno



Fonte: acervo da autora.

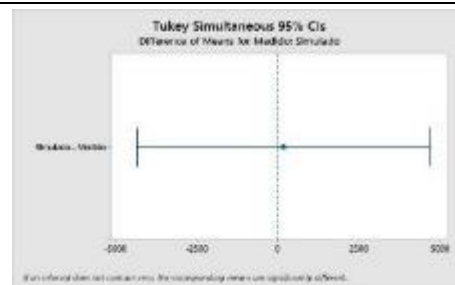
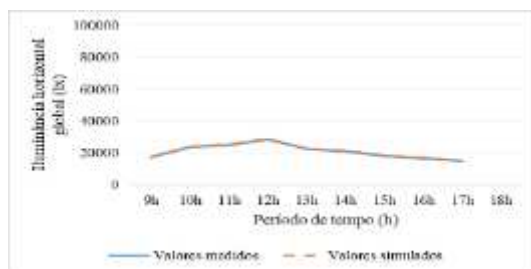
Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

	Irradiação (W/m^2) - medidas externas				Irradiação (W/m^2) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	22/6	23/6	25/6	Média	22/6	23/6	25/6	Média	22/6	23/6	25/6	Média
09:00	33	19	84	45	3	4	2	3	29080	21875	15631	22195
10:00	39	22	117	59	5	6	4	5	47194	28692	22451	32779
11:00	46	35	88	56	6	4	6	5	63013	45904	27747	45555
12:00	45	30	41	39	8	5	5	6	63744	42603	22201	42849
13:00	37	26	87	50	7	7	6	7	59480	40256	31607	43781
14:00	42	28	135	69	6	6	5	6	67235	42620	29475	46443
15:00	34	34	35	34	5	5	4	5	57210	47383	57210	53934
16:00	22	14	24	20	3	3	3	3	37109	24209	23818	28379
17:00	9	5	8	7	2	2	1	2	17617	13953	12778	14783

Iluminâncias (lx) - medidas internas

	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	22/6	23/6	25/6	Média	22/6	23/6	25/6	Média	22/6	23/6	25/6	Média	22/6	23/6	25/6	Média
09:00	189	198	98	162	215	226	121	187	316	334	199	283	326	365	204	298
10:00	217	226	159	201	230	239	174	214	362	359	277	333	418	455	341	405
11:00	272	159	210	213	273	178	216	222	452	296	347	365	516	320	442	426
12:00	293	143	148	195	295	166	165	209	491	297	267	351	552	277	304	378
13:00	268	251	217	245	289	269	228	262	448	514	362	441	481	465	427	458
14:00	255	56	172	161	286	95	192	191	424	155	311	297	411	113	348	291
15:00	214	106	214	178	252	149	252	218	363	228	310	300	332	184	332	282
16:00	199	149	152	167	237	186	180	201	369	300	295	321	301	240	277	273
17:00	115	73	59	82	148	105	89	114	278	184	162	208	189	129	117	145

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis externos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados



Análise de Variância:

One-way ANOVA: Medido; Simulado

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Medido; Simulado

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	116645	116645	0,01	0,941
Error	16	326927751	20432984		
Total	17	327044396			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4520,29	0,04%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Medido	9	20686	4501	(17492; 23880)
Simulado	9	20847	4539	(17653; 24041)

Pooled StDev = 4520,29

Tukey Pairwise Comparisons

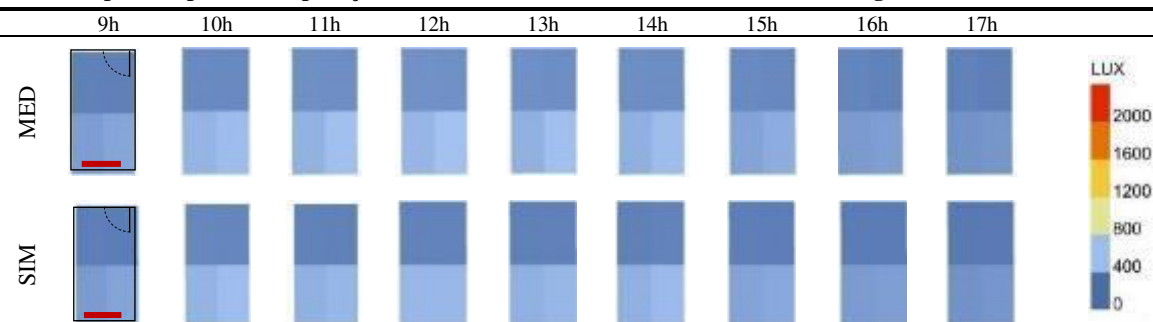
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Medido	9	20847	A
Simulado	9	20686	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão.

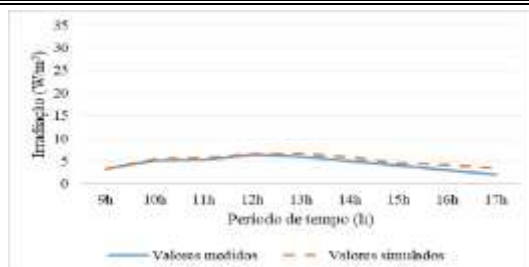
Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados



MBE = 13,8% e CV (RMSE) = 12,8%

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão. Primeira imagem com indicação do posicionamento das esquadrias (janela em vermelho).

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de irradiação (W/m²) medidos e simulados



MBE = -9,31% e CV (RMSE) = 9,9%

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão.

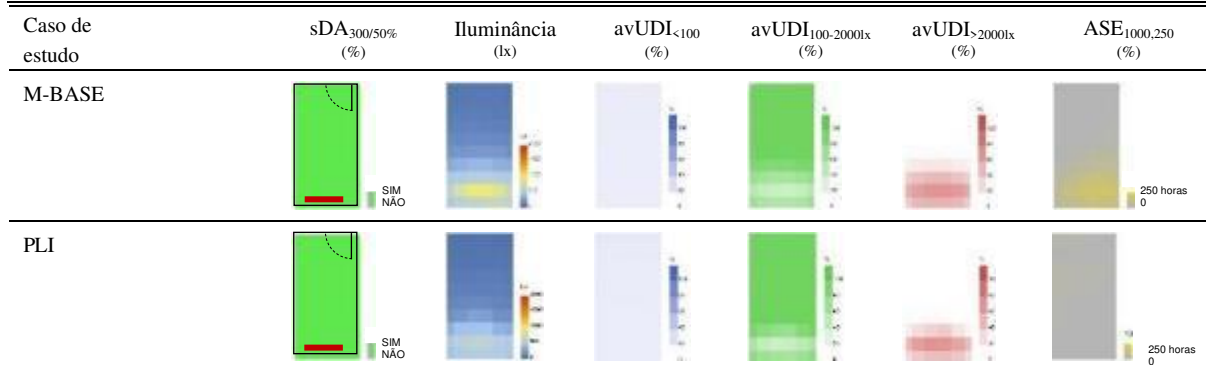
Simulação computacional

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	306	11,5	75,3	13,2	11,7
PLI	100	222	11,8	78,9	9,3	0

Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); PLI = Elemento de controle solar – PLI – Sala de reuniões.

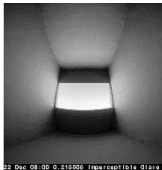
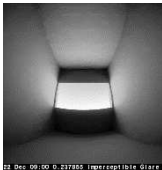
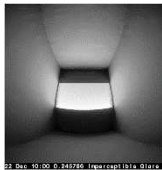
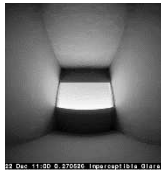
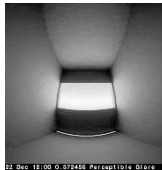
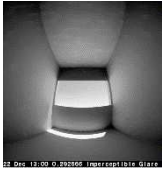
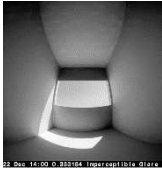
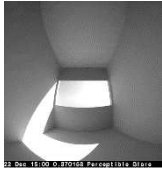
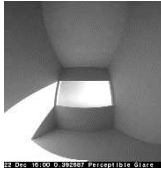
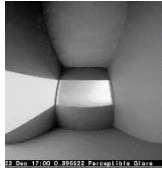
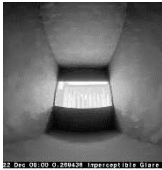
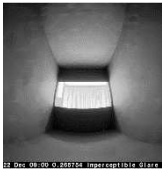
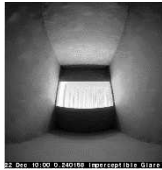
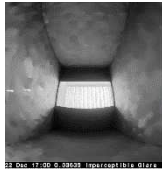
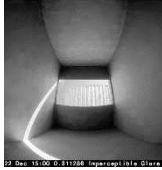
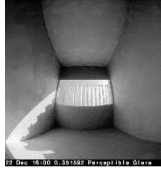
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias



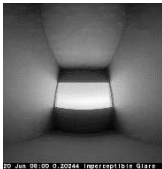
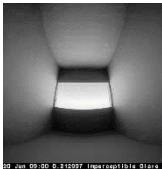
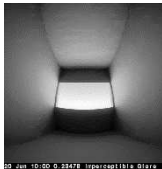
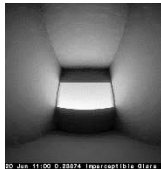
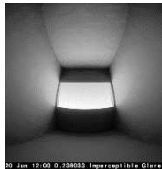
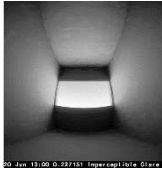
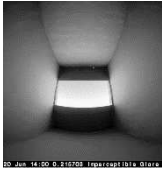
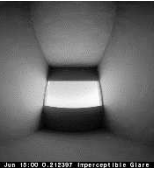
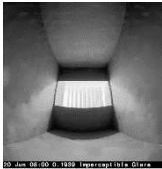
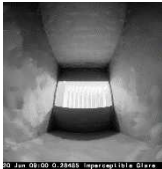
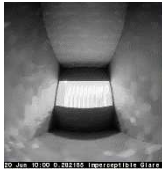
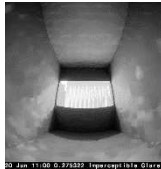
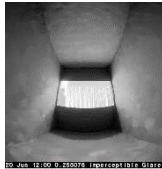
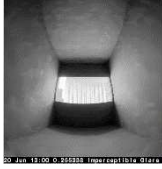
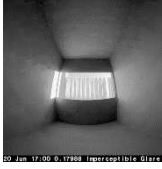
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual



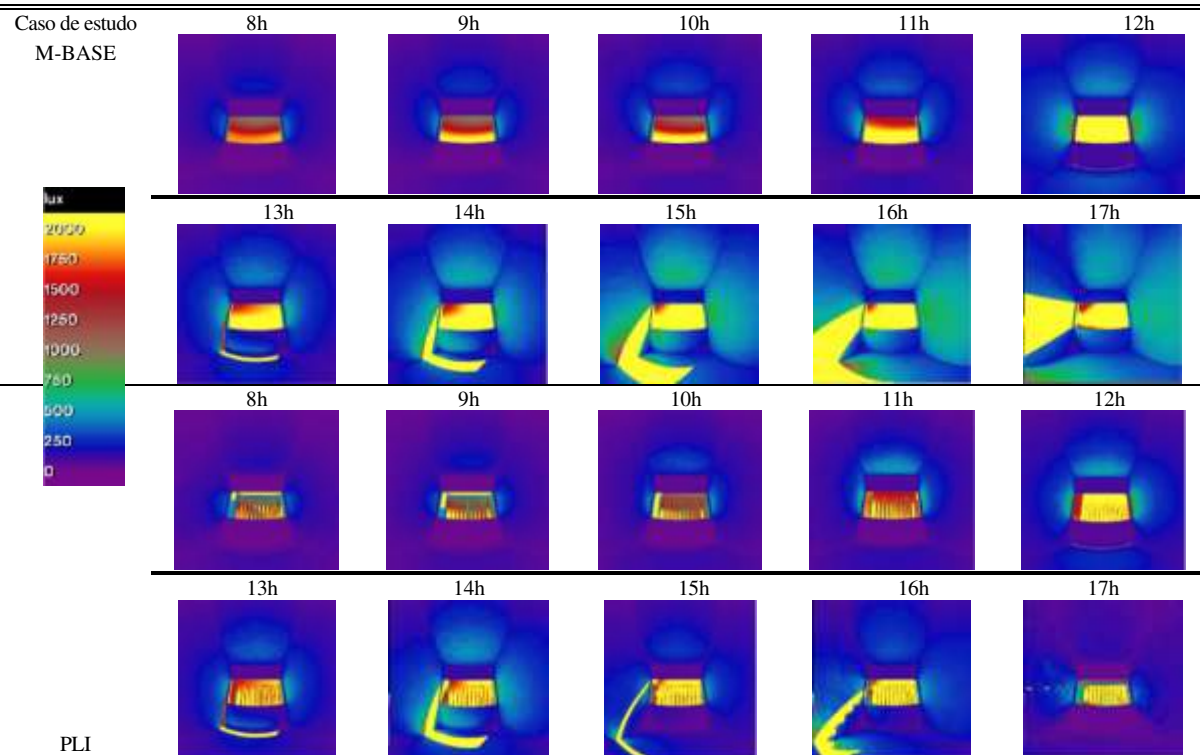
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,22	 DGP = 0,24	 DGP = 0,25	 DGP = 0,27	 DGP = 0,37
	 DGP = 0,29	 DGP = 0,33	 DGP = 0,37	 DGP = 0,39	 DGP = 0,40
PLI	 DGP = 0,27	 DGP = 0,27	 DGP = 0,24	 DGP = 0,25	 DGP = 0,34
	 DGP = 0,27	 DGP = 0,32	 DGP = 0,31	 DGP = 0,35	 DGP = 0,34

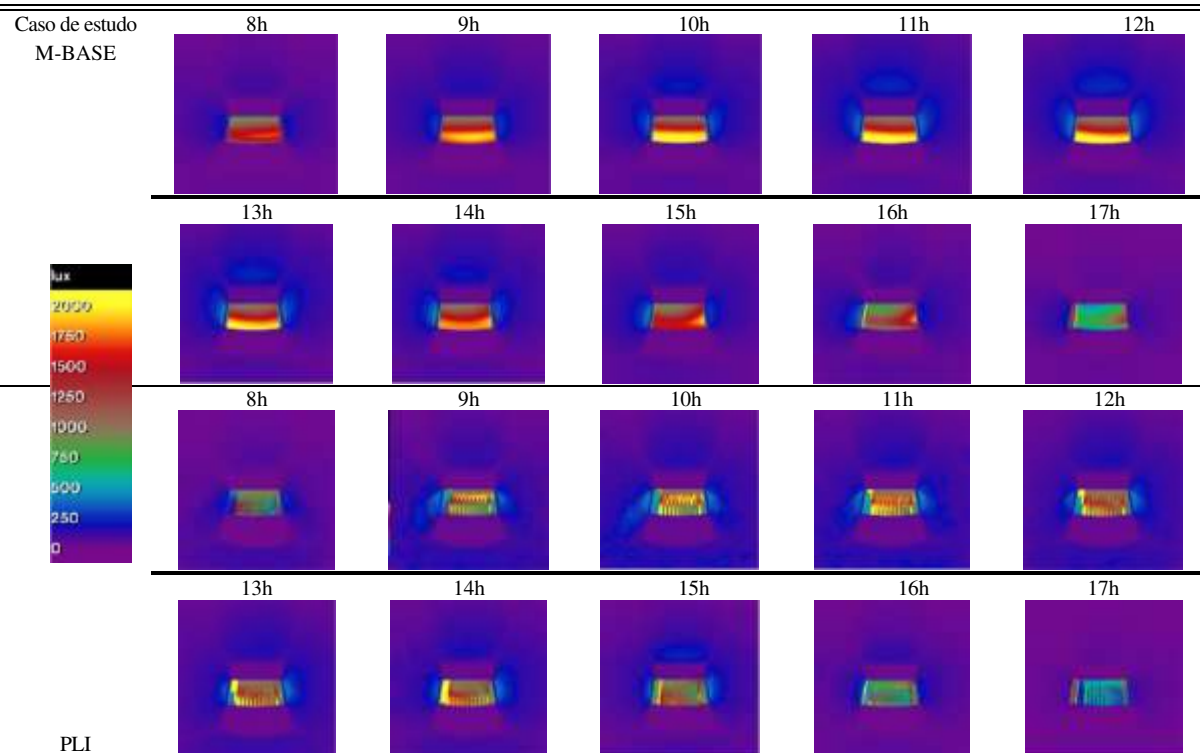
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,20	 DGP = 0,21	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21	 DGP = 0,22	 DGP = 0,19
PLI	 DGP = 0,19	 DGP = 0,28	 DGP = 0,28	 DGP = 0,28	 DGP = 0,26
	 DGP = 0,26	 DGP = 0,25	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,18

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Verão.



Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Inverno.

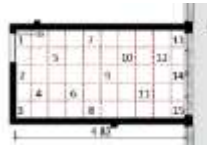
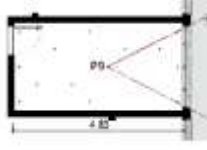
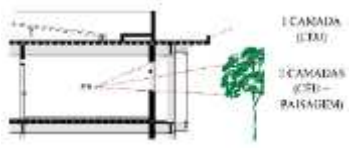


Avaliação da visão externa – Método de projeção

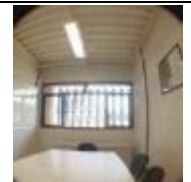
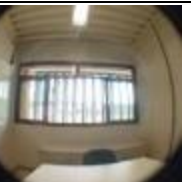
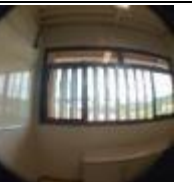
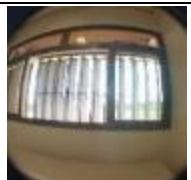
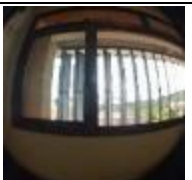
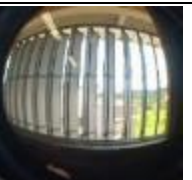
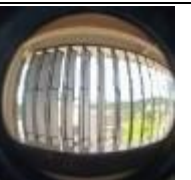
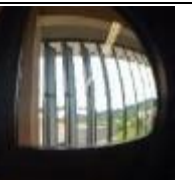
Dimensões da abertura PAF Orientação	Vistas do ambiente avaliado (altura = 1,50m)		
	Vista da paisagem externa a partir da janela	Vista a partir do fundo da sala	Vista a partir da frente da sala
Horizontal: 2,38m Vertical: 1,14m PAF: 38%			
Sudoeste (243°)			

Fonte: acervo da autora.

Procedimento de avaliação para posição sentada (altura = 1,20m / malha 50x50cm)

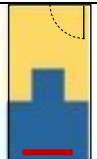
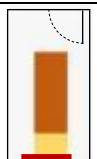
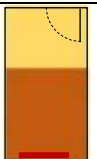
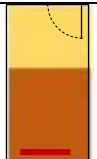
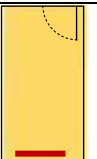
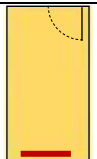
Identificação dos pontos das fotografias	Ângulo de visão horizontal	Número de camadas visíveis
		

Fotografias das visadas selecionadas (fotografias olho de peixe)

				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15

Número de respostas para cada parâmetro.

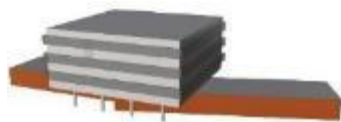
Ambiente analisado	Indicadores								
	Ângulo de visão horizontal			Distância da vista externa			Número de camadas visíveis		
	≥ 14º	≥ 28º	≥ 54º	≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m	1 camada	2 camadas	3 camadas
M-BASE	0	28	22	30	20	0	0	50	0
PLI	5	2	0	30	20	0	0	50	0

Ângulo de visão horizontal		Distância da vista externa		Número de camadas visíveis						
M-BASE	PLI	M-BASE	PLI	M-BASE	PLI					
										
										
≥ 14º	≥ 28º	≥ 54º		≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m		1	2	3 camadas

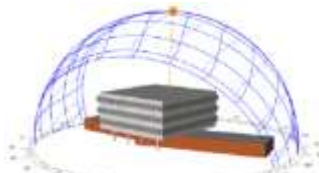
Elemento de controle solar do tipo painel perfurado: Ambiente de análise DEM-403

DEPARTAMENTO DE MEDICINA E ENFERMAGEM (DEM) – GABINETE 403

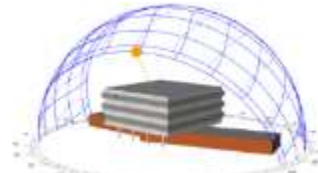
Modelagem



Volume. Fachada Norte.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.



Trajetória solar – verão.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + ClimateStudio.



Trajetória solar – inverno.
Fonte: Elaborado na plataforma Rhinceros
+ ClimateStudio.

Calibração do modelo computacional – medições em contexto real

Instrumentação



Vista da instrumentação interna a partir do fundo da sala e a partir da janela da sala



Vista da instrumentação externa a partir da janela da sala

Posicionamento dos sensores

ILUMINÂNCIA NO PLANO DE TRABALHO

- Quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso e sensores igualmente distribuídos
- Um ponto externo, afastado 0,40m do alinhamento do elemento de controle solar.

IRRADIÂNCIA SOLAR

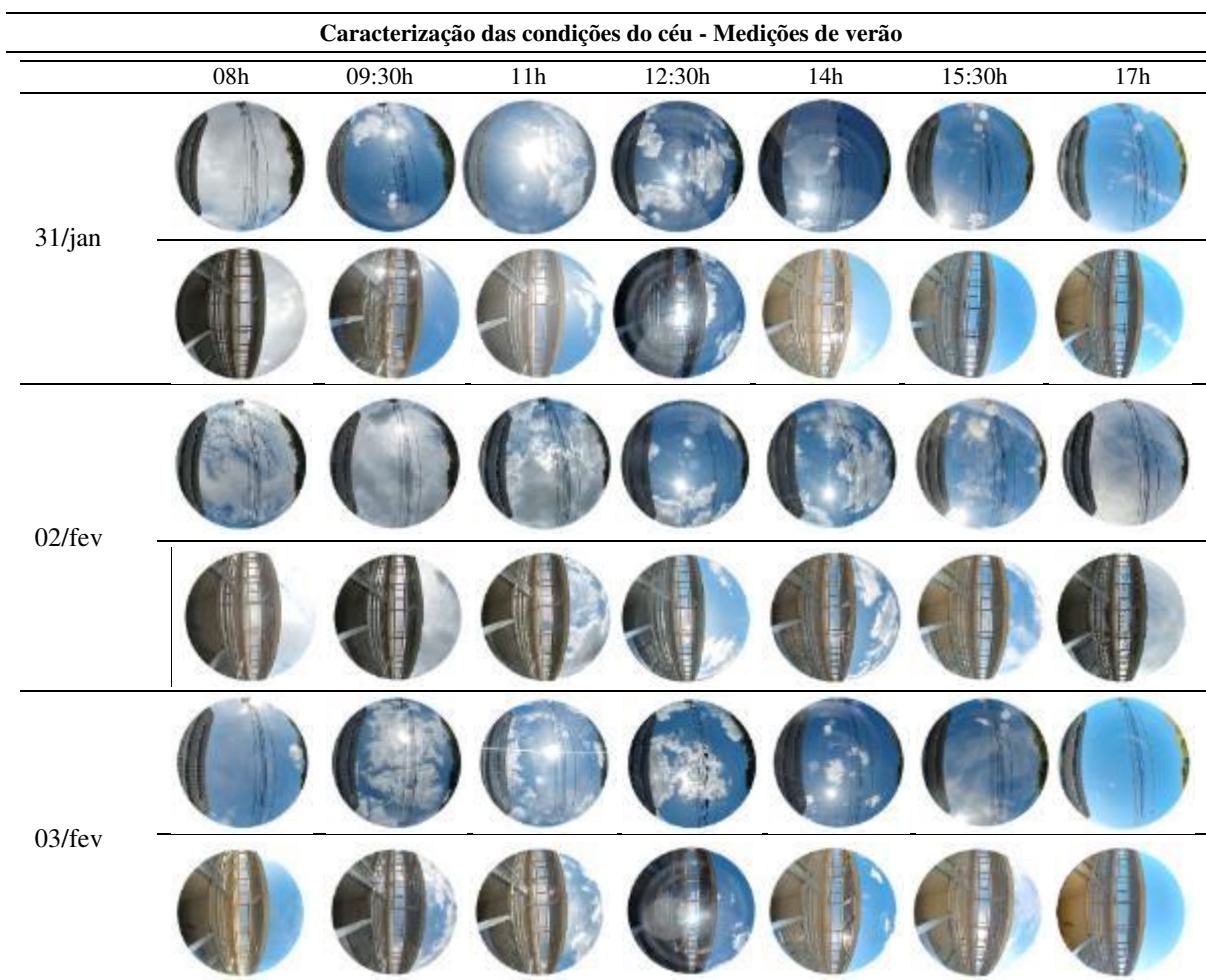
- Um ponto interno, afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso
- Um ponto externo, afastado 0,15m do alinhamento do elemento de controle solar

Propriedades dos materiais de revestimento

Forro em gesso (pintura Branco)	$\rho = 0,94$
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,95$
Piso em granilite (Cinza) ¹	$\rho = 0,45$
Porta do tipo prancheta de madeira (pintura Branco)	$\rho = 0,94$
Vidro incolor (6mm)	$\tau = 0,60$
Tela microperfurada (Cinza)	$\rho = 0,80$

Fonte: acervo da autora. Jan/2023.

¹ Fernandes, L. C.; Krüger, C. E.; Motzafi-Haller, W. Experimentos de campo com teto-reservatório e painéis para resfriamento radiante em uma edificação-teste. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 357-384, jan/mar. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100509>.

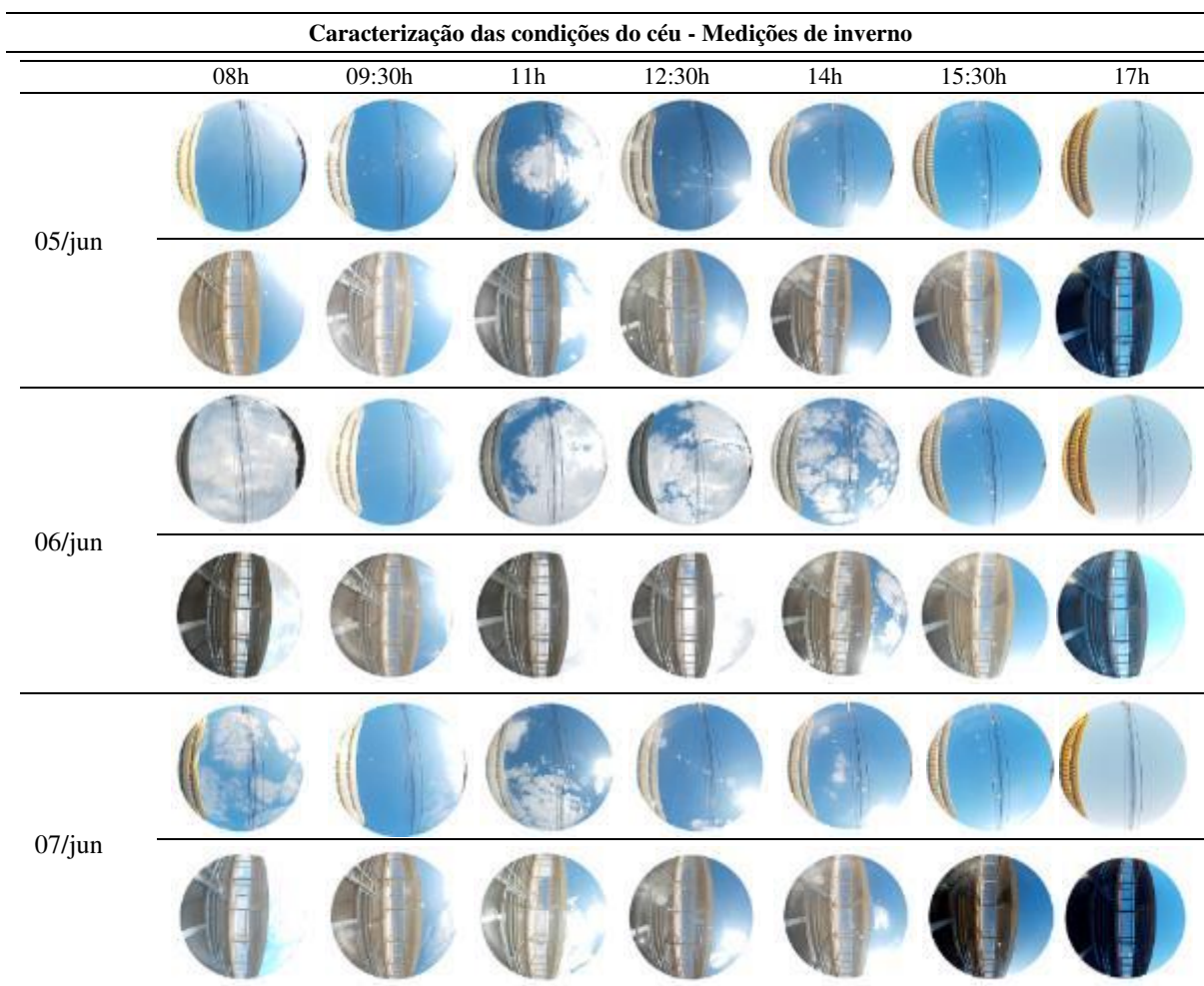


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

	Irradiação (W/m ²) - medidas externas				Irradiação (W/m ²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	31/1	2/2	3/2	Média	31/1	2/2	3/2	Média	31/1	2/2	3/2	Média
09:00	479	566	569	538	25	31	28	28	48538	49962	46309	48270
10:00	671	537	703	637	31	31	30	31	64612	62569	59617	62266
11:00	826	774	846	815	31	35	33	33	77259	83517	76932	79236
12:00	954	932	884	923	35	33	32	33	80423	98238	79314	85992
13:00	755	915	936	869	29	28	29	29	85023	86905	83674	85201
14:00	199	246	188	211	22	29	24	25	54205	53664	58104	55324
15:00	94	94	232	140	19	19	29	23	39156	39397	37894	38816
16:00	47	88	63	66	14	19	18	17	25586	26735	22814	25045
17:00	38	65	36	47	13	12	12	12	14517	15631	13911	14687

