UMA NOVA ABORDAGEM PARA A ANÁLISE DO POTENCIAL LUMINOSO DE ELEMENTOS DE CONTROLE DA INSOLAÇÃO POR REDIRECIONAMENTO DA RADIAÇÃO

Jéssica Müller Carvalho (1); Fernando Oscar Ruttkay Pereira (2); Anderson Claro (3)
(1) Arquiteta, Mestre em Arquitetura e Urbanismo, jmullercarvalho@gmail.com
(2) Engenheiro Civil, PhD, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ruttkay.pereira@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 9797
(3) Arquiteto, Dr, Professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, claro.ander@gmail.com
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental, Cx Postal 476, Florianópolis - SC, 88040-900, Tel.: (48) 3721 9797

RESUMO
Para atingir um desempenho equilibrado frente ao ambiente térmico e luminoso, o elemento de controle da insolação precisa ser capaz de reduzir o ganho de calor, interceptando a radiação solar incidente, e redirecionar parte dessa radiação interceptada para iluminar o interior do ambiente. As ferramentas de análise disponíveis não oferecem parâmetros adequados para desconstruir o fenômeno físico que ocorre nas superfícies desses elementos, capaz de modificar a natureza direcional da radiação solar incidente ao ponto de contribuir com o ambiente luminoso. Neste contexto, o artigo apresenta um método para análise do potencial luminoso de elementos de controle da insolação por redirecionamento da radiação, capaz de representar espacial e numericamente seu potencial de interceptar e redirecionar a radiação solar. Para tanto, são propostos dois novos indicadores: o Coeficiente de Radiosidade Ponderado (CRP) e o Potencial Luminoso por Redirecionamento (PLR). Os resultados obtidos demonstram que, dependendo da configuração de sua geometria, os elementos de controle da insolação são capazes de bloquear uma porcentagem similar da radiação solar, porém, apresentar diferente aproveitamento da energia luminosa incidente em sua superfície para iluminar o plano de trabalho. O método desenvolvido contribui com uma nova abordagem para a análise sobre o potencial luminoso dos elementos de controle da insolação por redirecionamento da radiação e demonstrou aplicabilidade para superfícies planas e curvas.

Palavras-chave: iluminação natural, elemento de controle da insolação, potencial luminoso, redirecionamento da radiação solar.

ABSTRACT
To achieve a balance between the thermal and luminous performance, the solar control device needs to reduce the solar heat gain, intercepting the direct solar radiation, and redirecting some of this solar radiation to illuminate the interior space. The analysis tools available do not offer suitable parameters to deconstruct the physical phenomenon occurring on the device's surface, which is capable of modifying the incident direction of solar radiation enough to contribute to the luminous performance. In light of this, the following research present a method for analyzing the luminous potential of solar control devices by radiation redirection, capable of spatially and numerically representing their potential to intercept and redirect the solar radiation. Therefore, two new metrics have been proposed: Weighted Radiosity Coefficient (WRC) and Luminous Redirection Potential (LRP). The results indicate that, depending on the geometric configuration, the solar control devices are able to block a similar percentage of the solar radiation, however, they may present different use of the incident light on its surface to illuminate the work plane. The presented method contributed to a new approach for analyzing the luminous potential of solar control devices by radiation redirection and proved applicability for flat and curved surface geometries.

Keywords: daylight, solar control devices, luminous potential, solar radiation redirection.

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização de planos envidraçados aplicados às fachadas dos edifícios amplia os cuidados necessários para fornecer proteção contra os ganhos solares excessivos através das aberturas e os elementos de controle da insolação passam a exercer um papel fundamental. Quando as fachadas passam a funcionar em grande parte como abertura, cresce o espaço para a utilização dos elementos de controle aplicados como princípio de pele do edifício, instigando a utilização de elementos cada vez mais complexos para cobrir as fachadas e com maior responsabilidade sobre o comportamento térmico e luminoso da edificação.

Os elementos de controle da insolação devem cumprir com tantas funções quanto as da abertura em si, tais como: controlar o ganho de calor, prover iluminação natural, permitir a visibilidade do exterior, possibilitar a renovação do ar interno e oferecer proteção contra intempéries (PEREIRA, 1992). Para atingir um desempenho equilibrado frente ao ambiente térmico e luminoso, o elemento externo de controle da insolação precisa ser capaz de: a) reduzir o ganho de calor solar interceptando a radiação solar incidente nos períodos adequados e; b) redirecionar parte dessa radiação interceptada em forma de luz ao interior do ambiente para contribuir na geração de iluminâncias satisfatórias, evitando a ocorrência de ofuscamento para o usuário que busca visão ao exterior. Tal condição é conhecida como o "comportamento seletivo" dos elementos de controle.

Pereira (1992) demonstrou que os elementos de controle da insolação podem melhorar a iluminação natural do ambiente com um pequeno aumento no ganho de calor. Ao interceptar a radiação solar direta por meio de uma superfície, os elementos de controle da insolação possibilitam o seu redirecionamento e a admissão de parte do fluxo luminoso refletido para o ambiente interno, sendo capazes de controlar simultaneamente a carga térmica e a admissão de luz natural no ambiente. Dessa forma, os elementos de controle da insolação podem contribuir com a melhor distribuição espacial da luz natural e a redução da probabilidade de desconforto visual, melhorando as condições de iluminação interna e garantindo a redução do ganho de calor solar (REINHART, 2014; OLGYAY e OLGYAY, 1957).

Diversos estudos já realizados tratam de esclarecer como a geometria de um elemento de controle da insolação é capaz de modificar a natureza direcional da radiação direta incidente para contribuir na admissão da radiação indireta (FELIPPE, 2016; BOGO, 2007; GONZÁLEZ e FIORITO, 2015). Entretanto, os estudos de iluminação utilizam como referência resultados obtidos sobre planos de análise (horizontais ou verticais) e oferecem poucos recursos capazes de direcionar a concepção desses elementos visando o equilíbrio na relação entre o ganho de calor e a admissão de luz natural. As análises de transmitância bidirecional, por exemplo, costumam tratar o sistema como uma caixa preta, ignorando fenômenos de troca radiante internos aos elementos. Por consequência, as buscas por soluções mais satisfatórias acabam ocorrendo de forma limitada, por meio de tentativa e erro.

