

ESTUDO PILOTO PARA ANÁLISE DE ELEMENTOS DE CONTROLE SOLAR COM FORMAS COMPLEXAS

Rafael Prado Cartana (1); Fernando Oscar Ruttkay Pereira (2); Adir Mayer (3)

(1) Arquiteto, Doutorando do PosArq UFSC, Professor do Curso de Arquitetura e Urbanismo, cartana@univali.br, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, Laboratório de Conforto Ambiental – LACA – Campus Florianópolis - SC. Rodovia SC 401, 5025. CEP: 88032-005, Tel.: +55 (48) 33322501

(2) Engenheiro Civil, PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ruttkay.pereira@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Laboratório de Conforto Ambiental - LABCON, Campus Florianópolis – SC. CP 470 – CEP: 88040-970, Tel.: +55 (48) 37219550

(3) Estudante de Arquitetura e Urbanismo, UNIVALI – LACA, adirmayer@hotmail.com

RESUMO

Este estudo investiga o desempenho de elementos de controle solar com formas complexas desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. Tais formas complexas foram obtidas através da exploração de diagramas de Voronoi para geração de malhas. Como método, foram realizadas avaliações de admissão da radiação solar, distribuição da luz natural e redução de ofuscamento, empregando simulação computacional e medições em protótipo. Para as modelagens foi empregada a suíte de aplicativos Rhinoceros3D+Grasshopper, para as simulações computacionais foram utilizados os *plug-ins* Diva-for-Rhino e Ladybug. Complementarmente foi empregada fabricação digital para produção de um protótipo utilizado para avaliações de ofuscamento através de fotografias HDR. Como principais resultados, observa-se que o emprego dos elementos de controle solar analisados, contribuiu com o controle da admissão de radiação solar, melhor distribuição da luz natural e redução do ofuscamento nos ambientes de análise. Observa-se em destaque os efeitos da profundidade e inclinação nos elementos de controle analisados, respectivamente à homogeneidade na distribuição da luz natural e seletividade na admissão de radiação solar entre inverno e verão. Os mascaramentos apresentados ao final deste trabalho demonstram que apesar de todo desenvolvimento de ferramentas de modelagem e simulação, a simples compreensão da geometria da insolação segue imprescindível para o adequado desempenho dos elementos de controle solar.

Palavras-chave: elementos de controle solar, geometrias complexas, desempenho térmico e lumínico.

ABSTRACT

This study investigates the performance of complex shapes solar control devices developed with parametric modeling and digital fabrication. These complex shapes were obtained by the use of Voronoi diagrams to generate meshes. As methodology were performed evaluations regarding solar radiation admission, daylight distribution and glare reduction, using computational simulation and measurements in a prototype. For the modeling the digital tools suite Rhinoceros3D+Grasshopper was used. For the computational simulations, the Diva-for-Rhino and Ladybug plug-ins were used. Complementary digital fabrication was used to produce a prototype used for glare evaluations through HDR photographs. As main results the solar control devices contributed to the control of solar radiation admission, daylight better distribution and glare reduction in the analysis indoor environment. The effects of depth and inclination of the control devices analyzed, respectively to the homogeneity in the daylight distribution and selectivity in the admission of solar radiation between winter and summer, are highlighted. The shading masks presented at the end of this paper demonstrates that despite all the development of modeling and simulation tools, the simple understanding of the solar geometry is essential for the adequate performance of the solar control devices.

Keywords: solar control devices, complex geometries, thermal and luminic performance.

1. INTRODUÇÃO

Considerando a importância das edificações no consumo energético total e o fato de que os envelopes construtivos são responsáveis pelas trocas térmicas com o meio, assim como a admissão de luz natural, o desempenho energético dos sistemas de fachadas vem se tornando cada vez mais importante na produção arquitetônica contemporânea (FAJKUS, 2013), situação na qual os elementos de controle solar podem contribuir com o desempenho das edificações, principalmente devido ao aumento das áreas envidraçadas nos edifícios atuais (BADER, 2010; CHO; YOO; KIM, 2014).

Relativamente às questões térmicas, avaliando a aplicação de elementos de controle solar em edifícios residenciais Cho; Yoo e Kim (2014), identificam que de 33% a 40% do consumo energético com climatização é decorrente dos ganhos de calor por radiação através das aberturas, complementarmente, Bader (2010) identifica a possibilidade de redução da radiação incidente na ordem de 75%, considerando configurações de elementos de controle que ainda permitam bom acesso visual aos ambientes externos.

Jakubiec e Reinhart (2011) observam que, os elementos de controle solar podem trazer benefícios ao desempenho lumínico das edificações, contribuindo com uma melhor distribuição da luz natural e redução da probabilidade de desconforto visual. Segundo Reinhart e Wienold (2011), uma avaliação integrada do desempenho lumínico de uma edificação deve considerar: a disponibilidade anual da luz natural, o conforto visual e as cargas térmicas.

Quanto às medidas para avaliação da admissão e distribuição da luz natural, compreende-se a Autonomia da Iluminação Natural (DA) – *Daylight Autonomy* como a porcentagem de horas ocupadas do ano onde um valor mínimo de iluminância, no caso 300lx, é atingido em determinados pontos no ambiente (REINHART; WIENOLD, 2011), como limitação, a medida DA não apresenta limite superior, dificultando a identificação da possibilidade de desconforto por admissão excessiva de luz (NABIL; MARDALJEVIC, 2006). Já a medida UDI - *Useful Daylight Illuminances* se apresenta mais completa, estabelecendo limite inferior de 100lx e superior de 2.000lx para admissão da iluminação natural (REINHART, F; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006), tanto as medidas de DA, quanto de UDI são expressas em porcentagem das horas do ano (%) para cada ponto analisado.

Quanto às análises de conforto visual, as medidas *Daylight Glare Index* (DGI), *Unified Glare Rating* (UGR) e *Daylight Glare Probability* (DGP), quantificam de maneira geral o ofuscamento pelo tamanho, posição e luminância da fonte luminosa em comparação com a luminância média do ambiente (JAKUBIEC; REINHART, 2012). Entre as medidas de ofuscamento existentes, a DGP apresenta-se como a mais precisa (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006; JAKUBIEC; REINHART, 2011), se diferenciando das demais por avaliar o valor da iluminância em um plano vertical nos olhos dos observadores. Tais medidas podem ser obtidas tanto por simulação computacional, quanto por medições através do mapeamento das luminâncias utilizando fotografias HDR (*high dynamic range*), técnica que emprega uma série de fotografias digitais com diferentes exposições para registrar a amplitude das luminâncias em uma cena estática (DOYLE; REINHART, 2010).