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	31/1	2/2	3/2	Média	31/1	2/2	3/2	Média	31/1	2/2	3/2	Média	31/1	2/2	3/2	Média
09:00	347	423	408	393	378	388	478	415	908	972	975	951	1085	1115	1142	1114
10:00	411	465	451	442	487	471	452	470	1117	1121	1158	1132	1216	1269	1240	1242
11:00	467	505	545	506	488	496	514	500	1305	1340	1351	1332	1417	1435	1401	1418
12:00	509	511	542	521	536	536	571	548	1435	1444	1463	1447	1429	1453	1410	1431
13:00	526	519	509	518	527	529	520	525	1549	1556	1555	1553	1551	1533	1547	1544
14:00	419	437	438	431	426	432	429	429	1185	1168	1244	1199	1117	1119	1175	1137
15:00	366	383	384	377	365	422	365	384	1037	1231	1105	1124	986	949	963	966
16:00	297	285	320	301	313	342	357	337	781	780	831	797	679	695	677	684
17:00	240	324	286	283	270	267	262	266	668	725	667	687	637	616	659	637



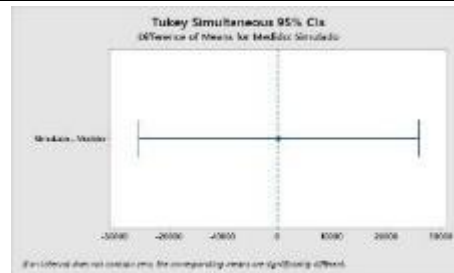
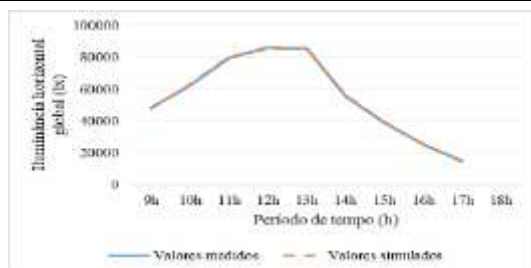
Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

Irradiação (W/m²) - medidas externas					Irradiação (W/m²) - medidas internas					Iluminâncias (lx) – medidas externas				
	5/6	6/6	7/6	Média		5/6	6/6	7/6	Média		5/6	6/6	7/6	Média
09:00	582	245	474	416		32	33	38	34		38502	27003	38898	34801
10:00	704	676	677	686		37	42	45	41		57485	61973	60941	60133
11:00	727	294	633	551		79	31	60	57		61982	31126	59875	50994
12:00	786	672	795	751		72	73	74	73		69934	63520	75411	69622
13:00	802	326	788	639		60	43	61	55		73029	33696	76846	61191
14:00	686	464	651	600		21	34	21	25		65188	46051	66461	59233
15:00	507	507	544	520		16	16	19	17		50177	54803	50177	51719
16:00	295	267	295	285		11	11	11	11		30911	30023	35080	32005
17:00	94	82	100	92		5	5	6	5		13058	14050	16414	14507

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	5/6	6/6	7/6	Média	5/6	6/6	7/6	Média	5/6	6/6	7/6	Média	5/6	6/6	7/6	Média
09:00	3557	1445	2974	2659	3076	1174	2713	2321	3709	2147	3887	3247	2984	7097	1827	16119
10:00	4245	4076	4107	4143	2684	2750	2635	2690	7539	7325	7124	7329	7873	7252	7665	7597
11:00	2261	970	2019	1750	2343	2343	2110	2265	5426	2533	6091	4684	6260	2820	6306	5129
12:00	1779	1575	1831	1728	1852	1682	1964	1833	8220	5007	5511	6246	8082	5748	6796	6875
13:00	1327	968	1368	1221	1361	1098	1422	1294	6243	3296	5723	5087	2399	2219	2512	2377
14:00	1037	1037	1045	1039	1066	1136	1090	1097	2383	2823	3628	2944	1777	2077	1801	1885
15:00	750	834	750	778	781	883	781	815	1382	1600	1489	1491	1324	1459	1324	1369
16:00	440	460	451	450	478	507	495	493	871	970	921	921	803	826	817	815
17:00	210	214	223	216	245	253	262	253	466	507	492	488	391	391	408	397

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis externos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados



Análise de Variância:

One-way ANOVA: Medido; Simulado

Method

Null hypothesis All means are equal

Alternative hypothesis At least one mean is different

Significance level $\alpha = 0,05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Medido; Simulado

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	78144	78144	0,00	0,992
Error	16	10707838581	669239911		
Total	17	10707916725			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
25869,7	0,00%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Medido	9	54982	25842	(36701; 73262)
Simulado	9	55114	25897	(36833; 73394)
Pooled StDev			25869,7	

Tukey Pairwise Comparisons

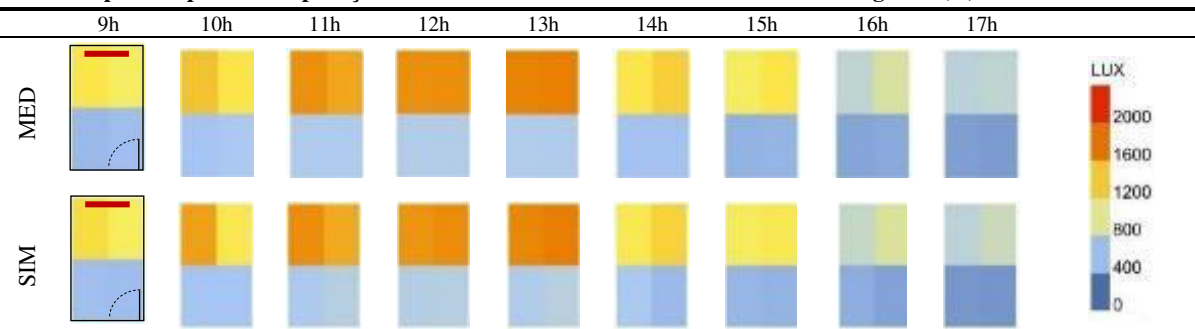
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Medido	9	55114	A
Simulado	9	54982	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão.

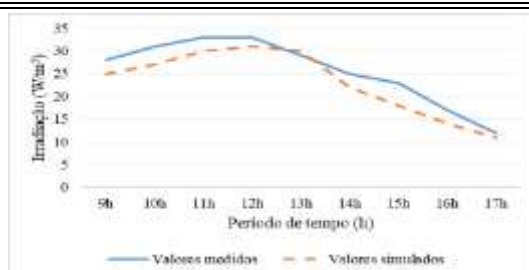
Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados



MBE = -6,0% e CV (RMSE) = 5,2%

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão. Primeira imagem com indicação do posicionamento das esquadrias (janela em vermelho). Para a validação e simulações, o formato da sala foi considerado como retangular.

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de irradiação (W/m²) medidos e simulados



MBE = 10,0% e CV (RMSE) = 8,4%

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão.

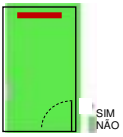
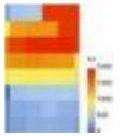
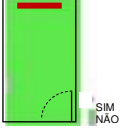
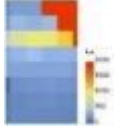
Simulação computacional

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado

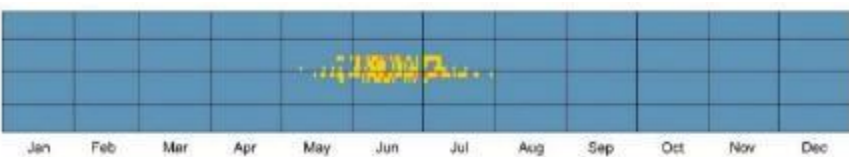
Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	914	12,8	36,0	51,2	13,3
DEM-403	100	477	13,0	71,7	15,3	0

Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); DEM-403 = Elemento de controle solar – DEM sala 403.

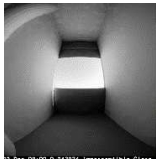
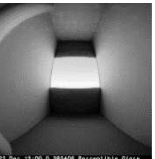
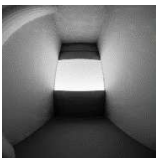
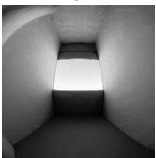
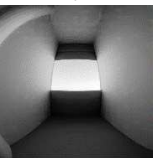
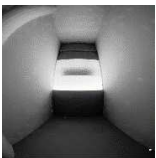
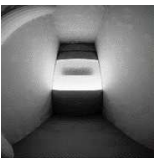
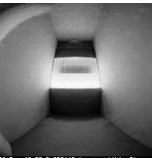
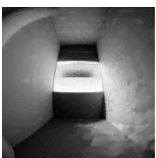
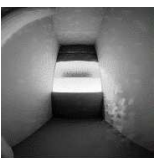
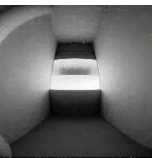
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância (lx)	avUDI _{<100} (%)	avUDI _{100-2000lx} (%)	avUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE						
DEM-403						

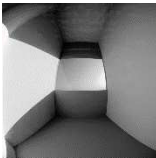
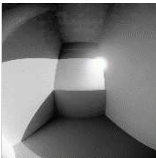
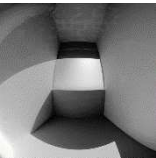
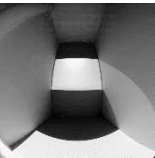
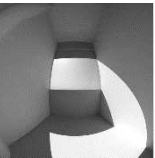
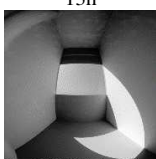
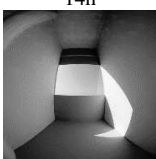
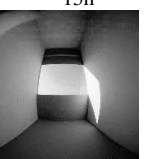
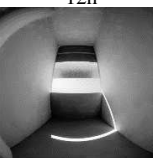
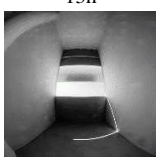
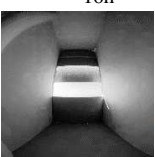
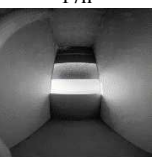
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual

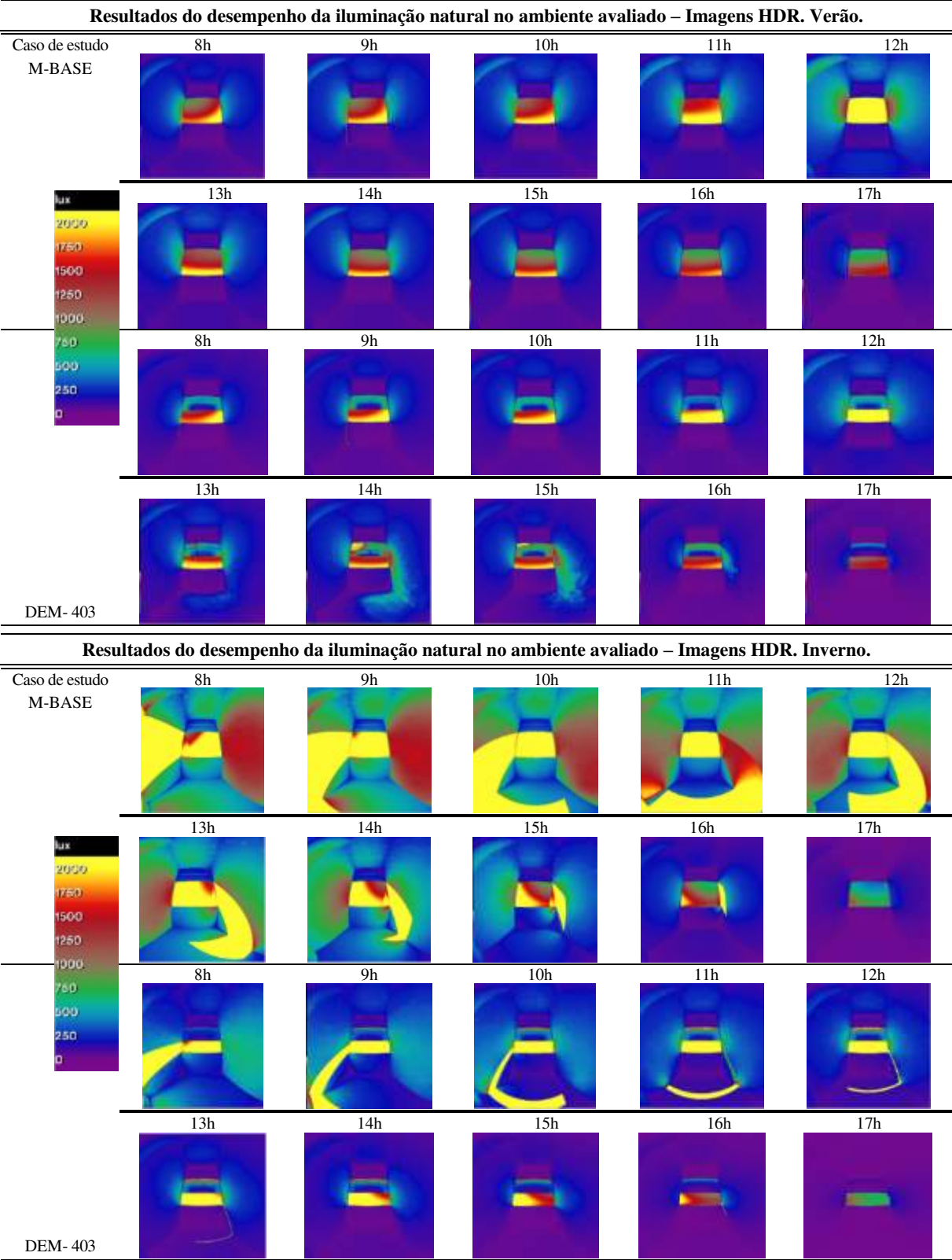
M-BASE	
DEM-403	

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,24	 DGP = 0,26	 DGP = 0,26	 DGP = 0,28	 DGP = 0,38
	 DGP = 0,26	 DGP = 0,24	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21
DEM- 403	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24	 DGP = 0,27	 DGP = 0,34
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,25	 DGP = 0,24	 DGP = 0,21	 DGP = 0,19

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,53	 DGP = 1,00	 DGP = 0,49	 DGP = 0,44	 DGP = 0,49
	 DGP = 0,49	 DGP = 0,46	 DGP = 0,35	 DGP = 0,26	 DGP = 0,19
DEM- 403	 DGP = 0,36	 DGP = 0,36	 DGP = 0,32	 DGP = 0,33	 DGP = 0,31
	 DGP = 0,30	 DGP = 0,27	 DGP = 0,24	 DGP = 0,20	 DGP = 0,17

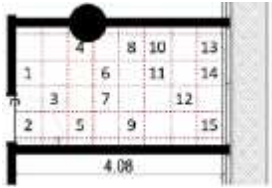
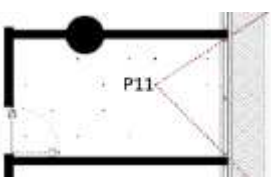
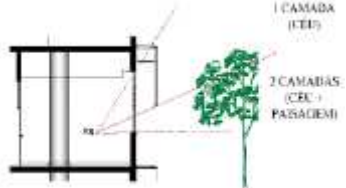


Avaliação da visão externa – Método de projeção

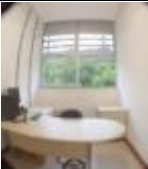
Dimensões da abertura PAF Orientação	Vistas do ambiente avaliado (altura = 1,50m)		
	Vista da paisagem externa a partir da janela	Vista a partir do fundo da sala	Vista a partir da frente da sala
Horizontal: 2,31m Vertical: 2,25m PAF: 38%			
Norte (20°)			

Fonte: acervo da autora.

