

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO
DOUTORADO CIDADES

MARLISE LILA SILVA CARVALHO

**EFICIÊNCIA DA LUZ SOLAR REFLETIDA E DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS
DE SOMBREAMENTO: ESTUDO PARA SALAS DE AULA NA CIDADE DE
MACEIÓ.**

Maceió

2018

MARLISE LILA SILVA CARVALHO

**EFICIÊNCIA DA LUZ SOLAR REFLETIDA E DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS
DE SOMBREAMENTO: ESTUDO PARA SALAS DE AULA NA CIDADE DE
MACEIÓ.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Dinâmicas do Espaço Habitado, Doutorado Cidades, da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do grau de Doutora em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús

Maceió

2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Janis Christine Angelina Cavalcante – CRB:1664

C331e Carvalho, Marlise Lila Silva.

 Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivo de sombreamento: estudo para salas de aula na escola de Maceió / Marlise Lila Silva Carvalho. – Maceió, 2018.

 196 f. : il.

 Orientador: Ricardo Carvalho Cabús.

 Tese (doutorado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2017.

 Bibliografia: f. 144-151.

 Apêndices: f. 152-196

 1. Iluminação natural. 2. Luz solar refletida. 3. Dispositivos de sombreamento.
I. Título.

CDU: 727.1(813.5)

Folha de aprovação

AUTOR: MARLISE LILA SILVA CARVALHO

Eficiência da luz solar refletida e desempenho de dispositivos de sombreamento: estudo para salas de aula na cidade de Maceió. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas.

Tese submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação Dinâmica do Espaço Habitado, Doutorado Cidades da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em ____ de ____ de 2018.

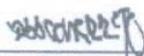


Prof. Dr. Ricardo Carvalho Cabús. Centro de Tecnologia – UFAL. (Orientador)

Banca Examinadora:



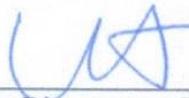
Prof. Dr. Aldomar Pedrini. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFRN (Examinador Externo)



Prof. Dr. Paulo Sérgio Scarazzato. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – USP (Examinador Externo)



Prof.ª Dr.ª. Gianna Barbirato. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL (Examinadora interna)



Prof. Dr. Leonardo Bittencourt. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL (Examinador interno)

À Bárbara, verdadeira luz da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais Ademir e Marisete e aos meus irmãos Ademir e Janine, pelo apoio e incentivo presentes desde o início desta jornada.

Ao meu esposo João, pelo carinho e por compreender minhas ausências durante esse período.

Ao professor Ricardo Cabús, pela orientação tão fundamental para o desenvolvimento desta tese e para minha evolução como pesquisadora.

Ao professor Christiano Cantarelli, pelos ensinamentos de estatística.

Aos professores da banca, pelo tempo dedicado a este trabalho.

Aos colegas do doutorado e da Gerência de Projetos da SINFRA, principalmente Cynthia e Marcelle, por dividirem comigo as dificuldades e conquistas.

Aos membros do Grupo de Pesquisa em Iluminação – GRILU, especialmente Lidiane, Pedro e Lívia, pela ajuda em tantos momentos.

A Deus, pela constante lembrança de que tudo isso seria possível.

RESUMO

O clima quente e úmido caracteriza-se pelo predomínio do céu parcialmente nublado, o que torna intensa a radiação solar, impondo a necessidade de sombreamento. Assim, a iluminação natural no interior do ambiente pode depender mais da luz refletida do que da luz natural direta. Planejar a forma das superfícies é um importante recurso para o aproveitamento da luz solar refletida. Neste sentido, dispositivos de sombreamento podem ser projetados para obstruir a visão do céu apenas o necessário para o sombreamento, refletindo a luz solar para o ambiente e minimizando essa perda. O objetivo geral desta pesquisa de doutorado é estudar o desempenho de dispositivos de sombreamento em salas de aula com relação à eficiência luminosa na captação da luz solar refletida, em Maceió, a fim de que seja identificado o potencial de aproveitamento da luz solar desses elementos. Para isso foram definidas três variáveis desses dispositivos: número de peças, especularidade e refletância das superfícies dos brises. Os modelos resultantes da combinação dessas variáveis foram analisados quanto à eficiência da luz solar refletida, índice proposto nesta pesquisa. O programa utilizado para as simulações computacionais desses modelos foi o TropLux. Análises estatísticas foram desenvolvidas a fim de identificar as variáveis de maior impacto para a eficiência da luz solar refletida e relacionar o índice ao desempenho da iluminação, através de indicadores de disponibilidade, distribuição e manutenção da iluminância no ambiente: iluminância média anual, uniformidade média anual e autonomia de luz natural espacial. Os resultados mostraram que a refletância dos dispositivos é a variável que mais influencia positivamente a eficiência da luz solar refletida, chegando a incrementar em até 142% o índice. A iluminância média anual e a autonomia de luz natural espacial foram relacionados positivamente à eficiência e a parametrização definida também contribuiu para a ampliação dos seus valores. Quanto à distribuição de iluminâncias, a variação dos parâmetros analisados resultou em redução do índice de uniformidade, na maioria dos casos estudados. O aumento da especularidade e da refletância especular em modelos voltados para Leste reduziram o índice em 34% e 41%, respectivamente. Aumentar o número de peças em sistemas de dispositivos inseridos em aberturas laterais apenas corresponde a uma solução válida para o incremento da iluminação quando tais elementos possuem alta refletância, sobretudo especular. Tal medida representa uma estratégia mais eficiente no caso da fachada Norte. Entre os modelos analisados, os sistemas com maior número de peças, cujo acabamento das superfícies proporciona reflexão especular, são capazes de promover maior aproveitamento da luz solar na forma refletida. O uso de cores claras, como branco, creme e amarelo, também favorece o aproveitamento da luz solar, sobretudo se forem empregadas em materiais com reflexão especular. Por outro lado, altas refletâncias resultaram em redução da uniformidade da iluminação no ambiente. A partir dos resultados dos estudos de eficiência da luz solar refletida desenvolvidos, pode-se afirmar que é possível ampliar o aproveitamento da luz solar através da variação de determinadas características de dispositivos de sombreamento e, conseqüentemente, trazer benefícios para a disponibilidade de iluminação no ambiente.