Paralelamente às questões de conforto e eficiência energética no ambiente construído, observa-se que o emprego de ferramentas digitais nos processos de projeto e produção se estabeleceu nas últimas décadas como um dos principais direcionadores de exploração na arquitetura contemporânea (CASTLE, 2013). As tecnologias digitais vêm se tornando importantes não apenas para uma representação gráfica mais ágil e precisa, mas também no auxílio das decisões de projeto, através do emprego integrado de recursos como modelagem paramétrica e simulação computacional (DUNN, 2012), facilitando a concepção, representação e avaliação de formas complexas (não ortogonais). A variabilidade de soluções proporcionada pela modelagem paramétrica facilita que sejam avaliadas diversas alternativas de projeto antes da escolha de uma solução definitiva (KOLAREVIC; MALKAWI, 2005), situação onde a simulação computacional pode ser integrada como importante ferramenta de auxílio a tomadas de decisão.

Além das mudanças nos processos de projeto, pode-se observar o impacto do desenvolvimento das ferramentas digitais também nos processos de produção na arquitetura contemporânea (OXMAN, 2006). A apropriação e adaptação de processos de fabricação digital, já empregados na engenharia e design industrial, tem resultado em inovações tecnológicas em uma parte cada vez maior das edificações atuais, possibilitando maior liberdade formal e customização das soluções de projeto (KOLAREVIC, 2003).

2. OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo analisar a transmissão de radiação solar, o desempenho lumínico e a capacidade de redução da probabilidade de ofuscamento de elementos de controle solar com formas complexas, desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital.

3. MÉTODO

A metodologia foi organizada segundo as etapas a seguir: (1) modelagem paramétrica dos elementos de controle solar; (2) simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico; (3) avaliação de ofuscamento por simulação computacional; (4) produção de protótipo por fabricação digital e avaliação de ofuscamento utilizando fotografias HDR (5) análises de mascaramentos gerados por simulação computacional.

3.1. Modelagem paramétrica dos elementos de controle solar

Utilizando a suíte de modelagem paramétrica Rhinoceros3D+Grasshopper foi desenvolvido um elemento de proteção solar, nomeado neste trabalho como Voronoi-01, devido à utilização de um diagrama de Voronoi para a distribuição de suas células. A escolha desta geometria se baseia na ideia de explorar a potencialidade da ferramenta de modelagem utilizada, além de investigar o comportamento de formas complexas como elementos de controle solar.

Visando o estabelecimento das relações de causa e efeito entre a geometria e desempenho dos elementos de controle solar, foram definidos os seguintes parâmetros geométricos de variação entre os modelos: profundidade, espessura e inclinação dos componentes (no caso, das aletas), como apresentado na Figura 1, juntamente com o algoritmo do Grasshopper e resultado final do modelo Voronoi-01.

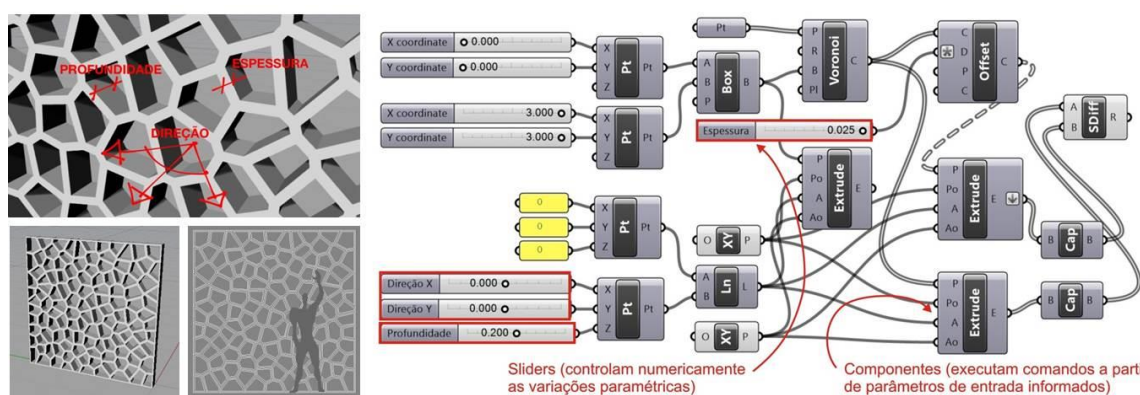


Figura 1: Parâmetros geométricos dos elementos de controle solar, algoritmo do Grasshopper e visualização do modelo Voronoi-01.

Resumidamente, o modelo Voronoi-01 foi gerado através do posicionamento de 123 pontos internamente a um componente *Box* de 3m por 3m, a partir dos pontos foram geradas as células com o componente *Voronoi*, as *sliders* destacadas em vermelho no algoritmo, associadas aos componentes *Extrude* e *Offset*, controlam numericamente as variações dos parâmetros geométricos: profundidade, espessura e inclinação, possibilitando diversas configurações geométricas a partir do modelo Base.

A Figura 2 apresenta os quatro modelos de variações paramétricas desenvolvidos. O modelo (A) Base possui 20 cm de profundidade, 5 cm de espessura nas aletas e não possui inclinação em relação ao plano normal da fachada. A partir do modelo Base foram desenvolvidos os modelos: (B) Inclinação 45°, (C) Profundidade 40 cm e (D) Espessura 2,5 cm.

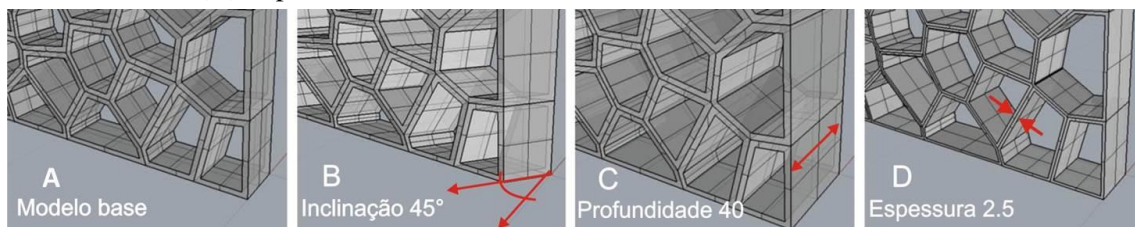


Figura 2: Variações paramétricas do elemento de controle solar Voronoi-01: modelo (A) Base, (B) Inclinação 45°, (C) Profundidade 40 e (D) Espessura 2,5.