Procedimento de avaliação para posição sentada (altura = 1,20m / malha 50x50cm)

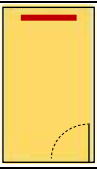
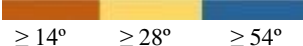
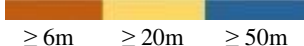
Identificação dos pontos das fotografias	Ângulo de visão horizontal	Número de camadas visíveis
		

Fotografias das visadas selecionadas (fotografias olho de peixe)

				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15

Número de respostas para cada parâmetro.

Ambiente analisado	Indicadores								
	Ângulo de visão horizontal			Distância da vista externa			Número de camadas visíveis		
	≥ 14°	≥ 28°	≥ 54°	≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m	1 camada	2 camadas	3 camadas
M-BASE	0	24	24	0	48	0	0	48	0
DEM-403	0	24	24	0	48	0	0	48	0

Ângulo de visão horizontal		Distância da vista externa		Número de camadas visíveis	
M-BASE	DEM-403	M-BASE	DEM-403	M-BASE	DEM-403
					
					

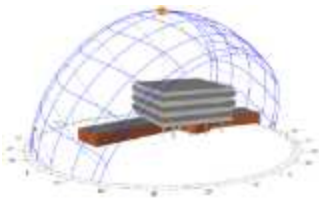
Elemento de controle solar do tipo painel perfurado: Ambiente de análise DEM-415

DEPARTAMENTO DE MEDICINA E ENFERMAGEM (DEM) – GABINETE 415

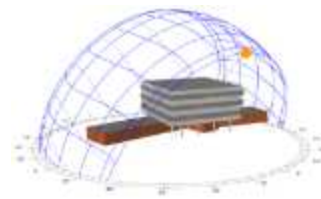
Modelagem



Volume. Fachada Leste.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.



Trajetória solar – verão.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.



Trajetória solar – inverno.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.

Calibração do modelo computacional – medições em contexto real

Instrumentação



Vista da instrumentação interna a partir do fundo da sala e a partir da janela da sala



Vista da instrumentação externa a partir da janela da sala



Vista da instrumentação externa a partir da calçada do edifício

Posicionamento dos sensores

ILUMINÂNCIA NO PLANO DE TRABALHO

- Quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso e sensores igualmente distribuídos
- Um ponto externo, afastado 0,40m do alinhamento do elemento de controle solar.

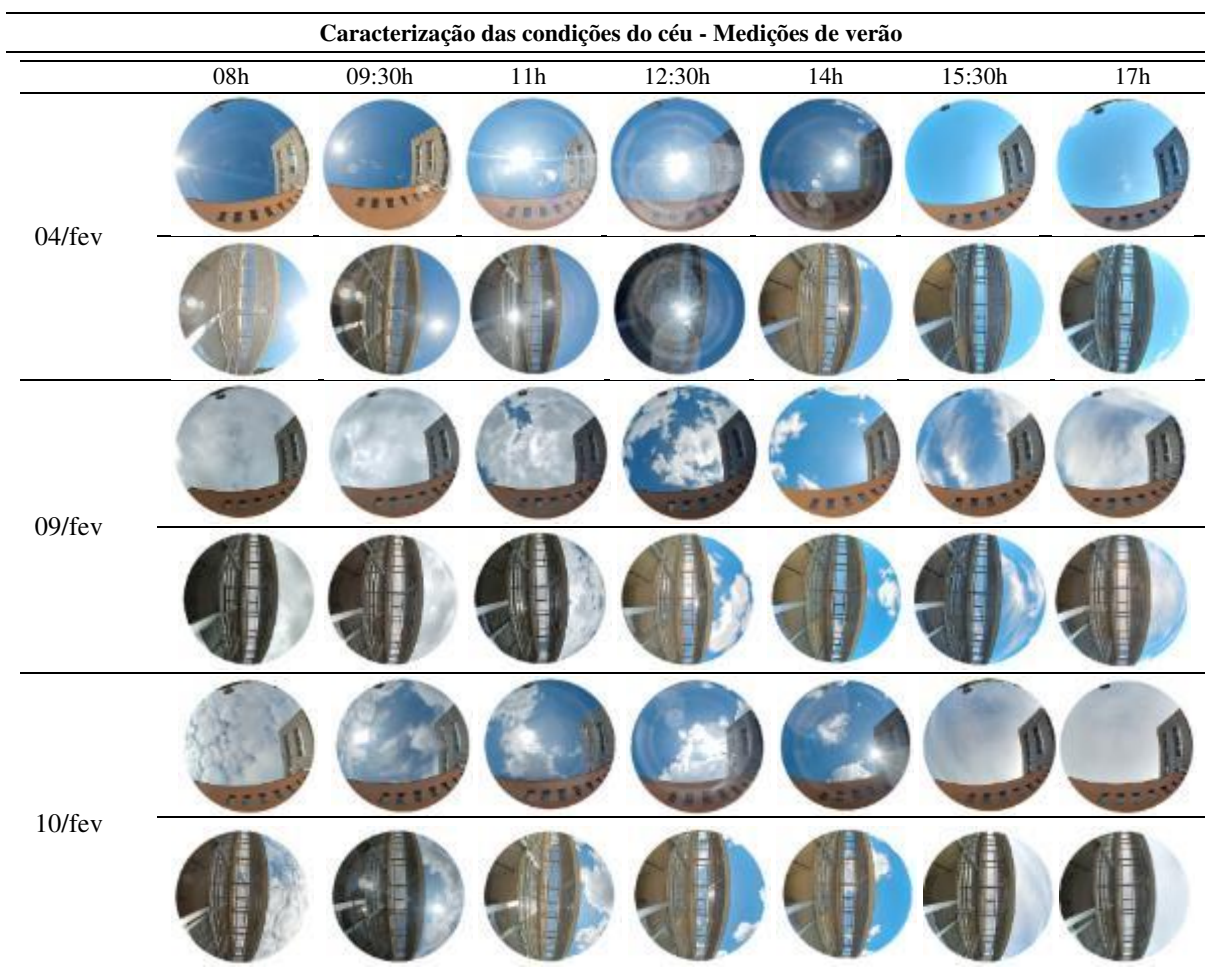
IRRADIÂNCIA SOLAR

- Um ponto interno, afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso
- Um ponto externo, afastado 0,15m do alinhamento do elemento de controle solar

Propriedades dos materiais de revestimento

Forro em gesso (pintura Branco)	$\rho = 0,94$
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,95$
Piso em granilite (Cinza) ¹	$\rho = 0,45$
Porta do tipo prancheta de madeira (pintura Branco)	$\rho = 0,94$
Vidro incolor (6mm)	$\tau = 0,60$
Tela microperfurada (Cinza)	$\rho = 0,80$

¹ Fernandes, L. C.; Krüger, C. E.; Motzafi-Haller, W. Experimentos de campo com teto-reservatório e painéis para resfriamento radiante em uma edificação-teste. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 357-384, jan/mar. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100509>.

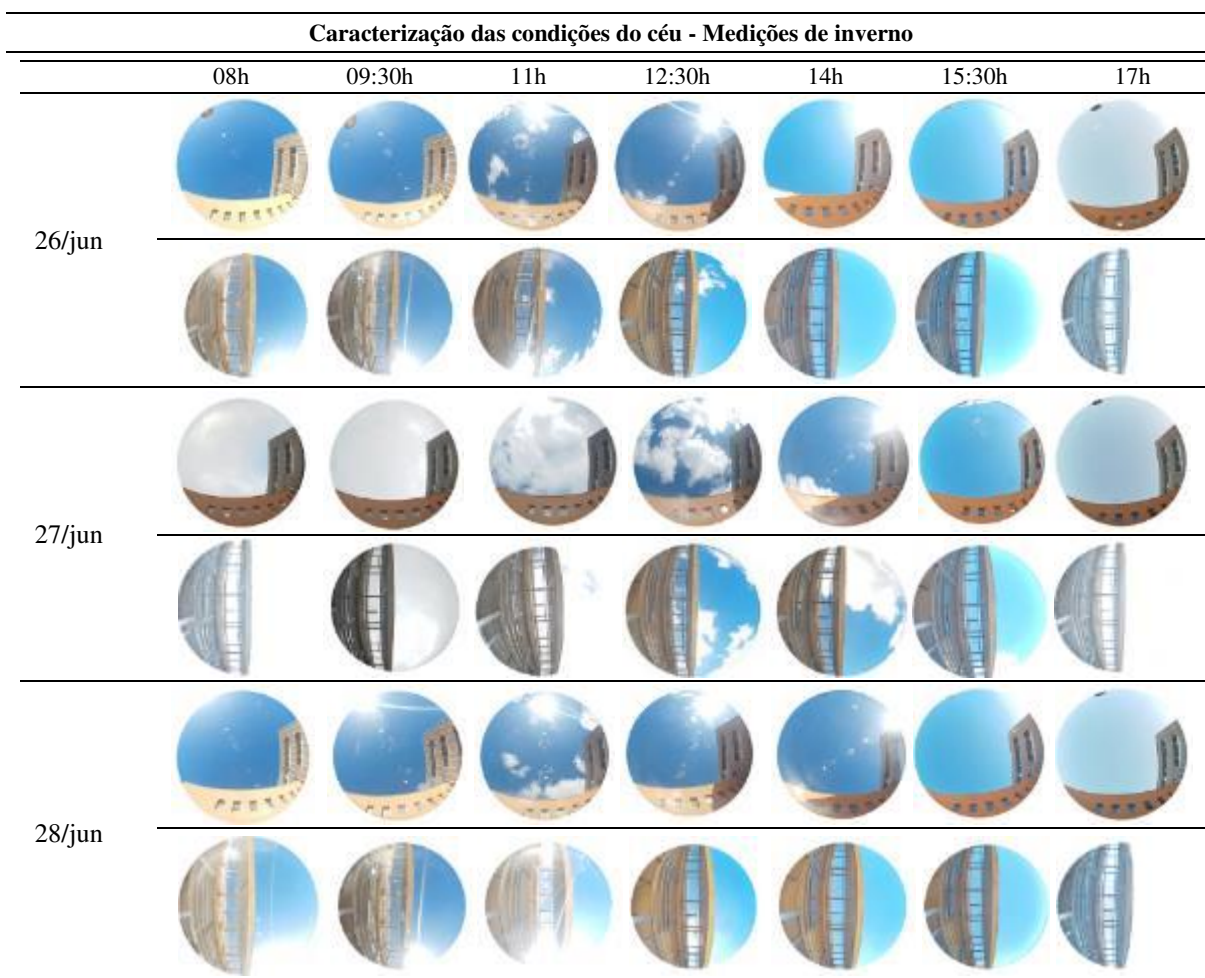


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

	Irradiação (W/m ²) - medidas externas				Irradiação (W/m ²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	4/2	9/2	10/2	Média	4/2	9/2	10/2	Média	4/2	9/2	10/2	Média
09:00	763	256	430	483	63	32	47	47	65945	27841	40239	44675
10:00	953	393	714	686	69	54	68	64	85753	39431	60924	62036
11:00	1093	527	919	847	75	42	47	55	100128	48647	86433	78403
12:00	1175	850	1146	1057	26	37	36	33	105562	68455	103481	92499
13:00	265	255	177	232	21	29	28	26	38448	35536	29514	34449
14:00	60	90	103	84	18	17	23	19	11680	14485	14911	13692
15:00	51	51	62	54	16	16	15	15	11115	12368	11115	11533
16:00	37	47	62	49	12	11	13	12	10211	11446	12179	11279
17:00	33	39	75	49	9	9	11	10	10075	10748	13090	11304

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	4/2	9/2	10/2	Média	4/2	9/2	10/2	Média	4/2	9/2	10/2	Média	4/2	9/2	10/2	Média
09:00	1855	758	1086	1233	2254	1082	1612	1649	4670	1756	3583	3337	3275	1485	2863	3275
10:00	1075	958	1179	1071	1302	1283	1453	1346	4093	2814	2869	3258	2645	2156	2442	2645
11:00	948	879	1089	972	1137	1135	1375	1215	1653	1994	2172	1940	1784	1626	2060	1784
12:00	815	833	963	871	978	1075	1181	1075	1379	1653	1787	1606	1568	1571	1717	1568
13:00	726	775	759	753	864	977	947	929	1186	1472	1511	1389	1340	1396	1409	1340
14:00	654	576	767	666	787	723	965	825	999	948	1242	1063	1074	941	1249	1074
15:00	593	544	593	576	721	702	721	714	855	869	907	877	832	797	849	832
16:00	422	418	495	445	540	573	679	597	684	705	797	729	622	595	688	622
17:00	301	417	344	354	408	603	477	496	551	574	700	608	488	463	575	488

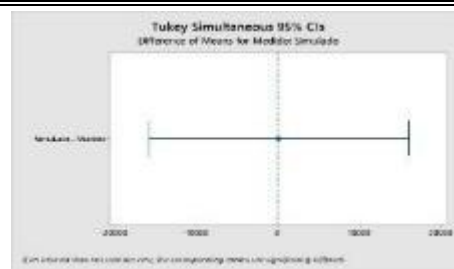
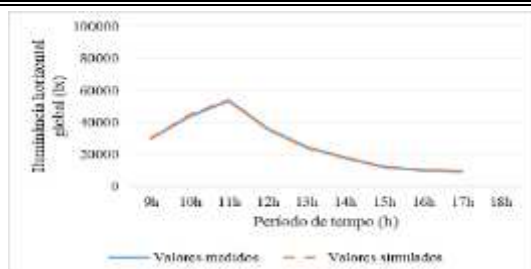