No geral, os estudos de iluminação costumam ser orientados a fornecer informações exaustivas da eficácia das alternativas e, como colocado por Aroztegui (1981), perdem sua relação direta com o projetista, tornando-se elementos orientados à verificação mais do que de ajuda ao processo de projeto. É importante estabelecer uma percepção direta das decisões de projeto sobre seu desempenho, isto é, o uso de critérios que orientem na concepção da forma e tragam maior domínio da relação de causa e efeito, possibilitando a obtenção de respostas diretas sobre o potencial de desempenho obtido.

Sabe-se que o comportamento de um elemento frente à radiação solar depende, principalmente, de características geométricas e das propriedades físicas de seus materiais. Além disso, para que um elemento participe da troca de radiação com o interior, ele precisa estar exposto às fontes externas de radiação solar e, ao mesmo tempo, ser "visto" pelas superfícies internas do ambiente. A radiação solar direta possui elevada intensidade e, quando incidente em uma pequena área, se for adequadamente difundida, pode iluminar uma área significativamente maior, satisfazendo as necessidades visuais de atividades que requeiram radiação luminosa com menor intensidade.

De acordo com Moore (1991), considerando que a iluminância máxima de uma superfície é atingida quando sua normal coincide com a direção de incidência da fonte e o seu tamanho aparente em relação ao alvo é maximizado quando a superfície se encontra perpendicular à normal do alvo, a situação ideal para a superfície fornecer máxima iluminância ao alvo será a combinação entre as duas condições. Portanto, para que o elemento de controle redirecione o máximo de energia das fontes primárias para um plano de análise (alvo), é necessário que as superfícies refletoras estabeleçam um equilíbrio nas condições de exposição em relação à fonte e ao alvo.

Considerando que o elemento de controle da insolação ideal pode ser definido como aquele que bloqueia a incidência direta do Sol e aproveita o máximo possível dessa energia interceptada para iluminar o ambiente, o presente artigo trata de apresentar uma nova abordagem que investigue essa condição, aqui chamada de "potencial luminoso por redirecionamento".

2. OBJETIVO

Este artigo tem por objetivo apresentar um método para análise do potencial luminoso de elementos de controle da insolação capaz de representar espacial e numericamente sua capacidade de interceptação e redirecionamento da radiação solar.

3. MÉTODO

Nesta seção estão descritos os conceitos e métodos adotados para a análise do potencial luminoso de elementos de controle da insolação por redirecionamento da radiação frente ao ambiente térmico e lumínico por meio de simulações computacionais. O programa Apolux IV (CLARO, 2020) foi adotado para a simulação computacional considerando a possibilidade de adaptação do programa para atender às necessidades específicas desta pesquisa, conforme detalhado ao longo desta seção.

Para a análise do comportamento das superfícies dos elementos de controle da insolação foram propostos dois novos indicadores, denominados de Coeficiente de Radiosidade Ponderado (CRP) e Potencial Luminoso por Redirecionamento (PLR). A análise do ganho de calor considerou especificamente a admissão do fluxo radiante incidente no plano da abertura por meio do Fator Solar Equivalente (FSE) (FELIPPE, 2016). Para o comportamento luminoso, foram analisadas a admissão e a distribuição do fluxo luminoso por meio da Exposição Luminosa Anual (ELA) (*Annual Light Exposure*) e do indicador de Uniformidade de Distribuição (UD) sobre o plano de trabalho. A Tabela 1 sintetiza os critérios de desempenho adotados e os parâmetros utilizados por plano de referência para as simulações computacionais.

Tabela 1 - Critérios de desempenho e parâmetros de avaliação utilizados.

Critérios de desempenho	**Parâmetros de avaliação**	**Plano de referência**
Potencial luminoso por redirecionamento	CRP e PLR	Elemento de controle da insolação
Ganho de calor	FSE	Plano da abertura
Admissão e distribuição do fluxo luminoso	ELA e UD	Plano de trabalho

3.1. Análise do potencial luminoso por redirecionamento da radiação

O potencial luminoso por redirecionamento da radiação de uma superfície depende de suas condições de exposição em relação às fontes de radiação e em relação ao alvo. O método desenvolvido representa numericamente o potencial de quanto um elemento de controle da insolação pode receber de radiação direta do Sol e difusa do céu e quanto dessa radiação pode ser redirecionada para um plano de análise.

As condições de exposição do elemento de controle da insolação ao plano de trabalho (alvo) foram analisadas por meio do Coeficiente de Radiosidade (CR), proposto por Claro (2015) e de uso exclusivo pelo programa Apolux IV, que representa a razão entre a iluminância inicial de um vértice de uma superfície exposta à luz direta do Sol e difusa do céu pela iluminância redirecionada que atinge um vértice do plano de análise, permitindo identificar a contribuição de cada vértice com as condições finais de iluminação do plano de análise. A distribuição final do fluxo luminoso depende, ainda, de quanto cada vértice poderá receber de luz das fontes externas de radiação, aqui consideradas como a luz direta do Sol e a luz difusa do céu, que foram analisadas por meio da porcentagem de visibilidade do céu (VisCéu) e da porcentagem de horas de incidência direta do Sol (HorSol).

A Figura 1 ilustra de forma esquemática os indicadores adotados para representar as condições de exposição dos elementos de controle da insolação às fontes de radiação (Sol e céu) e ao alvo (plano de análise). O VisCéu representa a porção visível do céu, o HorSol representa a porcentagem de horas de incidência direta do Sol e o CR representa o fluxo luminoso que parte do elemento de controle e atinge o plano de análise.