3.2. Simulações computacionais referentes à admissão de radiação solar e ao desempenho lumínico

Utilizando o *plug-in* DIVA-for-Rhino foram realizadas simulações computacionais relativas à admissão de radiação solar e luz natural. Em todas as simulações, os elementos de controle solar foram posicionados em uma fachada plana, relativa a um ambiente de 18m², com dimensões como demonstrado na Figura 3. A área de fachada (9m²) foi considerada completamente aberta ao exterior, sem a presença de verga ou peitoril.

O estudo foi realizado para a cidade de Florianópolis-SC (latitude 27°S). Devido à sua maior sensibilidade à admissão de radiação solar, foi escolhida a fachada oeste para realização das simulações, nas quais foi utilizado o arquivo climático BRA_Florianopolis.838990_SWERA.epw, disponível em: <https://energyplus.net/weather>. Como parâmetros de simulação no DIVA-for-Rhino, foram definidas as refletâncias das paredes, pisos e teto em 50%, 20% e 70%, respectivamente. Como material dos elementos de controle solar foi utilizado metal cinza difuso (refletância 50%). O horário de ocupação do ambiente para as análises de iluminação foi das 8 às 18h.

Em relação à radiação solar, foram realizadas simulações para janeiro e julho, escolhidos por corresponderem respectivamente aos meses de maior e menor radiação incidente. Para as análises foi utilizada uma medida comparativa percentual de redução da radiação solar incidente antes e depois da utilização dos elementos de controle solar, denominada neste trabalho como: “Coeficiente de admissão da radiação solar incidente (CRS)” expresso em porcentagem. Visando rejeitar qualquer valor diário atípico, foram utilizados valores mensais cumulativos da radiação incidente em Wh/m².

Devido aos condicionantes climáticos de Florianópolis, foi considerada como critério de eficiência nas análises realizadas, a capacidade seletiva dos elementos em proporcionar a rejeição da radiação nos períodos de verão e admissão nos períodos de inverno.

Para as simulações de admissão da luz natural foram empregadas as medidas: Autonomia da Iluminação Natural (DA300), *Useful Daylight Illuminances* (UDI100-2000) e Fator de Luz Diurna Médio (FLD) do ambiente. As simulações foram realizadas para o período do ano inteiro, aproveitando a capacidade das medidas dinâmicas em caracterizar o comportamento da luz natural ao longo do tempo.

Para as simulações de radiação foi criado um plano vertical de análise afastado internamente 10cm do alinhamento da fachada, com sensores espaçados em 20x20cm. Para as simulações de admissão da luz natural foi criado um plano horizontal de análise à 75cm de altura, com sensores espaçados em 50x50cm (Figura 3).

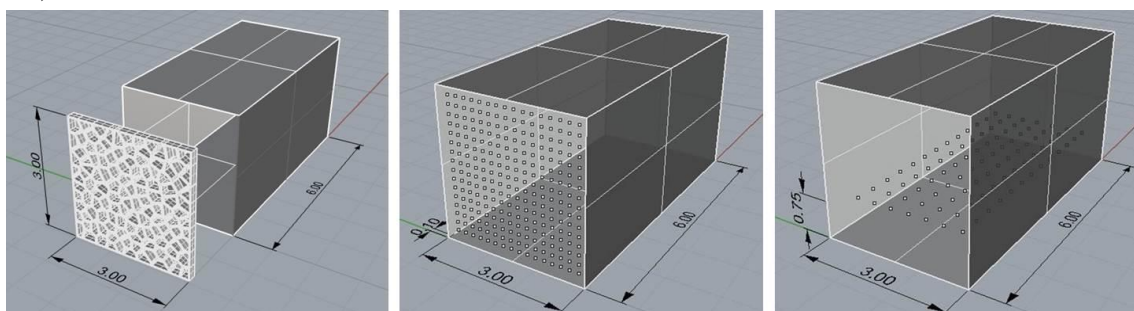


Figura 3: Dimensões dos elementos de controle solar e ambiente de análise. Planos de análise de radiação e iluminação natural.

3.3. Avaliação de ofuscamento por simulação computacional

Nesta etapa foi avaliada a probabilidade de desconforto visual por ofuscamento no ambiente de análise com a aplicação do modelo Base (A) do Voronoi-01. Assim como na etapa anterior, foi utilizado o plug-in DIVA-for-Rhino, possibilitando avaliações dinâmicas (ao longo do ano) ou estáticas (para datas e horários específicos), utilizando a medida DGP *Daylight Glare Probability*.

Para as simulações, a visão do observador foi definida a partir de uma câmera afastada internamente 5m da fachada e direcionada para a abertura, devido a este ser normalmente o ângulo de visão mais crítico quanto à probabilidade de ofuscamento.

Comparativamente, foram procedidos testes com e sem a presença do elemento de controle solar, realizados de forma dinâmica, avaliando o desempenho ao longo do ano e de forma estática, avaliando uma data e horário crítico com entrada direta de sol no ambiente, no caso, dia 10 de janeiro às 15h, escolhido por ser o dia do meio do mês avaliado (janeiro) com maior admissão de radiação solar.

3.4. Produção de protótipo por fabricação digital e avaliação de ofuscamento utilizando fotografias HDR

Complementarmente às análises por simulação computacional, nesta etapa foi produzido através de fabricação digital um protótipo em escala 1/20 do modelo Base, posteriormente utilizado para avaliar a probabilidade de desconforto visual por ofuscamento através da técnica de mapeamento das luminâncias por fotografias HDR. O protótipo foi produzido em plástico PLA, utilizando uma impressora 3D (FDM - Modelagem por Fusão e Deposição) CubePro (3D Systems) disponível no Laboratório de Conforto

Ambiental – LACA – UNIVALI. Para o ambiente de análise foi produzido em MDF um modelo com as paredes brancas, teto branco e piso na cor original do MDF (Figura 4).

Para obtenção das fotografias HDR foi utilizada uma câmera Canon EOS 60D (Figura 4), equipada com uma lente Sigma Circular Fisheye 4.5mm 1:2.8 DC HSM, disponível no Laboratório de Conforto Ambiental – LABCON – UFSC. As imagens foram tratadas no aplicativo Photolux 3.2, fornecendo as medidas de *Daylight Glare Index* (DGI) e *Unified Glare Rating* (UGR), utilizadas nas análises de ofuscamento.