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

	Irradiação (W/m ²) - medidas externas				Irradiação (W/m ²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	26/6	27/6	28/6	Média	26/6	27/6	28/6	Média	26/6	27/6	28/6	Média
09:00	378	364	474	405	43	12	31	29	37844	17445	34265	29852
10:00	382	382	677	480	26	15	25	22	55784	24417	51209	43803
11:00	806	806	633	749	20	27	22	23	66577	33862	60311	53583
12:00	732	732	795	753	17	26	16	20	42584	33595	31974	36051
13:00	610	610	788	669	15	18	14	16	27056	23083	22718	24286
14:00	213	213	651	359	12	16	11	13	19023	14650	19662	17778
15:00	192	172	172	179	9	9	11	10	11787	12034	11754	11859
16:00	117	117	295	176	6	7	7	7	10035	10058	9941	10011
17:00	59	59	100	73	4	3	3	3	9121	9116	9147	9128

Iluminâncias internas medidas (lx)																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	26/6	27/6	28/6	Média	26/6	27/6	28/6	Média	26/6	27/6	28/6	Média	26/6	27/6	28/6	Média
09:00	519	233	465	405	667	330	659	552	1344	984	1747	1358	1190	623	1582	1132
10:00	452	335	460	416	636	453	652	580	1120	1106	1150	1125	1067	881	1083	1010
11:00	457	486	516	486	570	620	605	598	1090	1421	1204	1239	1082	1146	1183	1137
12:00	396	399	374	390	510	480	504	498	811	863	852	842	828	835	801	821
13:00	326	337	326	329	428	405	431	421	776	830	816	807	800	801	798	800
14:00	303	311	278	297	332	388	340	354	766	828	765	786	757	682	764	735
15:00	265	275	244	261	277	425	348	350	522	632	518	557	472	643	486	534
16:00	231	233	223	229	349	328	330	336	514	462	515	497	462	474	467	467
17:00	161	140	174	158	179	215	203	199	331	336	337	335	267	266	275	269

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis externos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados

Análise de Variância:
One-way ANOVA: Medido; Simulado
Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0,05$
 Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Medido; Simulado

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	33454	33454	0,00	0,991
Error	16	4055005880	253437867		
Total	17	4055039334			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
15919,7	0,00%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Medido	9	26261	15827	(15012; 37511)
Simulado	9	26347	16012	(15098; 37597)

Pooled StDev = 15919,7

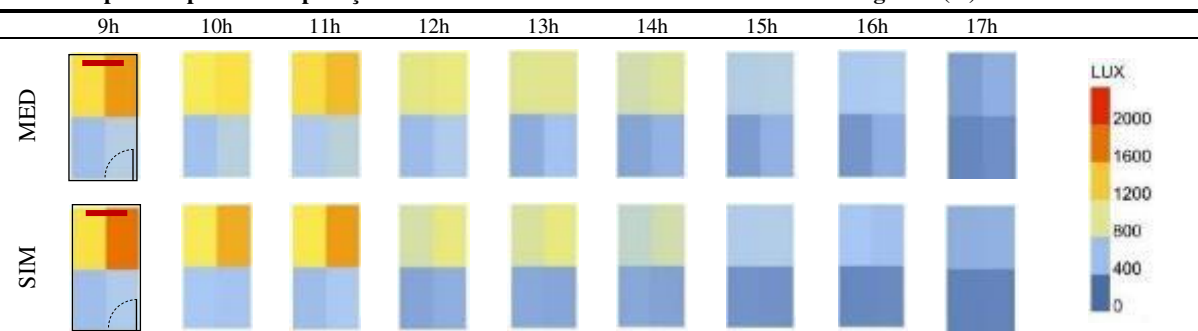
Tukey Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Medido	9	26347	A
Simulado	9	26261	A

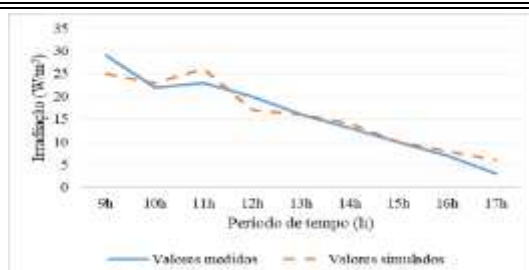
Means that do not share a letter are significantly different.

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno.

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados


MBE = 5,6% e CV (RMSE) = 10,7%

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno. Primeira imagem com indicação do posicionamento das esquadrias (janela em vermelho).

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de irradiação (W/m^2) medidos e simulados


MBE = -1,4% e CV (RMSE) = 10,1%

Obs.: Utilizados resultados das medições de inverno.

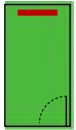
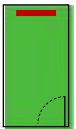
Simulação computacional

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	642	11,3	50,7	38,0	10
DEM-415	100	193	11,6	83,7	4,7	0

Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); DEM-415 = Elemento de controle solar – DEM sala 415.

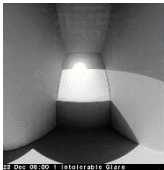
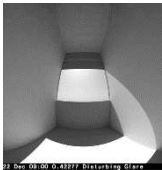
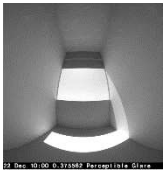
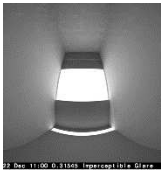
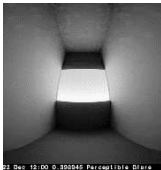
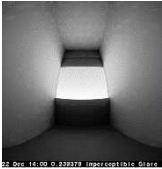
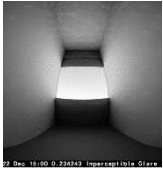
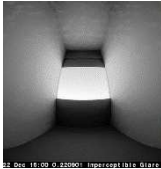
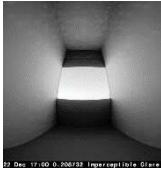
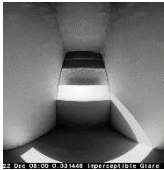
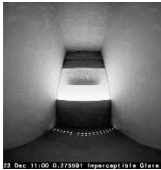
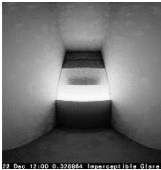
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância (lx)	avUDI _{<100} (%)	avUDI _{100-2000lx} (%)	avUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE						
DEM-415						

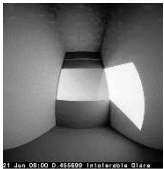
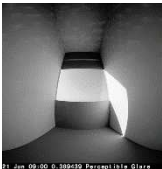
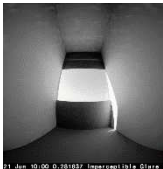
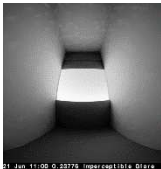
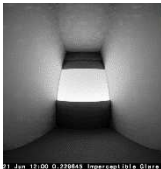
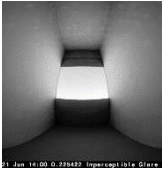
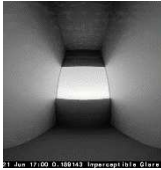
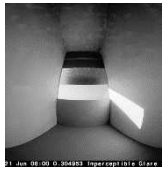
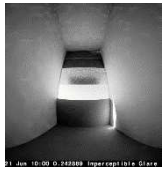
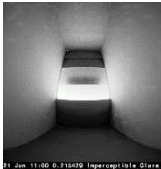
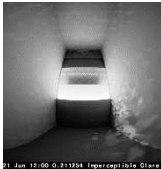
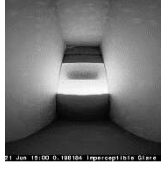
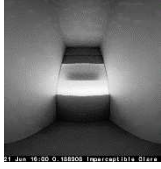
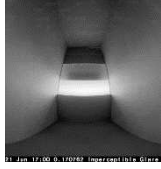
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual

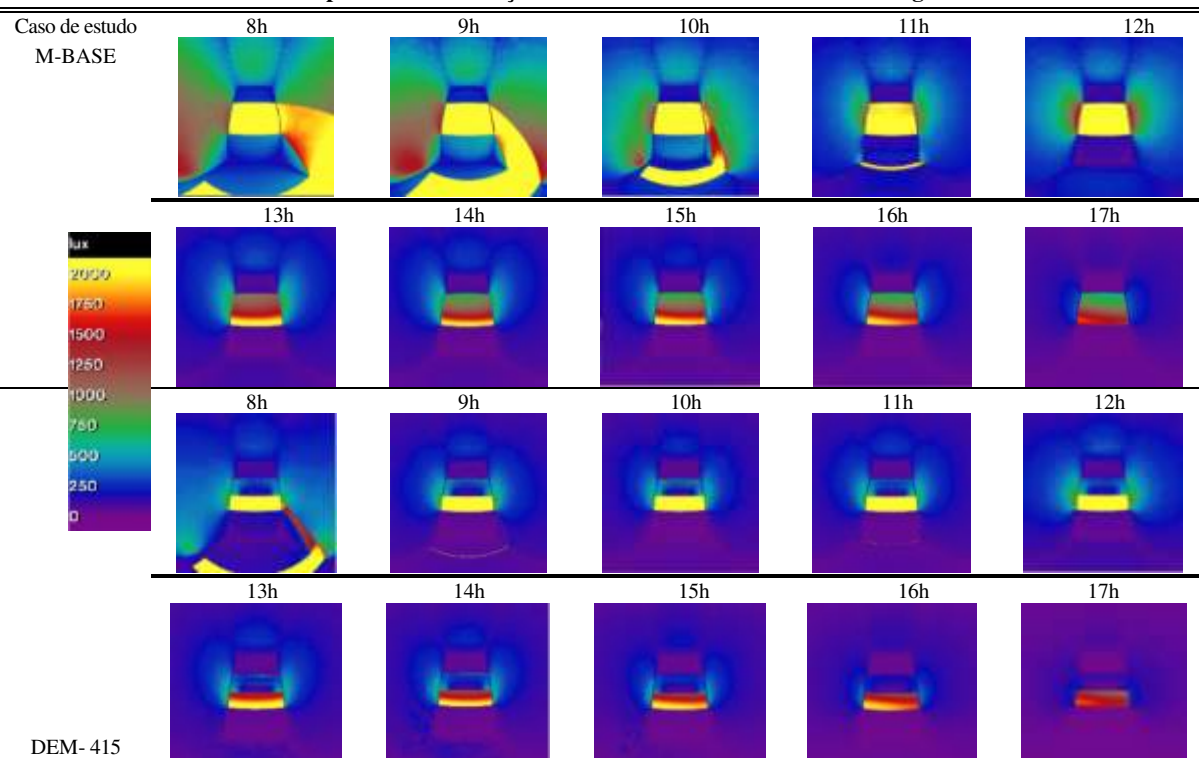
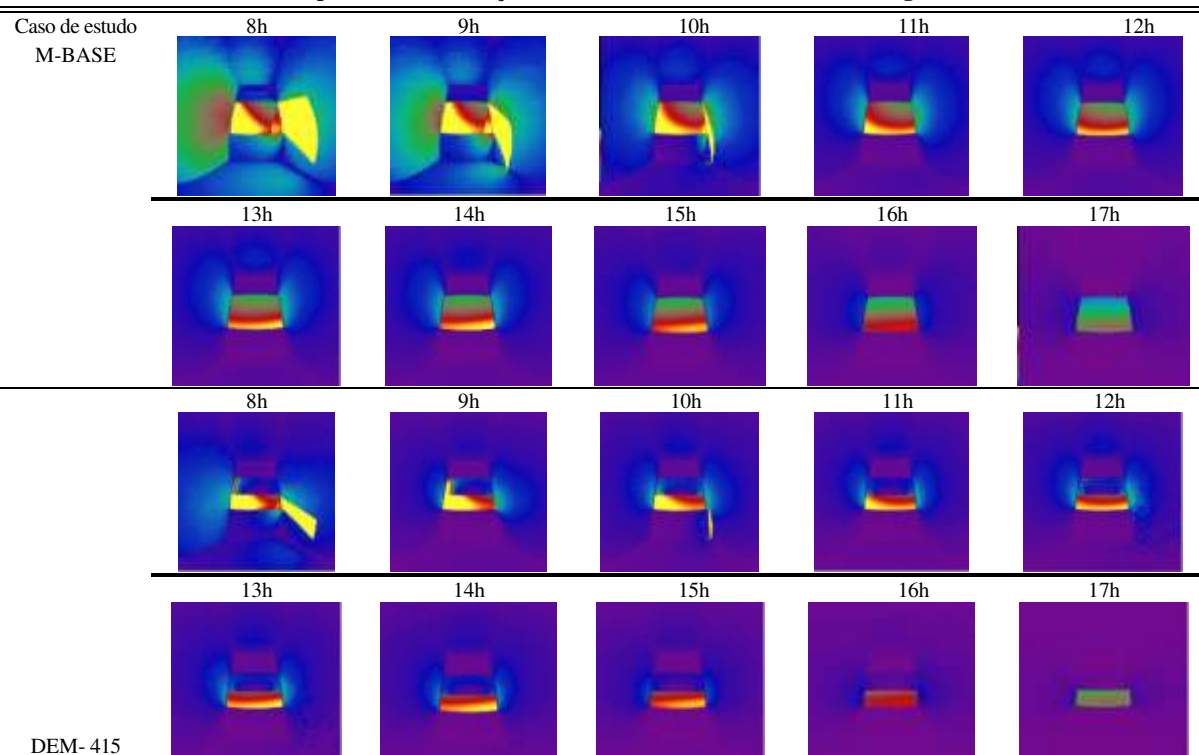
M-BASE	
DEM-415	

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 1,00	 DGP = 0,42	 DGP = 0,38	 DGP = 0,32	 DGP = 0,40
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,24	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21
DEM- 415	 DGP = 0,33	 DGP = 0,30	 DGP = 0,28	 DGP = 0,28	 DGP = 0,33
	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24	 DGP = 0,22	 DGP = 0,20	 DGP = 0,19

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,46	 DGP = 0,39	 DGP = 0,28	 DGP = 0,24	 DGP = 0,23
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21	 DGP = 0,19
DEM- 415	 DGP = 0,30	 DGP = 0,25	 DGP = 0,24	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21
	 DGP = 0,21	 DGP = 0,21	 DGP = 0,20	 DGP = 0,19	 DGP = 0,17

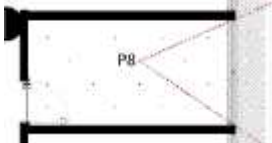
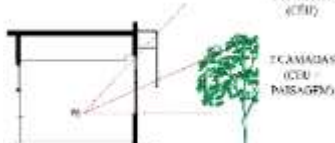
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Verão.

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Inverno.


Avaliação da visão externa – Método de projeção

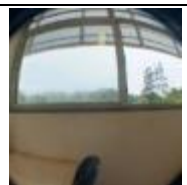
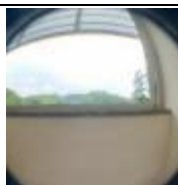
Dimensões da abertura PAF Orientação	Vistas do ambiente avaliado (altura = 1,50m)		
	Vista da paisagem externa a partir da janela	Vista a partir do fundo da sala	Vista a partir da frente da sala
Horizontal: 2,31m Vertical: 2,25m PAF: 38%			
Leste (109°)			

Fonte: acervo da autora.