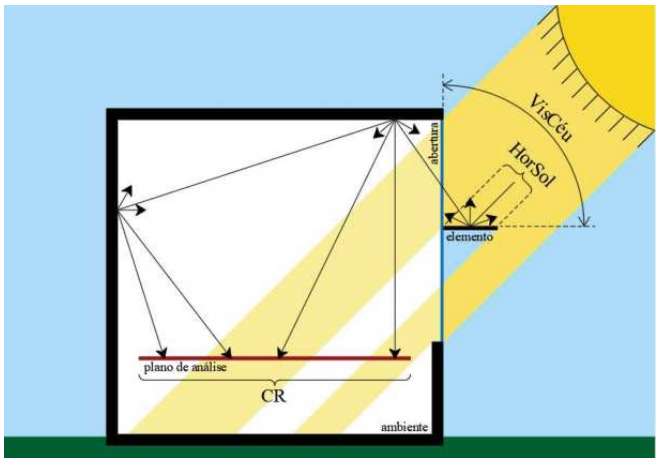

Figura 1 - Representação esquemática do procedimento de análise do potencial luminoso por redirecionamento.

Para representar numérica e espacialmente a combinação de ambas as condições de exposição (fonte e alvo), foi proposto o Coeficiente de Radiosidade Ponderado (CRP), calculado de forma individual para a condição de exposição ao céu e a condição de exposição ao sol, sendo denominados de CRP_c e CRP_s, de acordo com a Equação 1 e a Equação 2 para cada vértice da superfície.

$$CRP_c = CR \times VisCéu \quad \text{Equação 1}$$

Onde:
CRP_c é o Coeficiente de Radiosidade Ponderado pela visibilidade do céu [%];
CR é o Coeficiente de Radiosidade [%];
VisCéu é a porcentagem de visibilidade do céu [%].

$$CRP_s = CR \times HorSol \quad \text{Equação 2}$$

Onde:
CRP_s é o Coeficiente de Radiosidade Ponderado pela visibilidade do Sol [%];
CR é o Coeficiente de Radiosidade [%];
HorSol é a porcentagem das horas de Sol direto incidente em relação ao total de horas com Sol [%].

Para processar e preparar o arquivo de desenho, o programa Apolux IV fragmenta as superfícies do modelo em parcelas menores, as quais são definidas por uma malha de triângulos sobre cada plano. Essas parcelas são representadas pelos vértices resultantes do fracionamento aplicado, os quais possuem como área de influência a área da parcela que representam. Quanto menor o fator de fracionamento definido (parâmetro para área máxima de cada fração de superfície), mais apurada se torna a resolução e mais homogêneo será o comportamento lumínico de cada unidade de área. Entretanto, maior será o tempo de processamento para realizar as simulações.

Os valores do CRP são diretamente proporcionais à área de influência de cada vértice, a qual depende da geometria das superfícies e do fator de fracionamento aplicado ao nível do elemento. Ou seja, o valor do CRP será tão menor quanto maior for o fracionamento da superfície. Por esse motivo, os valores do CRP podem ser utilizados como parâmetro de comparação apenas entre modelos, ou superfícies de um mesmo modelo, se apresentarem a mesma área de influência dos vértices.

Para classificar o comportamento geral dos elementos de controle foi adotada a estratégia de somar os valores obtidos de CRP em cada elemento, pois independente do fracionamento aplicado às superfícies, a somatória será sempre um valor constante, possibilitando a comparação entre diferentes soluções de projeto. O resultado dessa somatória foi representado pelo indicador proposto denominado de Potencial Luminoso por Redirecionamento (PLR).

Para a construção do PLR, adotou-se o conceito da condição de iluminância unitária, no qual o valor final representa o potencial da quantidade de luz que chegará ao plano de trabalho na hipótese de os vértices receberem a quantidade de 1 lux. Dessa forma, o PLR é composto pela somatória da multiplicação dos valores do CRP de cada vértice pelo valor de 1 lx, conforme a Equação 3, e representa o potencial total da quantidade de energia luminosa o elemento pode receber das fontes de radiação e redirecionar para o plano de análise. O indicador foi denominado de PLR_c para dados do céu e PLR_s para dados do Sol.

$$PLR = \Sigma (CRP \times E) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:
PLR é o Potencial Luminoso por Redirecionamento [lx];
CRP é o Coeficiente de Radiosidade Ponderado [%];
E é a Iluminância [lx].

Todas as informações utilizadas para compor os indicadores de CRP e PLR são baseadas em dados embutidos nos procedimentos de cálculo do programa Apolux IV. Uma versão especial do Módulo Fóton do programa, elaborada pelo seu desenvolvedor e não disponível para uso público, foi adaptada para extrair os dados referentes ao CR (coeficiente embutido no cálculo da Estimativa Anual de Luz Natural - EALN) de cada vértice que compõe as superfícies do modelo. A obtenção de ambos os indicadores propostos (CRP e PLR) é, portanto, vinculada aos resultados da simulação computacional executada pela versão especial do Módulo Fóton do Apolux IV e, por não estar incorporada às funcionalidades do programa, exige o processamento dos resultados por meio de planilhas de cálculo.

A análise do ganho de calor considerou especificamente a admissão do fluxo radiante incidente no plano da abertura por meio do Fator Solar Equivalente (FSE), conforme descrito por Felippe (2016), estimado por meio de simulação computacional, que representa a porcentagem do fluxo radiante incidente que atravessa o elemento de controle da insolação e incide no plano da abertura. Considerando que a dimensão da abertura não varia a cada modelo de análise, a radiação incidente no plano do vidro foi

calculada para um modelo sem obstrução (MSO) e individualmente para cada um dos modelos obstruídos, estabelecendo a razão entre as incidências de acordo com a Equação 4. Vale salientar que não foi considerada a influência de um plano envidraçado na abertura para o cálculo do FSE.

$$FSE = \Sigma [(I \text{ obstruído} \times 100) / I \text{ desobstruído}] \quad \text{Equação 4}$$

Onde:
FSE é o Fator Solar Equivalente [%];
I é o fluxo radiante incidente [kW/m²].

A admissão do fluxo luminoso foi analisada pelo valor médio da Exposição Luminosa Anual (ELA) obtida sobre o plano de trabalho. Visando analisar de forma independe a radiação que incide no ambiente de forma direta e a radiação que incide por meio de seu redirecionamento pelas superfícies do elemento, a ELA, obtida pelo procedimento de cálculo padrão, foi separada nas parcelas de: ELA direta (ELA_d), obtida pelo procedimento de cálculo em uma simulação secundária na qual a refletância dos elementos de controle é anulada e; ELA redirecionada (ELA_r), obtida pelo cálculo da diferença entre os valores de ELA e ELA_d.