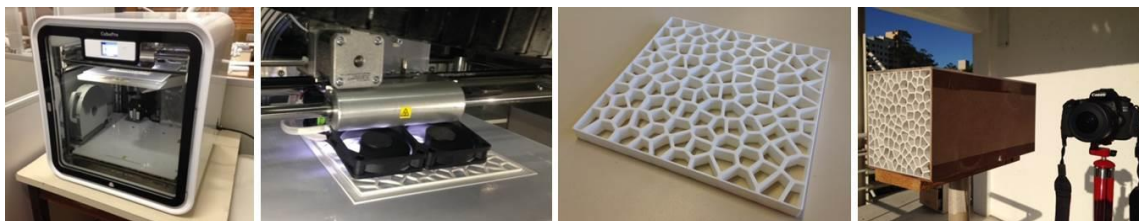


Figura 4: Impressora 3D CubePro, processo de fabricação, protótipo Voronoi-01(A), ambiente de análise e câmera Canon EOS60D.

Foram avaliadas seis situações distintas, separadas em três pares, possibilitando a comparação do conforto visual do ambiente com e sem a presença do elemento de controle solar. O protótipo foi fotografado em um dia de sol e céu claro. Nestas análises não está sendo considerada orientação solar no modelo, as avaliações são feitas apenas em relação à presença ou não de Sol (luz direta) no interior do ambiente. Devido às diferenças apresentadas, as escalas dos mapas de luminâncias foram padronizadas de 20 à 40.000 cd/m².

3.5. Análises de máscaras de sombra geradas por simulação computacional

Visando demonstrar as relações entre a geometria da insolação e os resultados de desempenho apresentados nas etapas anteriores, foi utilizado nesta etapa o plug-in Ladybug, que integrado ao Grasshopper, possibilita a visualização das trajetórias solares ao longo do ano, o mapeamento da radiação solar nas diferentes porções de céu visível e a geração de máscaras de sombra a partir de um ponto específico. Os pontos para geração das máscaras foram posicionados alinhados à face inferior e centralizados verticalmente em relação às células dos elementos de controle solar analisados (Figura 5).

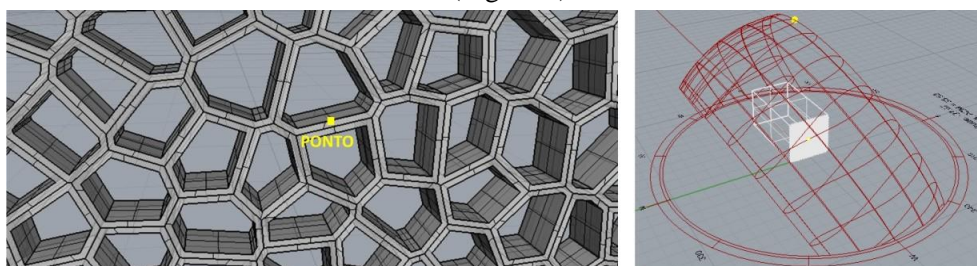


Figura 5: Posicionamento do ponto para geração do mascaramento e trajetórias solares geradas no Ladybug.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Quanto aos resultados das simulações de radiação solar, pode-se observar na Tabela 1 e Figura 6, o efeito das variações paramétricas para os diferentes modelos e épocas do ano. Como esperado, a menor profundidade e espessura apresentadas no modelo D resultaram nas maiores admissões de radiação do grupo simulado, enquanto as maiores espessuras e profundidades dos modelos A e C resultaram na redução destes valores.

Quanto à seletividade da radiação entre inverno e verão, o modelo B (com inclinação em relação ao plano normal da fachada) foi o único que apresentou esta propriedade. Para quantificar a capacidade seletiva dos elementos, foi dividido o CRS de janeiro, pelo de julho. Como resultado, quanto menor o valor obtido, maior é a capacidade do elemento de rejeitar a radiação no verão e admitir no inverno.

Tabela 1: Radiação solar incidente, Coeficiente de admissão de radiação (CRS) e Razão entre Janeiro e Julho

	Sem obstr.	(A) Mod. Base	(B) Inclín. 45°	(C) Prof. 40	(D) Esp. 2.5
Radiação (Kwh/m²)					
Janeiro	75,48	25,52	14,98	14,69	34,56
Julho	45,42	11,06	15,71	5,82	16,19
Coefic. adm. rad. solar CRS (%)					
Janeiro		33,81	19,85	19,46	45,79
Julho		26,01	36,95	13,69	38,08
Razão entre Janeiro e Julho		1,30	0,54	1,42	1,20

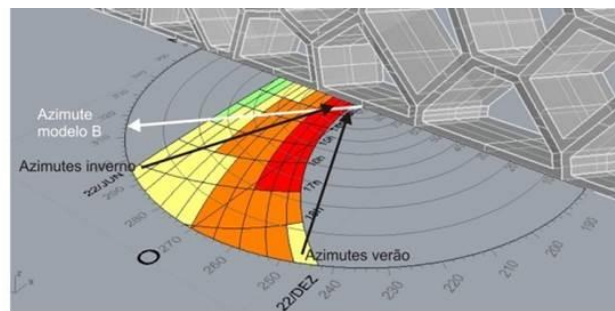
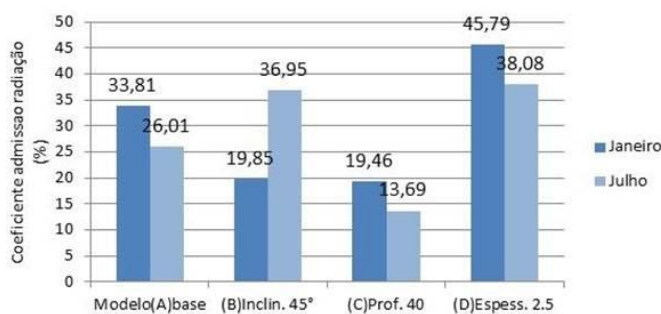


Figura 6: Gráfico comparativo dos coeficientes de admissão de radiação para os meses de janeiro e julho. Análise de insolação para o modelo B, carta solar para latitude 27°S, relação entre os azimutes de inverno e verão.

Como pode ser observado na Figura 6, o comportamento do modelo B demonstra a importância da compreensão da geometria da insolação na concepção dos elementos de controle solar, no caso, o efeito dos diferentes azimutes entre inverno e verão. A inclinação para noroeste (azimute 315°) do modelo B favorece a admissão de radiação durante o inverno, e sua rejeição durante o verão, ajudando no condicionamento passivo do ambiente em análise.