Procedimento de avaliação para posição sentada (altura = 1,20m / malha 50x50cm)

Identificação dos pontos das fotografias	Ângulo de visão horizontal	Número de camadas visíveis
		

Fotografias das visadas selecionadas (fotografias olho de peixe)

				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15

Número de respostas para cada parâmetro.

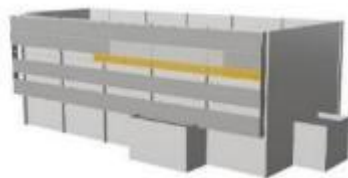
Ambiente analisado	Indicadores								
	Ângulo de visão horizontal			Distância da vista externa			Número de camadas visíveis		
	≥ 14º	≥ 28º	≥ 54º	≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m	1 camada	2 camadas	3 camadas
M-BASE	0	30	30	0	0	60	0	60	0
DEM-415	0	30	30	0	0	60	0	60	0

Ângulo de visão horizontal		Distância da vista externa		Número de camadas visíveis				
M-BASE	DEM-415	M-BASE	DEM-415	M-BASE	DEM-415			
≥ 14º	≥ 28º	≥ 54º	≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m	1	2	3 camadas

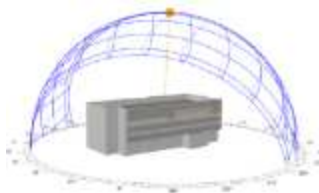
Elemento de controle solar do tipo painel perfurado: Ambiente de análise DPO

DIRETORIA DE PROJETOS E OBRAS (DPO) – GABINETE DPO

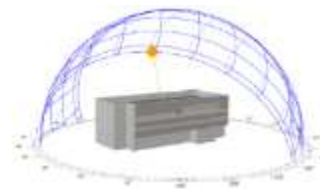
Modelagem



Volume. Fachada Noroeste.
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.



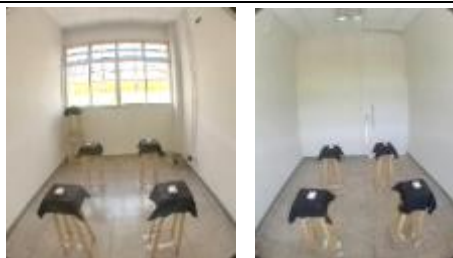
Trajatória solar – verão (sol 12h).
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + ClimateStudio.



Trajatória solar – inverno (sol 12h).
Fonte: Elaborado na plataforma
Rhinceros + Grasshopper.

Validação do modelo computacional – medições em contexto real

Instrumentação



Vista da instrumentação interna a partir do fundo da sala e a partir da janela da sala



Vista da instrumentação externa a partir da janela da sala



Vista da instrumentação externa a partir da calçada do edifício

Posicionamento dos sensores

ILUMINÂNCIA NO PLANO DE TRABALHO

- Quatro pontos internos, com altura de 0,75m acima do nível do piso e sensores igualmente distribuídos
- Um ponto externo, afastado 0,40m do alinhamento do elemento de controle solar.

IRRADIAÇÃO

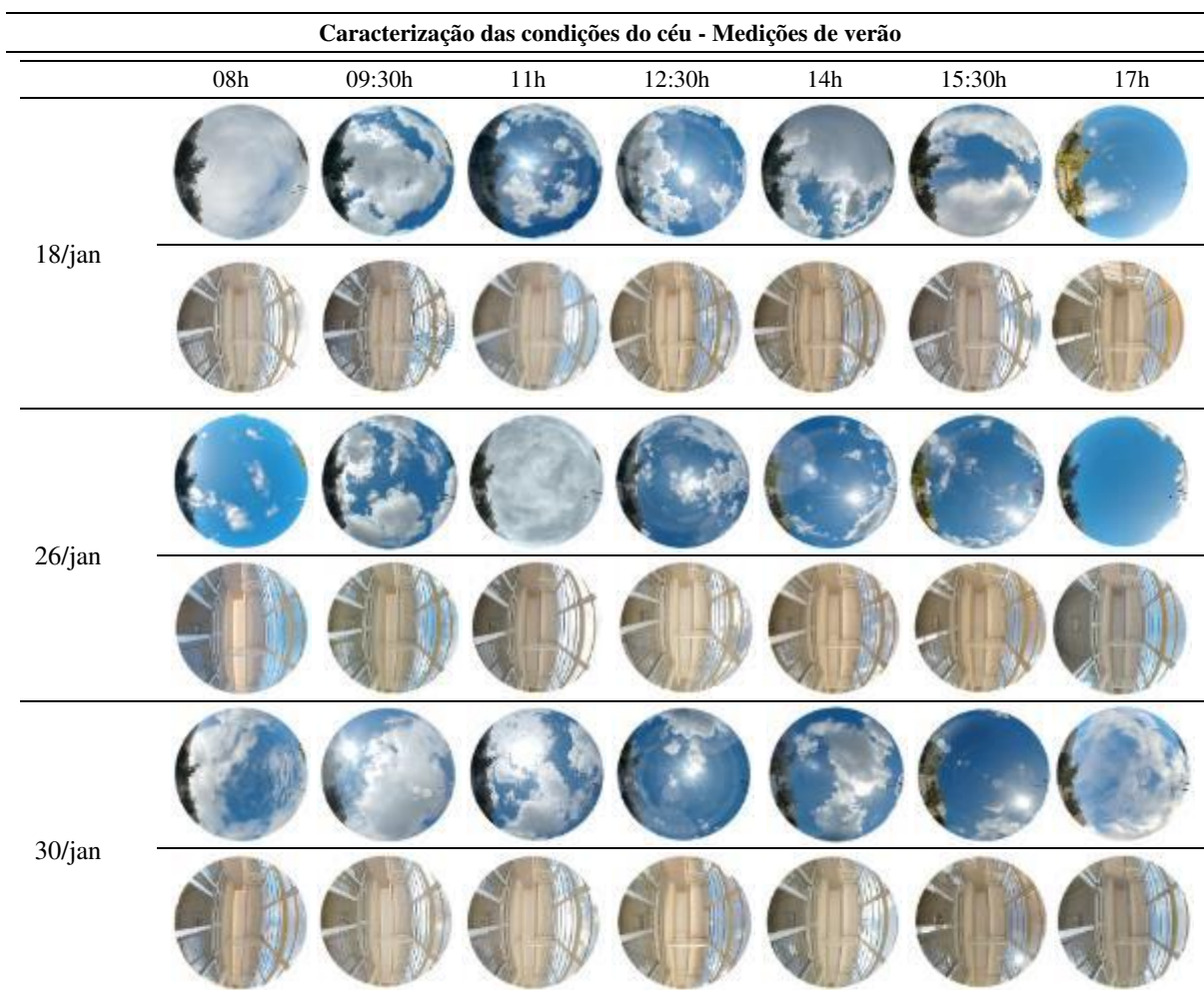
- Um ponto interno, afastado 0,20m do alinhamento da alvenaria e com altura de 1,45m acima do nível do piso
- Um ponto externo, afastado 0,15m do alinhamento do elemento de controle solar

Propriedades dos materiais de revestimento

Forro modular termoacústico (Branco) ¹	$\rho = 0,86$
Paredes internas (pintura Branco)	$\rho = 0,745$
Piso em granilite (Cinza) ²	$\rho = 0,45$
Porta de vidro recoberta com papel cartão (Branco)	$\rho = 0,85$
Vidro incolor (6mm)	$\tau = 0,60$
Tela microperfurada (Cinza)	$\rho = 0,80$
Tela microperfurada (Amarelo)	$\rho = 0,25$

¹ Informação extraída do catálogo do Fabricante. Armstrong World Industries. Forro termoacústico CIRRUS. Disponível em: <https://www.armstrongceilings.com/commercial/pt-br/commercial-ceilings-walls/mineral-fiber-and-fiberglass-ceiling-tiles.html#bbbh=%7B%22selectedItem%22%3A%7B%22namen%22%3A%22browse%22%2C%22itemIndex%22%3Anull%7D%7D>. Acesso em 01/12/2022.

² Fernandes, L. C.; Krüger, C. E.; Motzafi-Haller, W. Experimentos de campo com teto-reservatório e painéis para resfriamento radiante em uma edificação-teste. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 357-384, jan/mar. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100509>.

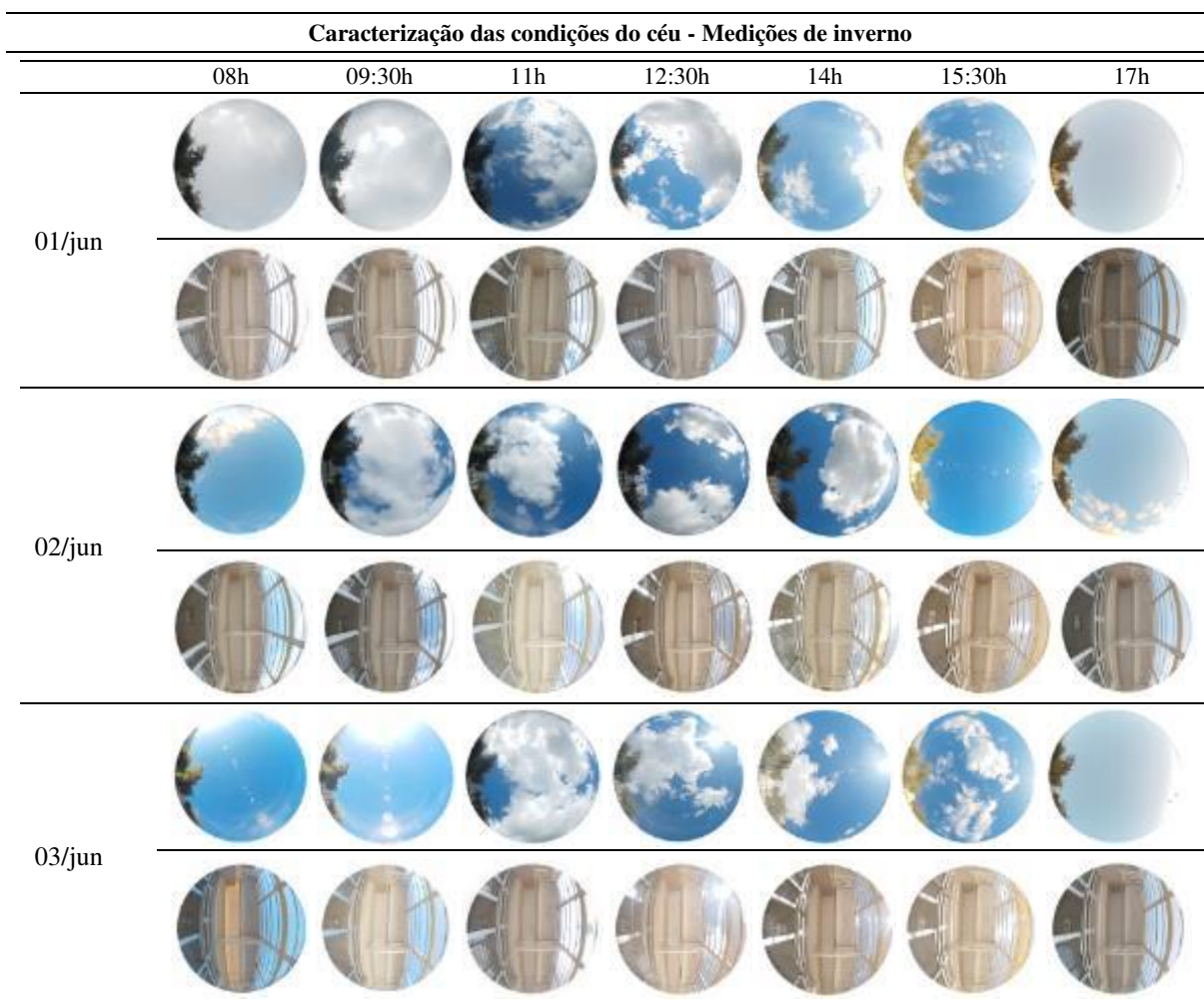


Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.

	Irradiação (W/m ²) - medidas externas				Irradiação (W/m ²) - medidas internas				Iluminâncias (lx) – medidas externas			
	18/1	26/1	30/1	Média	18/1	26/1	30/1	Média	18/1	26/1	30/1	Média
09:00	146	72	102	107	4	12	4	7	19841	13177	14945	15988
10:00	156	154	146	152	5	12	6	8	20370	19949	18565	19628
11:00	146	203	202	184	5	12	6	8	19734	23457	23160	22117
12:00	205	378	458	347	7	12	7	9	43549	42328	48492	44790
13:00	913	892	1.121	976	9	12	9	10	84412	81162	100304	88626
14:00	726	752	755	745	10	12	8	10	69616	76004	69951	71857
15:00	465	1021	671	719	10	7	12	9	46558	97171	46558	63429
16:00	315	540	600	485	6	12	10	9	33176	51372	56049	46866
17:00	293	415	339	349	7	12	7	9	31598	41049	34827	35825

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	18/1	26/1	30/1	Média	18/1	26/1	30/1	Média	18/1	26/1	30/1	Média	18/1	26/1	30/1	Média
09:00	197	185	224	202	239	239	268	249	343	273	353	323	296	242	295	277
10:00	246	244	278	256	277	277	312	288	374	380	404	386	348	349	381	359
11:00	238	239	294	257	270	270	323	288	351	414	443	403	330	373	422	375
12:00	311	322	299	311	347	347	340	344	466	511	449	476	452	496	449	466
13:00	435	440	455	444	473	473	480	475	634	664	621	640	656	680	671	669
14:00	430	448	396	425	467	467	447	461	649	702	590	647	660	706	588	651
15:00	318	568	318	401	362	601	362	441	525	781	654	653	492	826	492	604
16:00	275	467	505	415	311	311	567	396	453	761	781	665	424	719	742	628
17:00	386	529	395	437	424	424	443	430	622	1031	903	852	571	752	585	636



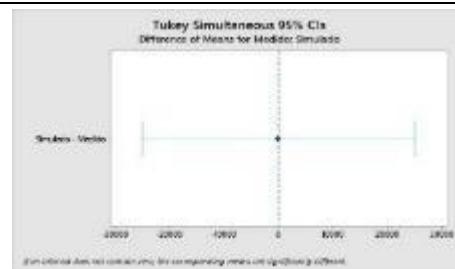
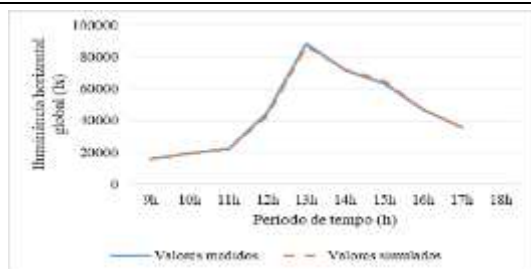
Fonte: acervo da autora.