A distribuição do fluxo luminoso foi analisada pelo índice de Uniformidade de Distribuição (UD) aplicado sobre os valores de ELA obtidos nos vértices pertencentes ao eixo longitudinal central do plano de trabalho, de acordo com a Equação 5.

$$UD = ELA \text{ mínimo} / ELA \text{ médio} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:
UD é o índice de Uniformidade de Distribuição;
ELA é a Exposição Luminosa Anual [klux.h].

3.2. Definição de parâmetros e modelos de simulação

Com o objetivo de demonstrar os novos indicadores de CRP e PLR aplicados como alternativa para a análise do comportamento de elementos de controle da insolação, bem como para identificar indicativos de como a geometria dos elementos condiciona o seu comportamento, foram simuladas as tipologias de prateleiras de luz e elementos horizontais para a localidade de Florianópolis, SC.

Para as simulações, adotou-se um ambiente padrão de 18 m², com 3 m de largura por 6 m de profundidade e pé direito de 3 m de altura, a fachada com abertura para o exterior possui peitoril de 75 cm, sem a presença de verga, e orientação solar norte, conforme ilustrado na Figura 2. Foi definido um plano de análise horizontal situado a 75 cm do piso com 50 cm de afastamento das paredes. O plano da abertura foi definido como plano de análise vertical para obtenção dos valores referentes ao ganho de calor (FSE) e, visando manter a relação dos dados obtidos apenas com a influência dos elementos de controle da insolação, as propriedades físicas do vidro não foram consideradas.

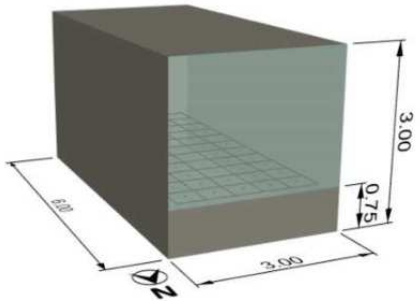

Figura 2 - Ambiente padrão.

Ao ambiente padrão (modelo sem obstruções - MSO), duas tipologias de elementos de controle da insolação foram aplicadas ao plano da abertura: prateleiras de luz e elementos horizontais. Visando a investigação das relações de causa e efeito entre a geometria e o comportamento dos elementos de controle da insolação, foram definidos os seguintes parâmetros de variação entre os modelos de análise: número de divisões do plano da abertura, profundidade, inclinação, curvatura e localização das aletas. Os elementos horizontais foram modelados visando reproduzir o efeito de elementos infinitos. Foram definidos oito modelos de análise com os parâmetros geométricos aplicados conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros geométricos para os modelos de análise.

Tipologia	Modelo	N.º de divisões	Profundidade [m]	Inclinação [°]	Localização
Prateleiras de luz (PL)	PL_A	2	0,50	0	Externa
	PL_B	2	1,00	0	Combinada
	PL_C	2	1,00	0	Externa
	PL_D	2	1,00	Superfície curva	Externa
Elementos horizontais (EH)	EH_A	1	1,00	0	Externa
	EH_B	2	0,50	0	Externa
	EH_C	4	0,25	0	Externa
	EH_D	4	0,25	30	Externa

No que se referente às propriedades físicas dos modelos, todas as superfícies foram classificadas como opacas difusoras e a refletância média das paredes, piso, teto e elementos de controle da insolação foram definidas em 50%, 20%, 70% e 60%, respectivamente, com base na NBR ISO/CIE 8995 (ABNT, 2013). Os níveis do vidro e do plano de trabalho foram calculados como planos de análise e não apresentam propriedades físicas. A área máxima de fracionamento do modelo foi definida em 0,15 m², visando garantir um espaçamento máximo de 50 cm entre os vértices do plano de trabalho. Para garantir um espaçamento máximo de 15 cm entre os vértices do plano da abertura e dos elementos de controle insolação, seus níveis foram configurados para fracionar 15 e 35 vezes a mais que as demais superfícies, respectivamente.

As simulações de iluminação foram executadas para a cidade de Florianópolis, SC, com base no arquivo bioclimático BRA_FLORIANOPOLIS838990_SWERA.epw (LABEEE, 2021) para o intervalo das 8h às 18h. Como parâmetros da simulação, foram adotados o Globo 7, que representa a divisão do globo em 93.598 parcelas (número de ângulos sólidos do globo) e 120 faixas (número de coroas esféricas horizontais de cada hemisfério) e o modo de cálculo simples (fluxo médio para o perfil RGB dos materiais), considerando 10 ciclos de radiosidade e 0% de refletância do solo.

Sobre a superfície dos elementos, foram extraídos os dados de CR, VisCéu e HorSol. A versão especial do Módulo Fóton possui uma rotina especificamente desenvolvida para extrair os dados referentes ao CR a cada vértice da malha triangular utilizada para discretizar as superfícies do modelo. Os dados de VisCéu foram obtidos pelo cálculo de Visibilidade e representam a porcentagem em relação aos valores de fator de céu, os quais contém um intervalo numérico entre 0 e 3,14, equivalendo a 0% e 100%. Os dados de HorSol foram obtidos pelo cálculo da Estimativa Anual de Luz Natural (EALN). E, sobre os planos de análise (vidro e plano de trabalho), foram extraídos os dados de ELA pelo cálculo da EALN.

3.3. Processamento e análise dos resultados

Os resultados das simulações feitas no Apolux IV foram extraídos por meio de arquivos de texto. Os dados contidos nesses arquivos, para cada etapa de cálculo, foram processados pelo programa de edição de planilhas Microsoft Office Excel.