Como resultado das simulações de admissão de luz natural, primeiramente observa-se que o ambiente sem obstrução apresentou elevados níveis de FLD e DA médios, indicando excesso de admissão de luz na região próxima à fachada, o que se comprova pelo baixo valor médio do UDI (58,75%) apresentado na Tabela 2 e grande variação na distribuição espacial do UDI, (Figura 7, parte 1).

Em todos os casos avaliados, a presença dos elementos de controle solar proporcionou redução dos valores de DA e uma distribuição espacial mais homogênea dos valores de UDI, com destaque para o modelo C (profundidade 40cm) que apresentou valor médio de UDI em 88,14%, demonstrando a ação dos elementos de controle solar como “prateleiras de luz”, reduzindo a admissão excessiva próximo à fachada e conduzindo a luz para a região mais profunda do ambiente. Cabe também observar na Figura 7 a distribuição da iluminação (DA e UDI) assimétrica no modelo B (inclinado) em função de sua geometria.

Tabela 2: Fator de Luz Diurna Médio (FLD), Autonomia da Iluminação Natural Média (DA300) e *Useful Daylight Illuminances* Médio (UDI100-2000).

	Sem obstrução	(A) Mod. base	(B) Incl. 45°	(C) Prof. 40	(D) Esp.2,5
Fator de Luz Diurna Médio - FLD (%)	10,00	2,10	1,50	1,00	3,10
Autonomia da Luz Natural Média - DA (%)	93,89	68,04	55,34	41,08	81,69
<i>Useful Daylight Illuminances</i> Médio - UDI (%)	58,75	85,62	76,42	88,14	80,40

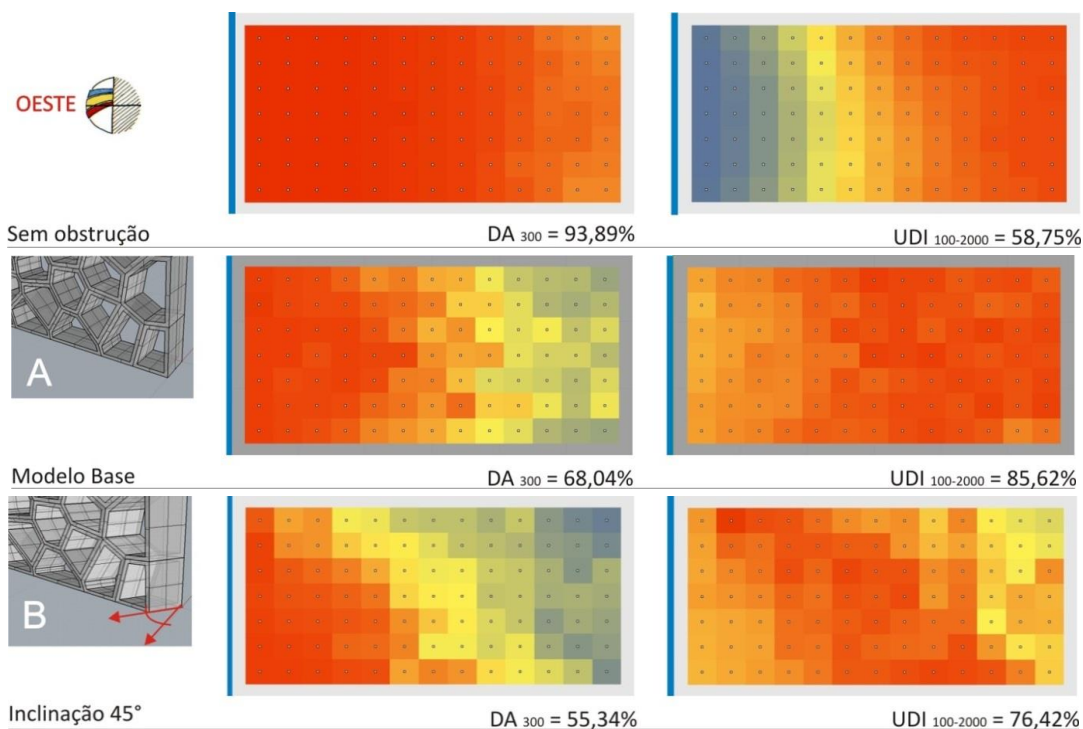


Figura 7 (parte 1): Modelos analisados: Autonomia da Iluminação Natural (DA300) e *Useful Daylight Illuminances* (UDI100-2000).

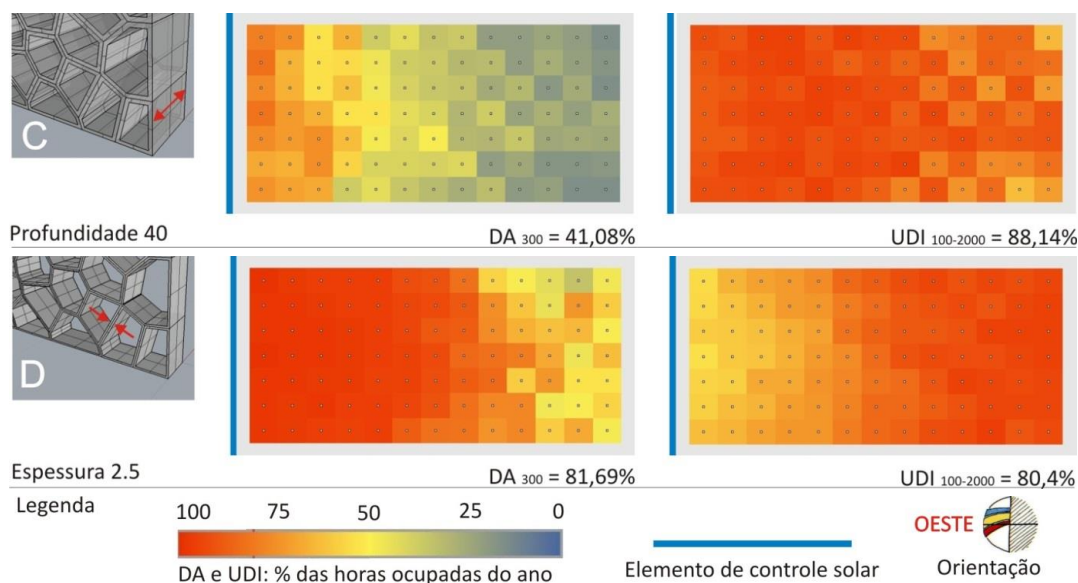


Figura 7 (parte 2): Modelos analisados: Autonomia da Iluminação Natural (DA300) e *Useful Daylight Illuminances* (UDI100-2000).