Obs.: Primeira sequência: imagens obtidas do céu a partir da calçada da edificação. Segunda sequência: imagens obtidas do céu a partir da janela do ambiente avaliado.1

Irradiação (W/m²) - medidas externas					Irradiação (W/m²) - medidas internas					Iluminâncias (lx) – medidas externas				
	1/6	2/6	3/6	Média		1/6	2/6	3/6	Média		1/6	2/6	3/6	Média
09:00	54	106	36	65		1	3	2	2		12367	15068	8491	11975
10:00	143	156	483	261		3	4	4	4		19407	19532	11213	16717
11:00	249	292	496	346		5	6	6	5		27790	29380	11318	22829
12:00	615	511	384	504		8	8	6	8		56815	41778	10945	36512
13:00	361	518	785	555		15	26	45	29		35781	45148	13937	31622
14:00	541	690	574	602		30	43	40	38		52894	57709	12574	41059
15:00	483	483	470	479		29	29	29	29		47125	47125	40312	44854
16:00	378	402	418	399		31	36	37	35		39059	33705	11505	28089
17:00	69	145	118	111		4	13	10	9		13018	16138	9159	12772

Iluminâncias (lx) - medidas internas																
	Sensor 1				Sensor 2				Sensor 3				Sensor 4			
	1/6	2/6	3/6	Média	1/6	2/6	3/6	Média	1/6	2/6	3/6	Média	1/6	2/6	3/6	Média
09:00	59	128	11	66	90	160	46	99	158	237	95	163	103	196	29	109
10:00	135	156	18	103	170	194	53	139	279	311	104	231	229	256	39	175
11:00	202	232	23	152	233	268	58	186	372	401	114	296	332	368	49	250
12:00	355	334	23	238	385	366	59	270	543	529	115	396	543	526	51	373
13:00	306	399	48	251	352	438	83	291	498	616	145	420	482	644	87	404
14:00	550	654	50	418	581	681	85	449	422	812	282	506	610	692	292	531
15:00	647	55	119	440	723	636	175	511	738	428	291	486	845	331	228	468
16:00	686	841	168	565	780	1078	284	714	764	1018	272	684	429	1052	164	548
17:00	229	498	50	259	264	686	95	349	294	612	120	342	237	589	57	294

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis externos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados



Análise de Variância:

One-way ANOVA: Medido; Simulado

Method

Null hypothesis All means are equal
Alternative hypothesis At least one mean is different
Significance level $\alpha = 0,05$
Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor Levels Values
Factor 2 Medido; Simulado

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	172089	172089	0,00	0,987
Error	16	10045333651	627833353		
Total	17	10045505740			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
25056,6	0,00%	0,00%	0,00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Medido	9	45458	25147	(27753; 63164)
Simulado	9	45263	24966	(27557; 62969)

Pooled StDev = 25056,6

Tukey Pairwise Comparisons

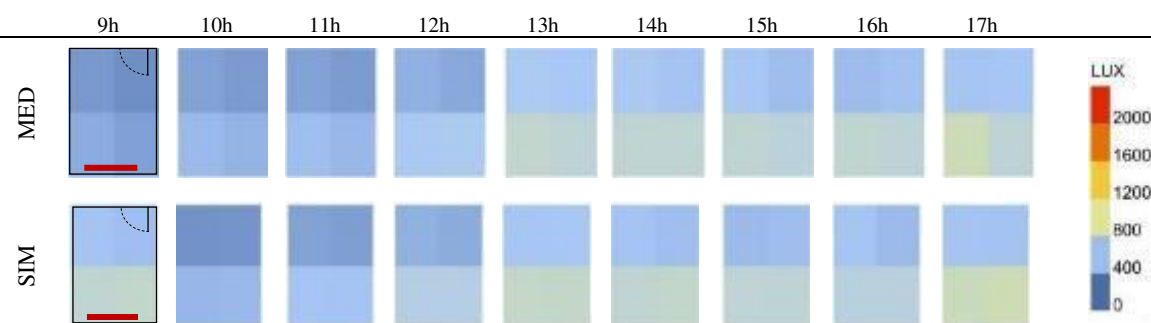
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Medido	9	45458	A
Simulado	9	45263	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão.

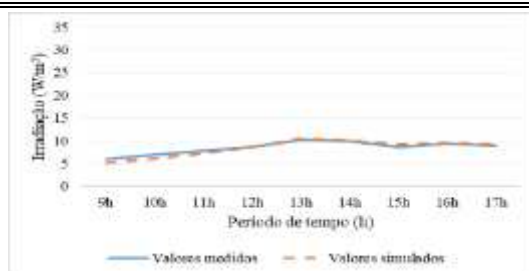
Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de iluminância horizontal global (lx) medidos e simulados



MBE = 4,3% e CV (RMSE) = 5,8%

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão. Primeira imagem com indicação do posicionamento das esquadrias (janela em vermelho). Para a validação e simulações, o formato da sala foi considerado como retangular.

Análises ponto a ponto: comparação entre níveis internos de irradiação (W/m²) medidos e simulados



MBE = 4,1% e CV (RMSE) = 7,2%

Obs.: Utilizados resultados das medições de verão.

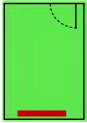
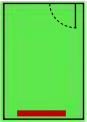
Simulação computacional

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado

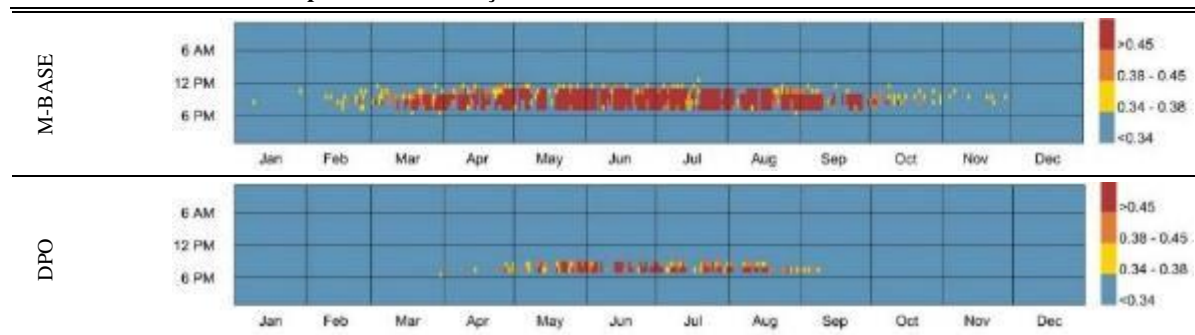
Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	1066	11,3	72,4	16,3	16,7
DPO	100	197	11,9	88,1	0	0

Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); DPO = Elemento de controle solar – sala DPO.

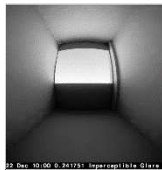
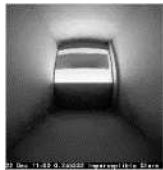
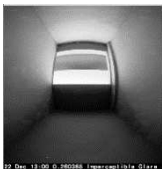
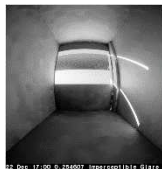
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias

Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância (lx)	avUDI _{<100} (%)	avUDI _{100-2000lx} (%)	avUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE						
DPO						

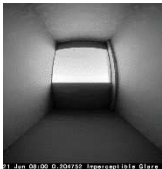
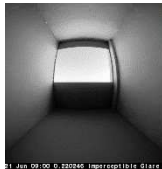
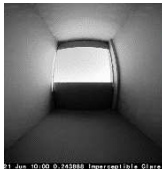
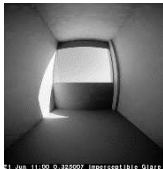
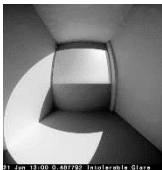
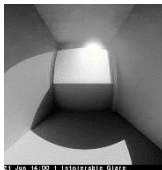
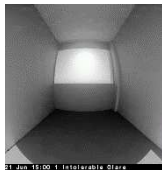
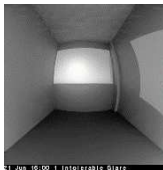
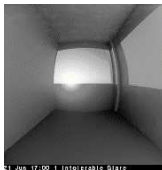
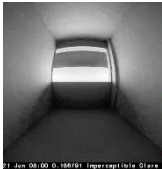
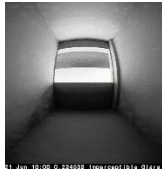
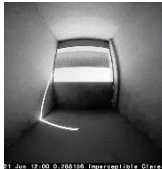
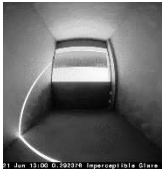
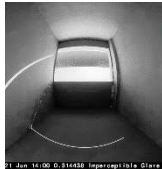
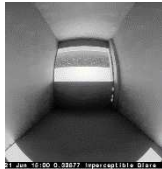
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual

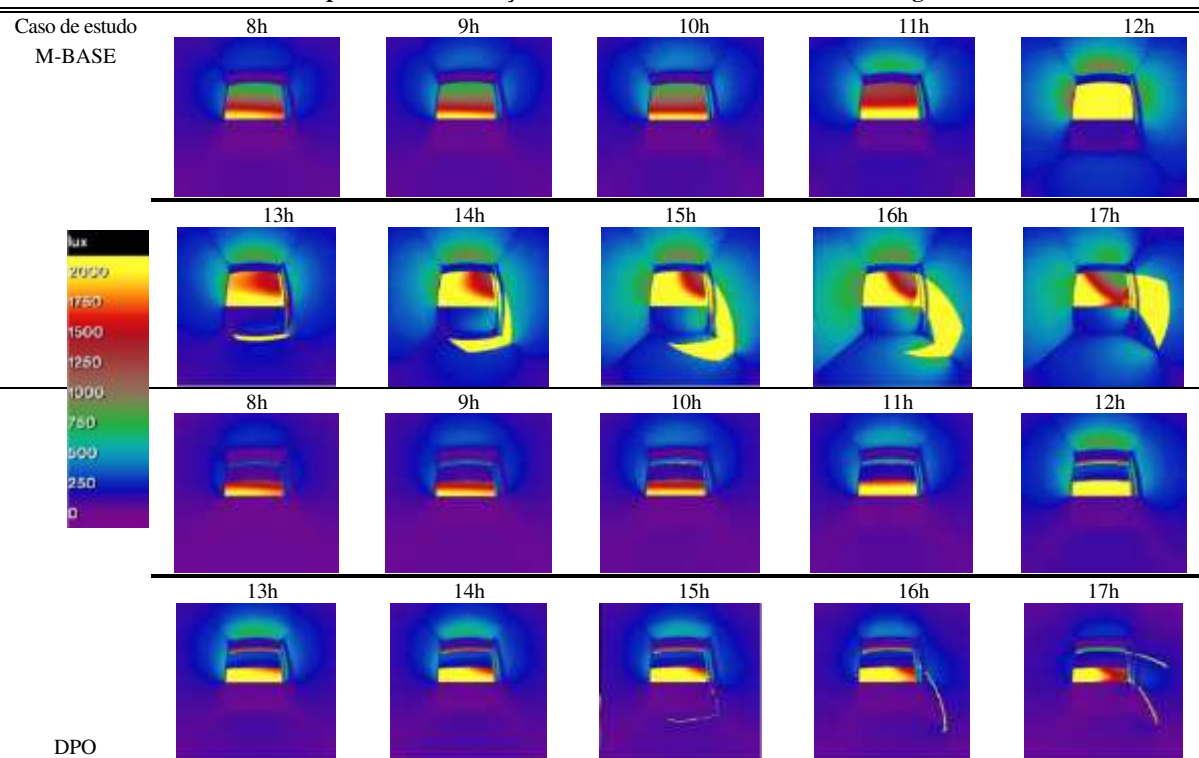
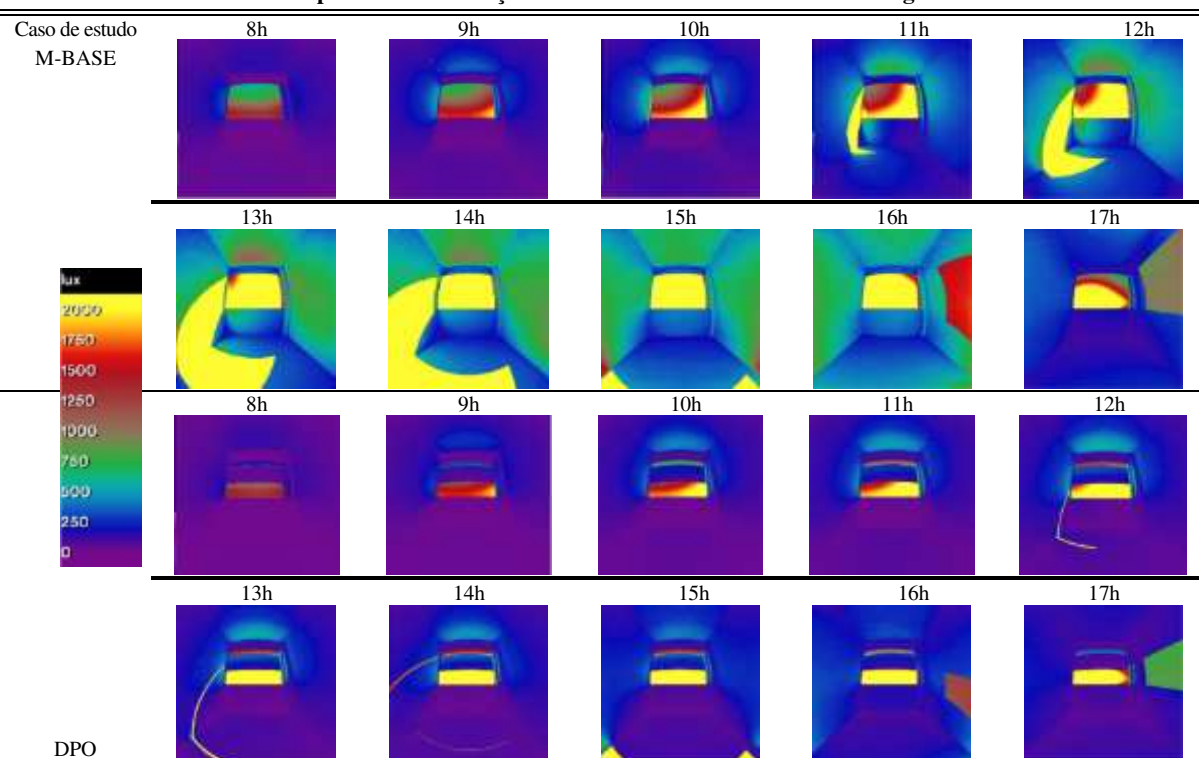


Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão

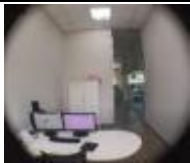
Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24	 DGP = 0,27	 DGP = 0,38
	 DGP = 0,30	 DGP = 0,37	 DGP = 0,43	 DGP = 0,43	 DGP = 0,39
DPO	 DGP = 0,21	 DGP = 0,23	 DGP = 0,23	 DGP = 0,23	 DGP = 0,33
	 DGP = 0,26	 DGP = 0,26	 DGP = 0,27	 DGP = 0,27	 DGP = 0,25

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

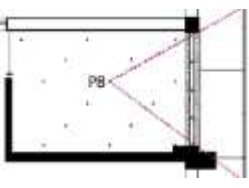
Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,20	 DGP = 0,22	 DGP = 0,24	 DGP = 0,33	 DGP = 0,44
	 DGP = 0,49	 DGP = 1,00	 DGP = 1,00	 DGP = 1,00	 DGP = 1,00
DPO	 DGP = 0,19	 DGP = 0,20	 DGP = 0,22	 DGP = 0,25	 P = 0,29
	 DGP = 0,29	 DGP = 0,31	 DGP = 0,34	 DGP = 1,00	 DGP = 1,00

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Verão.