Na sequência, foram calculados os indicadores de: Coeficiente de Radiosidade Ponderado (CRP) e Potencial Luminoso por Redirecionamento (PLR) sobre os elementos de controle da insolação; Fator Solar Equivalente (FSE) sobre o plano da abertura e; Exposição Luminosa Anual (ELA) e Uniformidade de Distribuição (UD) sobre o plano de trabalho. O mapeamento da distribuição espacial dos resultados do CRP_c e CRP_s obtidos sobre as superfícies dos elementos foi elaborado com a ferramenta de extensão Grasshopper (DAVIDSON, 2021) do programa Rhinoceros 3D (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2021).

A análise dos dados foi feita por meio de métodos analíticos e métodos gráficos. O método analítico consistiu em abordar quantitativamente os dados para o comportamento geral de cada elemento, possibilitando a comparação direta dos resultados entre os modelos simulados. O método gráfico teve como objetivo representar a distribuição espacial dos resultados para o CRP, proporcionando uma análise direta sobre a superfície do elemento e possibilitando a identificação de regiões específicas de maior potencial em receber e redirecionar a energia luminosa.

4. RESULTADOS

Essa seção contém os resultados obtidos nesta pesquisa relativos às simulações computacionais de potencial luminoso por redirecionamento da radiação, ganho de calor e admissão e distribuição do fluxo luminoso dos elementos de controle da insolação desenvolvidos na tipologia de prateleiras de luz e elementos horizontais, conforme parâmetros definidos na Tabela 2.

4.1. Prateleiras de luz

Inicialmente, estão apresentados os resultados obtidos sobre a superfície do elemento para o modelo PL_A de VisCéu, HorSol, CR, CRP_c e CRP_s na sua distribuição espacial (Figura 3), a fim de ilustrar o comportamento de cada indicador utilizado e o efeito da combinação entre as condições de visualização das fontes de luz (Sol e céu) e do alvo (plano de trabalho).

A partir da análise da Figura 3 foi possível observar a tendência das áreas mais externas do elemento em obter maior visibilidade de ambas as fontes externas de radiação (VisCéu e HorSol), enquanto o CR demonstrou uma tendência oposta para a relação de visibilidade com o interior, obtendo na área central e próxima da abertura, o maior potencial de troca radiante com o plano de trabalho. Ou seja, quanto mais afastado estiver um vértice do plano da abertura, maior a quantidade de energia que foi recebida pelas fontes

de radiação e quanto mais próximo for um vértice do plano da abertura, maior foi a troca de radiação estabelecida com o plano de trabalho.

A combinação de ambas as condições de exposição (fonte e alvo) por meio do CRP resultou em um comportamento com predominância para valores maiores na área central da superfície e próxima da abertura para o modelo PL_A. No CRP_c ocorreu a redução proporcional do potencial de troca radiante da superfície com o plano de trabalho (CR), visto que suas características geométricas bloquearam parte da visibilidade da abóbada celeste (VisCéu). Já no CRP_s, por apresentar visibilidade do Sol (HorSol) próxima à 100% do tempo na maior parte da superfície, o potencial de troca da superfície com o plano de trabalho (CR) é pouco reduzido.

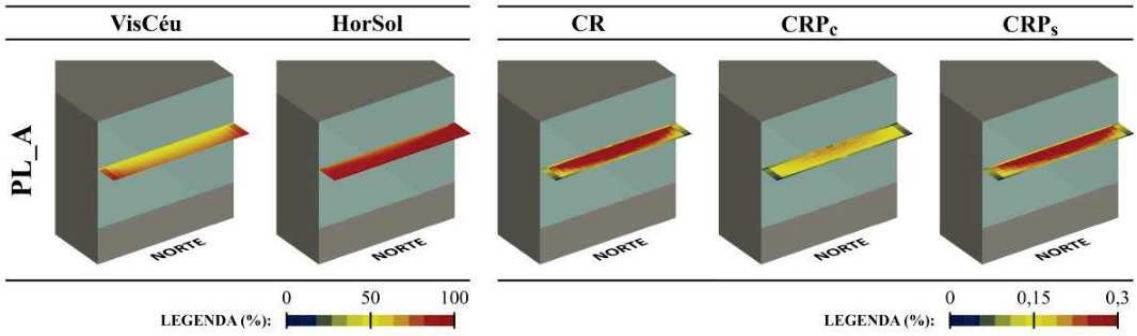

Figura 3 - Distribuição espacial VisCéu, HorSol, CR, CRP_c e CRP_s para o modelo PL_A.

Na sequência, estão apresentados os resultados relativos à distribuição espacial do CRP_c e do CRP_s sobre a superfície dos demais modelos de prateleiras de luz, conforme ilustrado pela Figura 4.

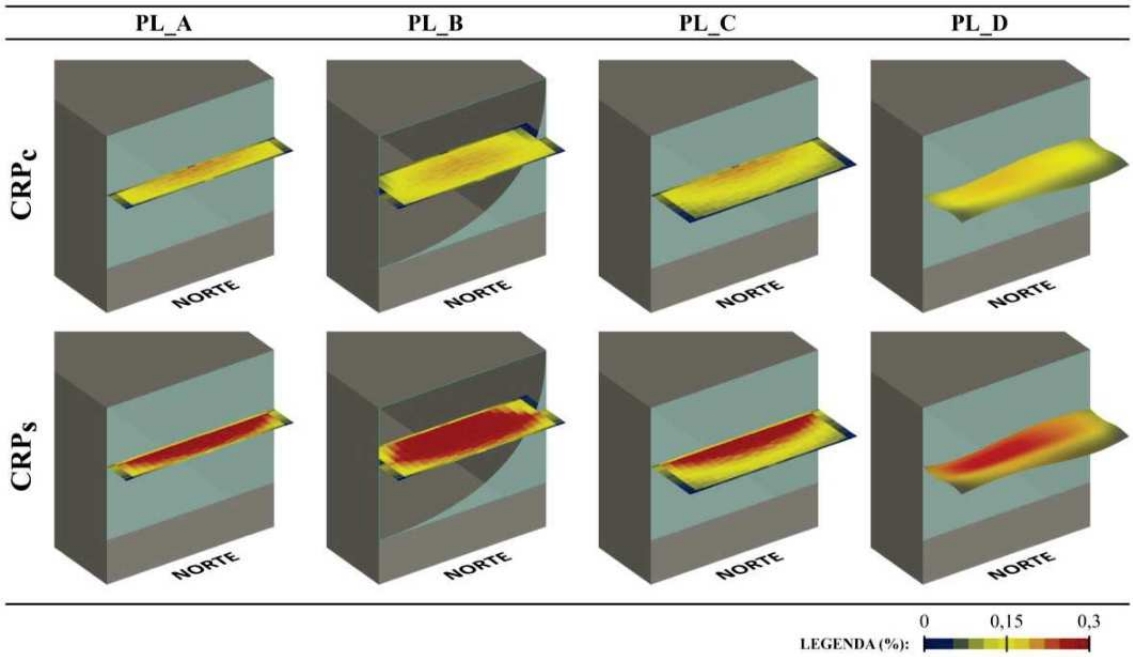

Figura 4 - CRP_c e CRP_s para os modelos de prateleiras de luz.