Quanto às avaliações de conforto visual por simulação, pode-se verificar que o elemento de controle proporcionou uma redução na probabilidade de ofuscamento tanto para a avaliação dinâmica, ao longo do ano (Figura 8), quanto para a avaliação estática, para data e horário específico (Figura 9).

Para a avaliação dinâmica, o ambiente de análise sem a presença do elemento de controle solar apresentou ofuscamento perturbador ou intolerável ($DGP \geq 0,4$) em 25,6% das horas do ano, com a presença do elemento de controle solar este valor caiu para 8,3% das horas do ano, o resultado gráfico destes valores pode ser observado nas imagens (a) e (b) da Figura 8. Cabe também observar a coerência na relação entre a geometria da insolação e a análise de DGP anual, na qual as situações críticas ocorrem no verão e nos períodos da tarde, situação onde a luz direta do sol atinge mais intensamente o interior do ambiente.

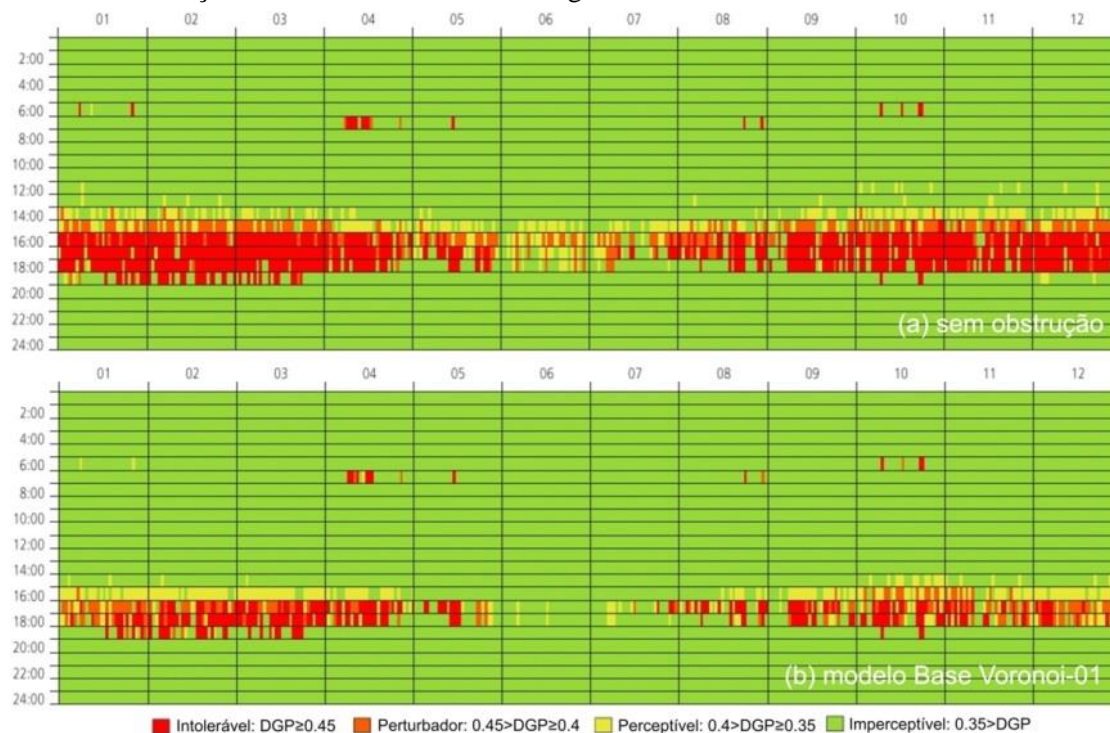


Figura 8: Avaliação da probabilidade de ofuscamento ao longo do ano (DGP) para o ambiente sem obstrução (a) e com o modelo Base Voronoi-01 (b). Eixo X: meses do ano. Eixo Y: horas do dia. Escala de ofuscamento. Fonte: Jakubiec e Reinhart (2010).

Confirmando os resultados da avaliação dinâmica, na avaliação estática (10 de janeiro às 15h) os valores de DGP variaram de 0.39 (perceptível) sem a presença do elemento de controle, para 0.29 (imperceptível) com a presença do elemento de controle. Podendo ser observado na Figura 09.

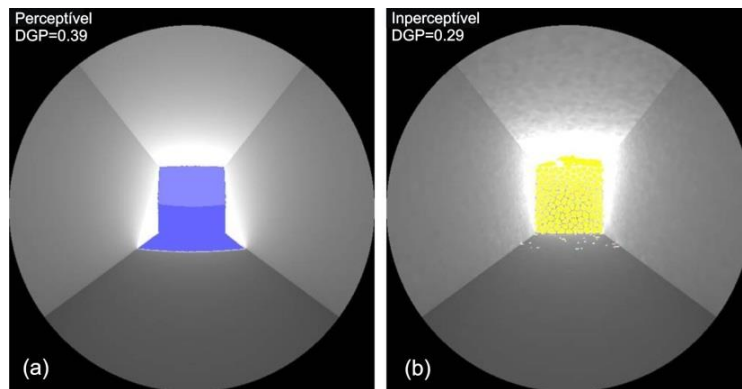


Figura 9: Avaliação da probabilidade de ofuscamento (DGP) para o dia 10 de janeiro às 15h, para o ambiente de sem obstrução (a) e com o modelo Base Voronoi-01 (b).

A Figura 10 apresenta os resultados das fotografias HDR complementarmente utilizadas para avaliação de ofuscamento para cada uma das seis situações avaliadas, organizadas em pares, como descrito na metodologia. Na situação do par (1-2) o elemento de controle apenas minimiza a entrada de sol no ambiente, na situação do par (3-4) não há sol incidindo sobre a fachada e na situação do par (5-6) o elemento de controle impede completamente a entrada de sol no ambiente. Sintetizando as os resultados obtidos através do tratamento das imagens HDR no aplicativo Photolux, a Tabela 3 apresenta comparativamente as medidas e índices: Iluminância média (lux), Luminâncias (cd/m²), *Unified Glare Rating* (UGR) e *Daylight Glare Index* (DGI).