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Inverno.


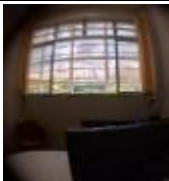
Avaliação da visão externa – Método de projeção

Dimensões da abertura PAF Orientação	Vistas do ambiente avaliado (altura = 1,50m)		
	Vista da paisagem externa a partir da janela	Vista a partir do fundo da sala	Vista a partir da frente da sala
Horizontal: 2,62m Vertical: 1,65m PAF: 42%			
Noroeste			

Procedimento de avaliação para posição sentada (altura = 1,20m / malha 50x50cm)

Identificação dos pontos das fotografias	Ângulo de visão horizontal	Número de camadas visíveis
		

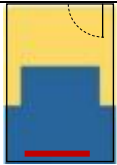
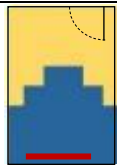
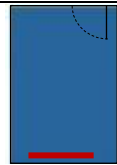
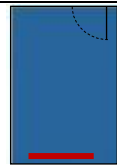
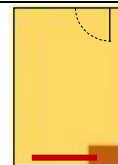
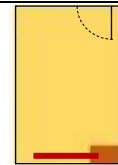
Fotografias das visadas selecionadas (fotografias olho de peixe)

				
1	2	3	4	5
				
6	7	8	9	10
				
11	12	13	14	15

Fonte: acervo da autora. Jan/2024.

Número de respostas para cada parâmetro.

Ambiente analisado	Indicadores								
	Ângulo de visão horizontal			Distância da vista externa			Número de camadas visíveis		
	≥ 14º	≥ 28º	≥ 54º	≥ 6m	≥ 20m	≥ 50m	1 camada	2 camadas	3 camadas
M-BASE	0	22	26	0	0	48	2	46	0
DPO	0	24	24	0	0	48	2	46	0

Ângulo de visão horizontal		Distância da vista externa		Número de camadas visíveis	
M-BASE	DPO	M-BASE	DPO	M-BASE	DPO
					
≥ 14° ≥ 28° ≥ 54°		≥ 6m ≥ 20m ≥ 50m		1 2 3 camadas	

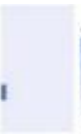
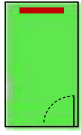
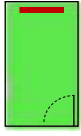
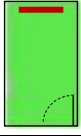
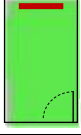
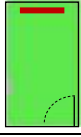
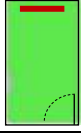
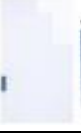
APÊNDICE E

Resultados das simulações do modelo proposto

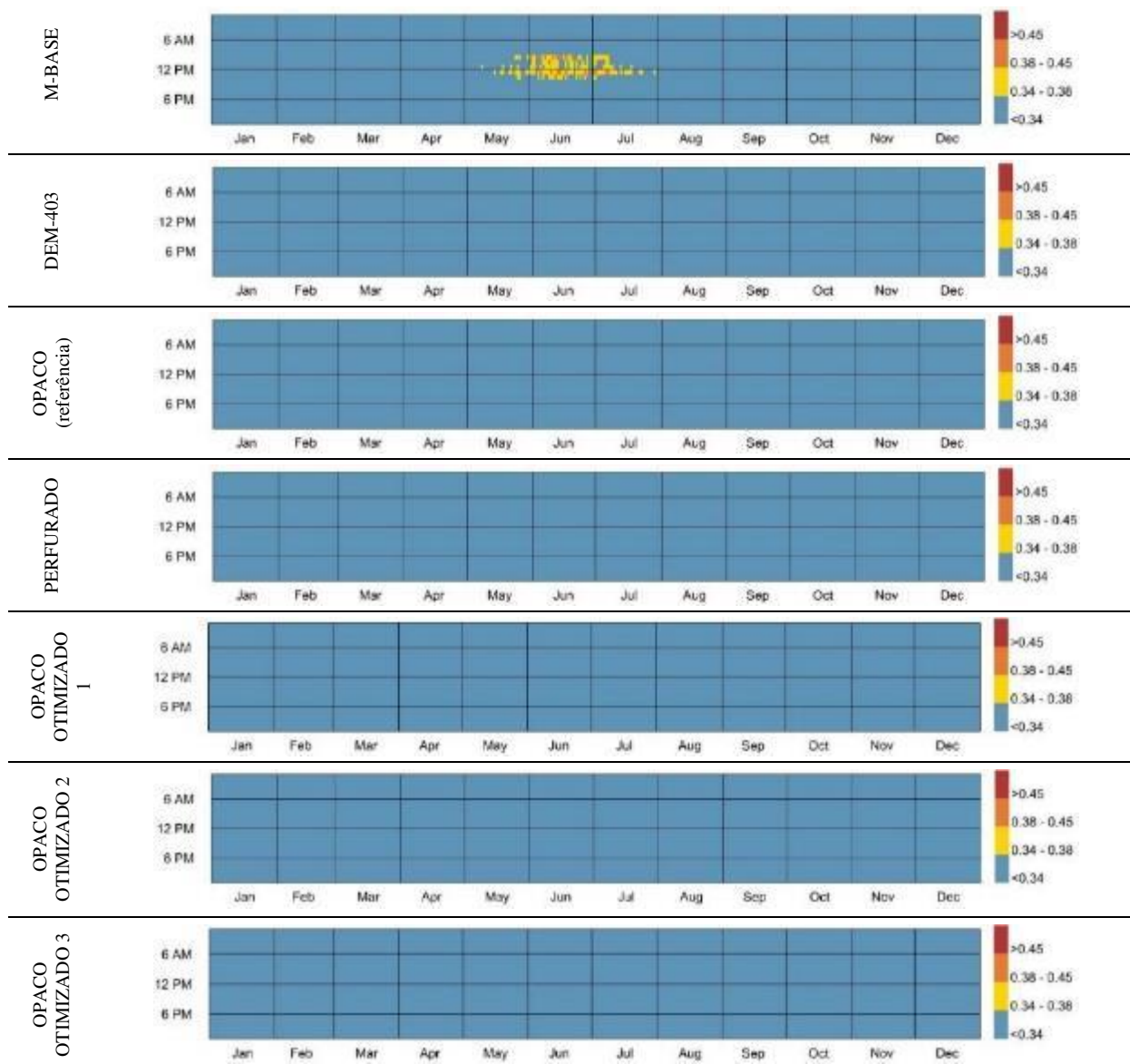
Elemento de controle solar do tipo *brise-soleil*: Ambiente de análise DEM-403

Simulação computacional						
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado						
Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância média (lx)	AvUDI _{<100} (%)	AvUDI _{100-2000lx} (%)	AvUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE	100	914	12,8	36,0	51,2	13,3
DEM-403	100	477	13,0	71,7	15,3	0
OPACO (REFERÊNCIA)	99,1	365	9,3	78,4	12,3	0
PERFURADO	99,2	401	7,8	78,8	13,4	0
OPACO OTIMIZADO 1	96,5	350	11,1	76,6	12,3	0
OPACO OTIMIZADO 2	99,1	361	9,5	78,1	12,4	0
OPACO OTIMIZADO 3	99,1	355	10,3	77,4	12,3	0

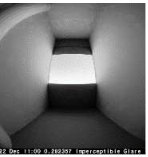
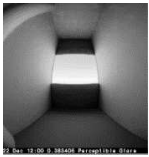
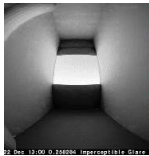
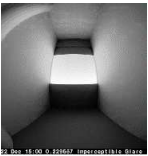
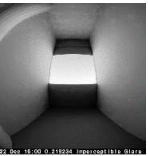
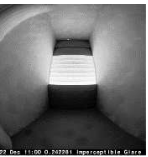
Obs.: M-BASE = Modelo base (sem dispositivo); DEM-403 = Elemento de controle solar – DEM sala 403; OPACO (REFERÊNCIA) = *brise* proposto a partir do modelo já instalado em outras edificações da UFV; PERFURADO = Modelo opaco (referência) microperfurado (taxa de perfuração de 16%).

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – DA, sDA e iluminâncias médias						
Caso de estudo	sDA _{300/50%} (%)	Iluminância (lx)	avUDI _{<100} (%)	avUDI _{100-2000lx} (%)	avUDI _{>2000lx} (%)	ASE _{1000,250} (%)
M-BASE						
DEM-403						
OPACO (referência)						
PERFURADO						
OPACO OTIMIZADO 1						
OPACO OTIMIZADO 2						
OPACO OTIMIZADO 3						

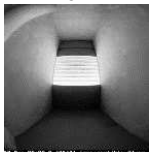
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Anual



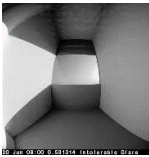
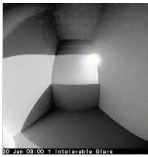
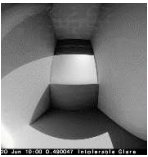
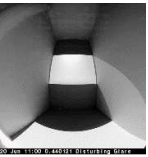
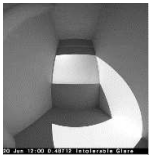
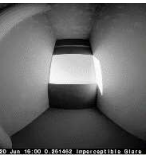
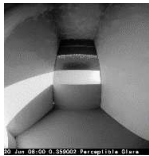
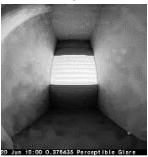
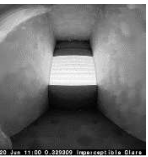
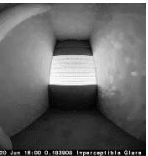
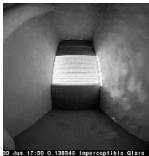
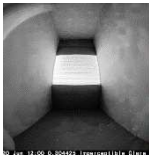
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão.

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,24	 DGP = 0,26	 DGP = 0,26	 DGP = 0,28	 DGP = 0,38
	 DGP = 0,26	 DGP = 0,24	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21
DEM-403	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,24	 DGP = 0,27	 DGP = 0,34
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,25	 DGP = 0,24	 DGP = 0,21	 DGP = 0,19
OPACO (referência)	 DGP = 0,20	 DGP = 0,21	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,28
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,20	 DGP = 0,19	 DGP = 0,18
PERFURADO	 DGP = 0,21	 DGP = 0,22	 DGP = 0,23	 DGP = 0,24	 DGP = 0,29
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,20	 DGP = 0,19	 DGP = 0,18

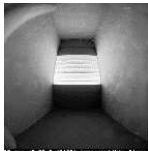
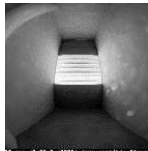
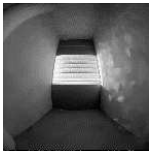
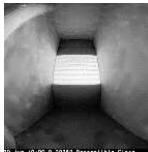
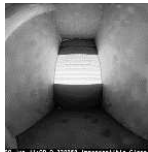
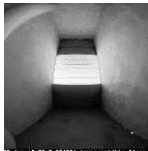
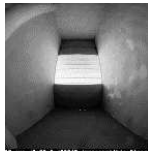
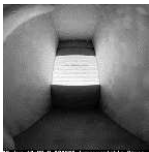
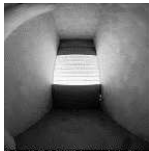
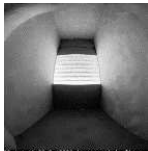
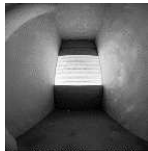
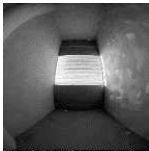
Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Verão. (continuação)

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
OPACO OTIMIZADO 1	 DGP = 0,19	 DGP = 0,20	 DGP = 0,22	 DGP = 0,23	 DGP = 0,26
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,19	 DGP = 0,18	 DGP = 0,16
OPACO OTIMIZADO 2	 DGP = 0,20	 DGP = 0,21	 DGP = 0,22	 DGP = 0,23	 DGP = 0,27
	 DGP = 0,22	 DGP = 0,22	 DGP = 0,20	 DGP = 0,19	 DGP = 0,18
OPACO OTIMIZADO 3	 DGP = 0,20	 DGP = 0,20	 DGP = 0,22	 DGP = 0,24	 DGP = 0,27
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,19	 DGP = 0,19	 DGP = 0,17

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno.

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
M-BASE	 DGP = 0,53	 DGP = 1,00	 DGP = 0,49	 DGP = 0,44	 DGP = 0,49
	 DGP = 0,49	 DGP = 0,46	 DGP = 0,35	 DGP = 0,26	 DGP = 0,19
DEM-403	 DGP = 0,36	 DGP = 0,36	 DGP = 0,32	 DGP = 0,33	 DGP = 0,31
	 DGP = 0,30	 DGP = 0,27	 DGP = 0,24	 DGP = 0,20	 DGP = 0,17
OPACO (referência)	 DGP = 0,35	 DGP = 0,41	 DGP = 0,38	 DGP = 0,33	 DGP = 0,29
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,23	 DGP = 0,21	 DGP = 0,18	 DGP = 0,14
PERFURADO	 DGP = 0,35	 DGP = 0,41	 DGP = 0,39	 DGP = 0,34	 DGP = 0,30
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,23	 DGP = 0,20	 DGP = 0,18	 DGP = 0,14

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Ofuscamento: DGP. Inverno. (continuação)

Caso de estudo	8h	9h	10h	11h	12h
OPACO OTIMIZADO 1	 DGP = 0,32	 DGP = 0,34	 DGP = 0,32	 DGP = 0,29	 DGP = 0,25
	 DGP = 0,22	 DGP = 0,21	 DGP = 0,19	 DGP = 0,17	 DGP = 0,09
OPACO OTIMIZADO 2	 DGP = 0,37	 DGP = 0,41	 DGP = 0,38	 DGP = 0,33	 DGP = 0,28
	 DGP = 0,25	 DGP = 0,23	 DGP = 0,20	 DGP = 0,18	 DGP = 0,14
OPACO OTIMIZADO 3	 DGP = 0,33	 DGP = 0,36	 DGP = 0,34	 DGP = 0,30	 DGP = 0,26
	 DGP = 0,23	 DGP = 0,22	 DGP = 0,20	 DGP = 0,18	 DGP = 0,11

Resultados do desempenho da iluminação natural no ambiente avaliado – Imagens HDR. Verão.