A partir da variação da localização do elemento (PL_B), percebeu-se que as superfícies internas e externas apresentaram a distribuição espacial do CRP de forma espelhada, mantendo a relação de que vértices mais próximos ao plano da abertura apresentaram maior potencial em receber e redirecionar a radiação incidente. Ou seja, quanto mais distante um vértice esteve do plano da abertura, seja em direção ao exterior ou ao interior do ambiente, menor foi o seu potencial luminoso por redirecionamento da radiação obtido. A superfície interna ao plano da abertura estabelece uma troca elevada de energia com as superfícies do ambiente e, na medida em que ainda visualize as fontes de radiação, pode apresentar contribuição significativa para iluminar o plano de trabalho.

O aumento da profundidade do elemento (PL_C), em relação ao modelo PL_A, apresentou um padrão de distribuição do CRP que se manteve constante, seguindo a tendência da distribuição superficial de reduzir o potencial na medida em que os vértices se afastam do plano da abertura. O que significa que os vértices que ocupam a mesma posição em relação ao plano da abertura, apresentaram o mesmo valor de CRP,

independente da profundidade adotada para o elemento de controle da insolação. Tal comportamento indica que, a partir da distância em que a contribuição de uma superfície para iluminar o plano de trabalho não seja mais significativa, mas ainda contribua de forma essencial para reduzir o ganho de calor, o elemento poderia, por exemplo, substituir essa porção de área por um pergolado de aletas paralelas à fachada.

Já o modelo PL_D, com superfície curva composta por regiões côncavas e regiões convexas, apresentou um deslocamento da tendência de maior potencial luminoso por redirecionamento da radiação para a lateral do elemento quando comparado ao modelo com superfície plana de mesmas dimensões (PL_C). A superfície curva apresentou maior contribuição para a iluminação nas regiões côncavas e direcionadas ao interior, enquanto nas bordas da superfície, de característica convexa e direcionada ao exterior, foram obtidos valores de CRP menores, representando seu baixo potencial de redirecionar a energia luminosa para o ambiente.

Por fim, estão apresentados os resultados gerais de PLR, FSE, ELA e UD na forma de gráfico para os modelos de prateleiras de luz, conforme Figura 5.

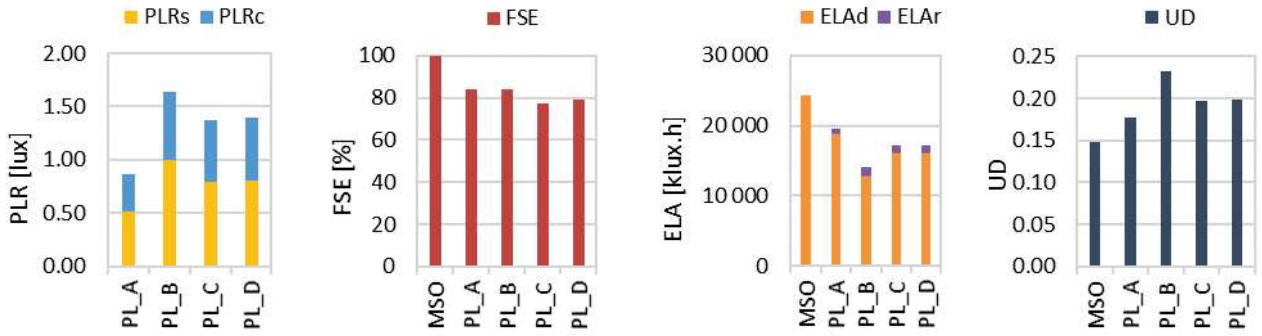

Figura 5 - PLR, FSE, ELA e UD para os modelos de prateleiras de luz.

Dentre os modelos de prateleiras de luz, o modelo PL_B resultou em valores mais elevados tanto para o PLR quanto para a admissão da radiação redirecionada incidente no plano de trabalho (ELA_r) e para a uniformidade de distribuição (UD). Em relação ao FSE, os resultados variaram de 84% (PL_A e PL_B) a 77% (PL_C). Os modelos PL_A e PL_B resultaram no mesmo valor para o FSE, entretanto obtiveram diferentes resultados para o Potencial Luminoso por Redirecionamento (PLR) e para a admissão e distribuição do fluxo luminoso no plano de trabalho (ELA e UD). Tal comportamento indica que, variando a forma de um elemento de controle da insolação foi possível, a partir de um mesmo ganho de calor resultante de cada situação, reduzir a incidência direta de radiação no plano de trabalho e, ainda, aumentar a quantidade de luz que é redirecionada para o plano de trabalho e melhorar a uniformidade de distribuição da iluminação. Dessa forma, projetar prateleiras de luz compostas pela combinação de superfícies externas e internas ao plano da abertura melhora o potencial luminoso por redirecionamento, reduzindo a incidência direta de radiação no plano de trabalho ao mesmo tempo que melhora a admissão e a distribuição da luz natural.

Ao compararmos os modelos PL_C e PL_D, ambos possuem a mesma área de projeção da superfície, altura de instalação e localização externa em relação ao plano da abertura. Mesmo com uma distribuição espacial para o CRP diferente (Figura 4), os modelos apresentaram potencial luminoso por redirecionamento bastante aproximados. Tais resultados podem ser explicados pelas condicionantes adotadas na formação das curvaturas do elemento PL_D, que resultaram na proporção equilibrada entre porções da superfície que foram direcionadas para o exterior e para o interior. Dessa forma, mesmo com variação na distribuição espacial do CRP, os valores de PLR permaneceram semelhantes, bem como os valores de FSE, ELA e UD.