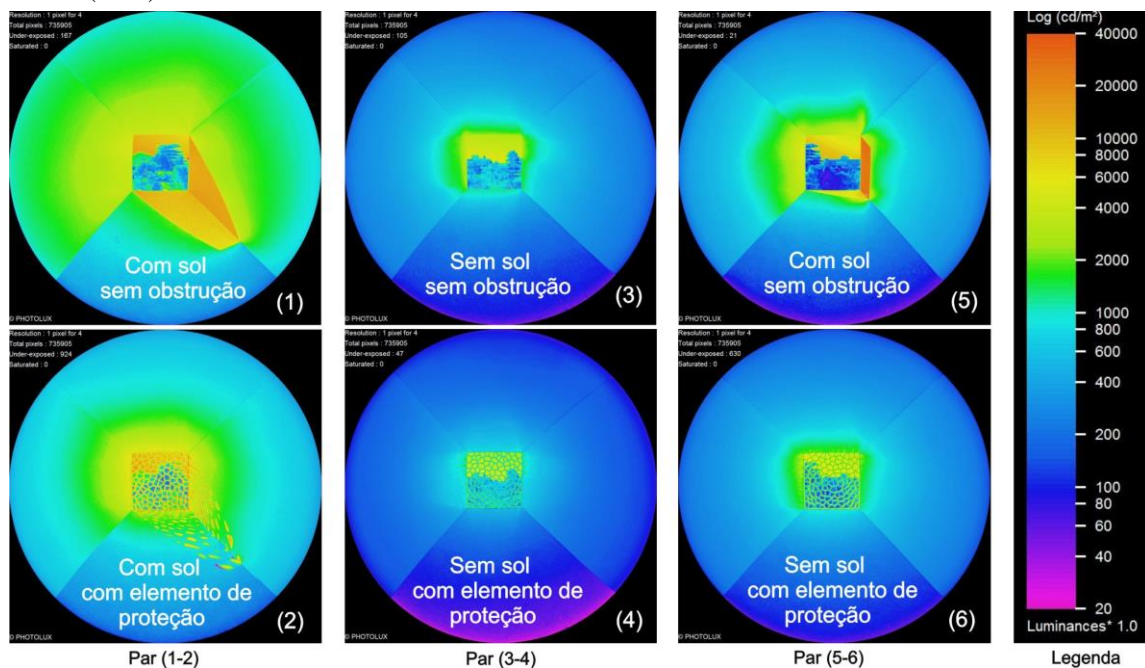


Figura 10: Imagens HDR e escala de Luminâncias das situações e elementos de controle solar avaliados.

Tabela 3: Valores obtidos para avaliação de ofuscamento por técnica HDR. Medidas de iluminação: Iluminância média (lux), Luminâncias (cd/m²). Mediadas de ofuscamento: UGR e DGI. Escala de cores indicando classificação de desconforto por ofuscamento. Fonte: Doyle e Reinhart (2010).

Situações avaliadas	Iluminância Média (lux)	Luminância Mínima (cd/m ²)	Luminância Máxima (cd/m ²)	Luminância Média (cd/m ²)	UGR	DGI
(1) Sem obstrução (com entrada sol)	10.700	110	17.000	2.230	28,9	33,6
(2) Voronoi-01 (com entrada sol)	6.800	79	79.000	1.340	28,4	33,1
(3) Sem obstrução (sem entrada sol)	2.260	38	6.500	450	24,9	30,5
(4) Voronoi-01 (sem entrada sol)	1.360	19	6.400	266	24	29,4
(5) Sem obstrução (com entrada sol)	4.400	59	17.000	870	28,5	33,2
(6) Voronoi-01 (sem entrada sol)	2.360	37	21.100	460	25	29,9

UGR: ■ Perturbador >28 ■ Incomodo 22-28 ■ Perceptível 13-22 ■ Imperceptível <13

DGI: ■ Perturbador >31 ■ Incomodo 24-31 ■ Perceptível 18-24 ■ Imperceptível <18

A redução nos valores de iluminâncias e luminâncias médias de acordo com presença dos elementos de controle solar indica confiabilidade no emprego de fotografias HDR para representar o fenômeno da admissão e distribuição da luz no ambiente de análise. Pode ser observado na Tabela 3 que os casos (2), (4) e (6) apresentam menores valores que seus pares (1), (3) e (5) que não possuem elementos de controle solar.

Em relação ao conforto visual avaliado pelas medidas UGR e DGI, a presença dos elementos de controle solar resultou em redução da probabilidade de ofuscamento nos três pares de casos analisados. Destaca-se a maior redução no caso (5-6) onde o elemento obstrui completamente a entrada direta de Sol no ambiente, resultando em uma distribuição mais homogênea da luz natural admitida.

Complementarmente a todos os demais resultados, a Figura 11 apresenta as máscaras de sombra para os modelos A, B e C para orientação oeste, geradas com o *plug-in* Ladybug. Além das máscaras, são apresentados os mapeamentos da radiação solar total (direta, somada à difusa) sobreposta às trajetórias solares para os meses de janeiro e julho, facilitando a compreensão do comportamento dos elementos de controle solar em função de sua geometria e consequente acesso a diferentes porções de céu visível.

Como resultados, observa-se comparativamente que os modelos A e B, com 20cm de profundidade, apresentam uma área de céu visível semelhante, entretanto, o modelo A (perpendicular à fachada oeste) encontra-se mais voltado para os azimutes de verão, admitindo percentualmente mais radiação nesta época do ano (razão janeiro/julho=1,3), enquanto a inclinação do modelo B, favorece a admissão de radiação no inverno (razão janeiro/julho=0,54).

O modelo C, com 40cm de profundidade apresentou um mascaramento mais “fechado” que os demais, o que lhe conferiu o menor DA médio (41,08%) e FLD médio (1%) entre o grupo avaliado, entretanto, como anteriormente referido, o modelo C apresentou o melhor UDI médio (88,14%) entre o grupo avaliado, indicando a efetividade da profundidade dos elementos de controle solar para uma distribuição mais homogênea da luz natural nos ambientes.