4.1. Elementos horizontais

Inicialmente, estão apresentados os resultados relativos à distribuição espacial do CRP_c e do CRP_s sobre a superfície dos modelos de elementos horizontais, conforme ilustrado pela Figura 6.

O modelo EH_A, por não possuir nenhuma face que visualize simultaneamente as fontes de radiação e o interior do ambiente, apresentou CRP nulo para toda a superfície do elemento. Para os modelos EH_B, EH_C e EH_D, foi possível perceber a predominância de maior CRP para a área central das superfícies e próximas da abertura, bem como a maior contribuição das aletas com altura inferior. Todos os modelos possuem a mesma área total de superfície compondo o elemento de controle da insolação e, na medida em que essa superfície é dividida e distribuída ao longo da abertura ocorrem dois fenômenos: 1) uma maior porção da área de superfície dos elementos se aproxima da abertura e; 2) um maior número de aletas ocupa as posições de menor altura. As aletas de alturas mais baixas apresentaram maior potencial em redirecionar a luz incidente para o plano de trabalho por decorrência da segunda reflexão que ocorre na face inferior da

aleta superior e, também, por possuir melhor visualização da superfície do teto. Assim, quanto maior o número de divisões do plano da abertura, maior foi o aproveitamento da radiação solar incidente nos elementos horizontais para iluminar o plano de trabalho. De acordo com os resultados obtidos, o melhor aproveitamento das aletas horizontais para iluminar o plano de trabalho aponta para a utilização de elementos pouco profundos e com um maior número de divisões do plano de abertura.

A inclinação do elemento em 30º (EH_D) apresentou aumento do CRP em relação ao modelo EH_C, resultando em uma situação mais equilibrada entre visualizar as fontes e o plano de trabalho. Quando as aletas do elemento foram inclinadas em 30º positivos, o CR estabelecido entre suas superfícies e o plano de trabalho aumentou, ao passo que a porcentagem de horas de Sol incidente (HorSol) se manteve elevada, resultando no aumento do CRP em relação ao modelo EH_C.

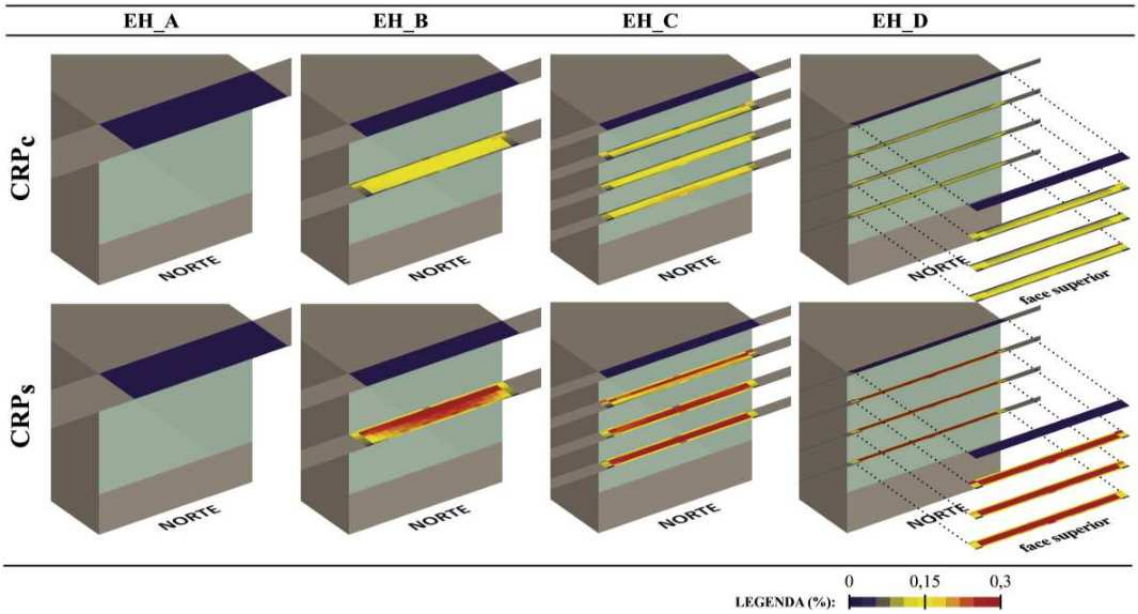

Figura 6 - CRP_c e CRP_s para os modelos de elementos horizontais.

Por fim, estão apresentados os resultados gerais de PLR, FSE, ELA e UD na forma de gráfico para os modelos de elementos horizontais, conforme Figura 7.

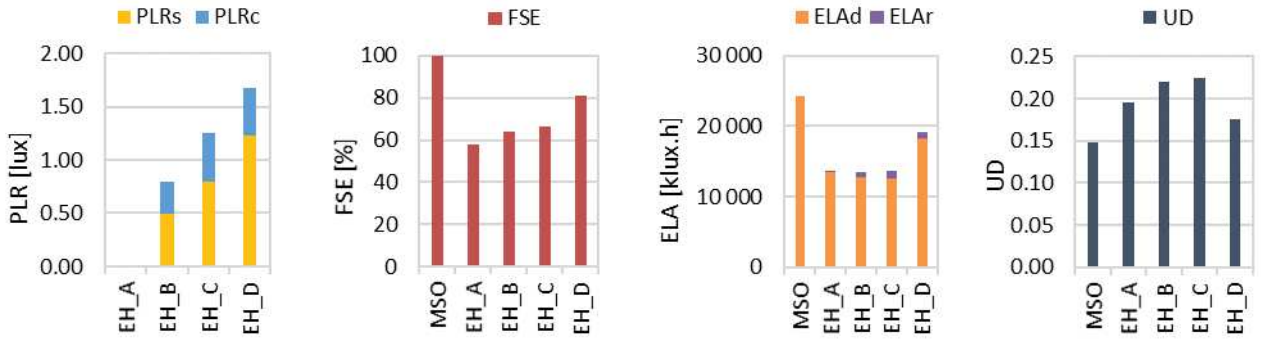

Figura 7 - PLR, FSE, ELA e UD para os modelos de elementos horizontais.

O modelo EH_A, por não possuir superfícies que visualizem simultaneamente as fontes de radiação e o interior do ambiente, também apresentou PLR nulo. Para os elementos horizontais analisados, os valores de PLR e FSE foram maiores, indicando maior potencial em receber e redirecionar a energia luminosa para o plano de trabalho e maior ganho de calor, quando o elemento apresentou maior número de divisões do plano da abertura (EH_C) e inclinação da aleta em 30° (EH_D).

Ao compararmos os resultados obtidos para o modelo EH_C e o modelo EH_D, com aletas inclinadas, o modelo EH_D apresentou maior valor para o PLR_s, porém ao analisarmos os resultados sobre o plano de trabalho, o modelo EH_C resultou no maior valor para o ELA_r. É importante lembrar que o PLR_s diz respeito à ponderação do CR pela porcentagem de horas de incidência direta do Sol (HorSol), não comportando a ponderação pelo efeito cosseno para ângulos de incidência maiores que zero. Dessa forma, a proporção em que o PLR_s varia quando a inclinação do elemento é diferente de zero não representa a mesma proporção obtida para a variação do ELA_r sobre o plano de trabalho.

5. CONCLUSÕES

Os indicadores CRP e PLR propostos representaram o fenômeno da recepção e redirecionamento do fluxo luminoso de forma coerente, possibilitando a representação espacial do comportamento sobre a superfície dos elementos e a classificação geral de cada sistema, além de explorar etapas do caminho percorrido pela luz que, até o momento, não foram analisadas com o mesmo foco e detalhe proposto pelo método. A variação dos valores de PLR entre cada modelo de análise ocorreu de forma independente dos resultados obtidos para FSE, ELA_d e UD, demonstrando que o indicador proposto de PLR pode ser utilizado de forma complementar para caracterizar o comportamento dos elementos de controle da insolação frente a interação com a radiação solar.

Os resultados das simulações reafirmaram, conforme colocado por Moore (1991), que quanto maior a área aparente de uma superfície em relação à fonte, maior a energia interceptada e emitida por ela. Assim como, que para fornecer o máximo de iluminação redirecionada a um alvo, essa superfície precisa estabelecer um equilíbrio entre a sua condição de exposição em relação às fontes de radiação e ao alvo. Foi possível observar, ainda, que dependendo da configuração de sua geometria, os elementos de controle da insolação apresentaram comportamentos variados em relação ao equilíbrio entre o ganho de calor e a admissão e distribuição do fluxo luminoso.

Ademais, os resultados obtidos indicaram que as superfícies curvas, cujo as normais são variáveis ao longo da superfície, podem modificar o comportamento superficial dos elementos com relação ao fenômeno da recepção e redirecionamento do fluxo luminoso. O que demonstra a relação estabelecida entre a geometria e o potencial luminoso por redirecionamento da radiação das superfícies, caminhando em direção ao desenvolvimento de estratégias e técnicas de projeto mais adequadas do ponto de vista luminoso para o lançamento de elementos de controle da insolação.

Por fim, reforça-se a importância de se considerar, além das condições de sombreamento, os aspectos da geometria dos elementos de controle da insolação no condicionamento do seu potencial luminoso por redirecionamento. Ainda que satisfeitas as demandas de controle do ganho de calor e da admissão do fluxo luminoso, esses elementos devem cumprir, igualmente, com suas demais funções, tais como: permitir a visibilidade do exterior, possibilitar a renovação do ar interno, oferecer proteção contra intempéries e compor com a identidade visual da edificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AROZTEGUI, J. M. **Método para projeto e avaliação de para-sóis externos, visando à otimização do seu desempenho térmico para um clima dado**. Simpósio Latino-Americano de Racionalização da Construção e Sua Aplicação às Habitações de Interesse Social. São Paulo: [s.n.]. 1981. p. 583-598.

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

BOGO, A. J. **Método para avaliação da admissão de luz natural através de aberturas com elementos de controle solar**. 2007. 308p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

CLARO, A. **Método para determinação da estimativa anual de luz natural utilizando o modelo vetorial esférico para radiosidade**. 2015. 165p. Tese (Progressão a Professor Titular do Departamento de Arquitetura e Urbanismo) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2015.

CLARO, A. **APOLUX IV:** Projeto, cálculo e análise de eficiência da iluminação natural e artificial, 2020. Disponivel em: <http://foton.arq.ufsc.br>. Acesso em: 10 fev. 2021.

DAVIDSON, S. **Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino**, 2021. Disponivel em: <www.grasshopper3d.com>. Acesso em: 10 fev. 2021.

FELIPPE, A. R. **Desempenho luminoso e energético de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento**. 2016. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2016.

GONZÁLEZ, J.; FIORITO, F. Daylight design of office buildings: Optimisation of external solar shadings by using combined simulation methods. **Buildings**, v. 5, p. 560-580, 2015.

LABEEE. **Arquivos Climáticos - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**, 2021. Disponivel em: <www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em: 10 nov. 2020.MOORE, F. **Concepts and practice of architectural daylighting**. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

OLGYAY, A.; OLGYAY, V. **Solar Control and Shading Devices**. Princeton: Princeton University Press, 1957.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and thermal performance of window shading and sunlighting reflecting devices**. 1992. 310p. Tese (Doutorado em Filosofia) - Building Science Unit, School of Architectural Studies, University Of Sheffield. Sheffield. 1992.

REINHART, C. F. **Daylighting Handbook 1:** Fundamentals, Designing with the Sun. USA: Ria Stein, 2014.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhino - Rhinoceros 3D**, 2021. Disponivel em: <www.rhino3d.com>. Acesso em: 10 fev. 2021.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq - Brasil (Processo No 307179/2016-8) pelas bolsas e recursos financeiros aplicados no desenvolvimento deste estudo.