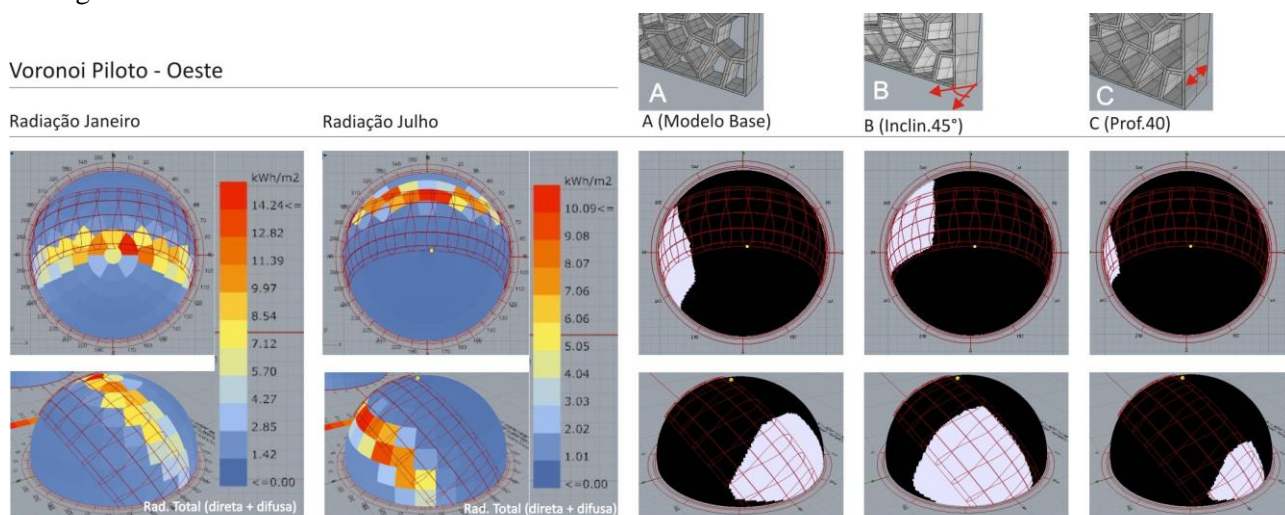


Figura 11 – Ladybug: trajetórias solares com mapeamento da radiação solar nas diferentes porções de céu e máscaras de sombra para orientação oeste, modelos A, B e C.

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a transmissão de radiação solar, o desempenho lumínico e a capacidade de redução da probabilidade de ofuscamento de elementos de controle solar com formas complexas, desenvolvidos com modelagem paramétrica e fabricação digital. Como método, foram realizadas avaliações através de simulação computacional e medições em protótipo.

Como principais conclusões deste estudo, destacam-se os itens a seguir. Relativamente à admissão seletiva da radiação solar, os resultados demonstram a eficácia na utilização de elementos inclinados visando admitir radiação nos períodos de inverno e rejeitar no verão, considerando a orientação solar oeste. Entretanto, cabe observar que os elementos inclinados, apesar de possuírem capacidade seletiva da admissão da radiação, acabaram por distribuir a luz natural de forma assimétrica no ambiente de análise.

Em relação ao ambiente de análise com orientação solar oeste, utilizado nas simulações, quando sem elementos de proteção, apresentou excesso na admissão de radiação solar e distribuição heterogênea da luz natural. Em todos os casos, o emprego dos elementos de controle solar, além de reduzir a radiação admitida,

proporcionou uma melhor distribuição da luz natural, principalmente reduzindo a incidência excessiva na região próxima à fachada, o que pode ser verificado pela distribuição espacial dos valores de UDI.

Em relação às avaliações de conforto visual, os valores de DGP obtidos nas simulações computacionais, demonstram tanto na análise dinâmica, quanto na análise estática, que a presença dos elementos de controle solar reduziu a probabilidade de desconforto por ofuscamento. Os resultados das avaliações de ofuscamento utilizando fotografias HDR reforçam os resultados obtidos por simulação, nos quais a presença dos elementos de controle solar, em comparação às aberturas desobstruídas, reduziu a probabilidade de ofuscamento, registrada pelas medidas UGR e DGI empregadas. Confirmando as informações presentes na revisão bibliográfica quanto à precisão das medidas de ofuscamento, a medida DGP apresentou maior sensibilidade em relação às medidas UGR e DGI na caracterização do fenômeno de redução da probabilidade de desconforto visual por ofuscamento.

Por fim, os resultados dos mascaramentos demonstram que, juntamente às tecnologias computacionais de projeto e às simulações disponíveis para análises de desempenho de elementos de controle solar com formas complexas, a compreensão da geometria da insolação apresenta-se imprescindível para uma admissão seletiva de radiação solar e melhor distribuição da luz natural nos ambientes internos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADER, S. **High-performance façades for commercial buildings**. Austin, Texas: The University of Texas at Austin - School of Architecture, 2010.
- CASTLE, H. Editorial - Computation Works: The Building of Algorithmic Thought. **Architectural Design**, v. 83, n. 2, p. 5–5, 2013.
- CHO, J.; YOO, C.; KIM, Y. Viability of exterior shading devices for high-rise residential buildings : Case study for cooling energy saving and economic feasibility analysis. **Energy & Buildings**, v. 82, p. 771–785, 2014.
- DUNN, N. **Digital Fabrication in Architecture**. London: Laurence King Publishing, 2012.
- DOYLE, S.; REINHART, C. **High Dynamic Range Imaging & Glare Analysis: I Definitions**, 2010. Disponível em: <http://www.gsd.harvard.edu/research/gsd-square/Publications/HDR_I_Definitions.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2014.
- FAJKUS, M. **Superficial skins? Super Skins? Shading structures and thermal impact analysis**. In: Proceedings Advanced Building Skins - Energy Forum. p. 23-27. Bressanone, Italy: 2013.
- JAKUBIEC, A.; REINHART, C. **The Use of Glare Metrics in the Design of Daylit Spaces : Recommendations for Practice. 2010**. Disponível em: <http://www.gsd.harvard.edu/research/gsd-square/Publications/2010RadianceWorkshop_GlareIndices.pdf>. Acesso em: 1 maio. 2015.
- JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. **The "Adaptive Zone"- A Concept for Assessing Glare Throughout Daylit Spaces**. In: Proceedings of Building Simulation 2011. p. 2178-2185. Sydney, Australia: 2011.
- JAKUBIEC, J.; REINHART, C. The “adaptive zone” - A concept for assessing discomfort glare throughout daylit spaces. **Lighting Research and Technology**, v. 44, n. 2, p. 149–170, 2012.
- KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age Design and Manufacturing**. 1. ed. New York: Spoon Press, 2003.
- KOLAREVIC, B.; MALKAWI, A. **Performative Architecture beyond Instrumentality**. New York: Spoon Press, 2005.
- NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 905–913, 2006.
- OXMAN, R. Theory and design in the first digital age. **Design Studies**, v. 27, p. 229–265, 2006.
- REINHART, C. F.; WIENOLD, J. The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylit spaces. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 386–396, 2011.
- REINHART, F. C.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **LEUKOS VOL 3 NO 1**, p. 7–31, 2006.
- WIENOLD, J.; CHRISTOFFERSEN, J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 743–757, 2006.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESC – Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina, pelos recursos financeiros aplicados no desenvolvimento e divulgação deste trabalho. Assim como à Universidade Federal de Santa Catarina UFSC e à Universidade do Vale do Itajaí UNIVALI, pelos materiais e equipamentos disponibilizados.