Palavras-chave: Iluminação natural. Luz solar refletida. Dispositivos de sombreamento.

ABSTRACT

A humid subtropical climate is characterized by a predominant partly cloudy sky, which increases the intensity of solar radiation, and makes shade an essential requirement. Thus, the indoor daylighting environment may depend more on reflected light than on direct light. Planning the shape of the surfaces is an important means of making full use of the reflected sunlight. In this regard, shading devices can be designed that just obstruct the view of the sky enough to provide shade, by reflecting the sunlight for the environment, and reducing this loss. The aim of this doctoral research is to study the performance of shading devices in classrooms with regard to their luminous power when capturing reflected sunlight in Maceió, so as to determine the potential use of sunlight in these elements. Three variables of these devices were defined for this: the number of pieces, specularity and reflectance of the surfaces devices. The resulting models from the combination of these variables were analyzed to calculate the reflected sunlight efficiency, rate employed in this research. The software used for the computational simulations of these models was TropLux. Statistical analyses were conducted to determine which variables had the greatest impact on the reflected sunlight efficiency and to relate the rate to the daylighting performance through indicators of availability, distribution and the maintenance of illuminance inside the environment: these included the annual average illuminance and uniformity rate, and spatial daylight autonomy. The results showed that the reflectance of the devices is the variable that has the most positive influence on the reflected sunlight efficiency, and is able to increase the rate by up to 142%. The annual average illuminance and the spatial daylight autonomy were positively related to the efficiency and the defined parameterization also led to an increase of their values. With regard to the distribution of illuminances, the variations of the analyzed parameters resulted in a reduction of the uniformity rate in most of the cases studied. The increase in specularity and specular reflectance in the models facing east reduced the rate by up to 34% and 41%, respectively. Increasing the number of components in the system devices installed in lateral openings, only provides a valid solution for the increase of the illumination when these elements have a high reflectance, especially specular. This represents a more efficient strategy in the case of the north facade. Among the analyzed models, in the systems with the largest number of components, and where the surface finishing process provides specular reflection, there is a greater use of sunlight in the reflected form. The use of light colors, such as white, beige and yellow, also benefit the use of sunlight, especially if they are used in materials with specular reflection. In contrast, the high reflectances resulted in a reduction of the uniformity of illumination in the environment. From the results of the studies carried out into reflected sunlight efficiency, it can be stated that it is possible to increase the use of sunlight through the variation of certain shading devices and, hence, to bring benefits by making daylighting available in the environment.

Keywords: Daylighting. Reflected sunlight. Shading devices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Carta bioclimática esquemática	26
Figura 2 - Templo de Amun, Kamak, Egito. Seção indicando a forma pela qual a luz solar intensa é filtrada para o interior através de fendas de pedra.....	27
Figura 3 - Lake Shore Drive Apartment Buildings, do arquiteto Mies van der Rohe: destaque para fachadas totalmente envidraçadas, Chicago, 1948–51	29
Figura 4 - Tríade de Vitruvius	31
Figura 5 - Fachada oposta como fonte secundária de iluminação.....	33
Figura 6 - Faixa (AB) onde o solo pode ser mais eficiente em relação à iluminação no interior do ambiente	34
Figura 7 - Comportamento da luz ao atingir uma superfície.....	35
Figura 8 - Materiais refletores especulares são mais eficientes para redirecionar a luz solar ..	35
Figura 9 - Efeito do ângulo e das características dos brises	37
Figura 10 - Desempenho de dispositivos de sombreamento em relação à ventilação e visão ao exterior.....	38
Figura 11 - Redirecionamento da luz natural pelo solo, sendo a marquise uma fonte secundária.....	39
Figura 12 - Aplicação de prateleira de luz para proteção solar em aberturas laterais	40
Figura 13 - Apartamentos de Ponsik, Argélia, do arquiteto Le Corbusier. 1930-32: Fachadas compostas por brises e panos de vidro de acordo com a orientação do edifício	41
Figura 14 - Ministério da Educação e Saúde, Rio de Janeiro, 1936. Detalhe do sistema de brises utilizado para proteção das aberturas	42
Figura 15 - Alojamento Estudantil, Josai International University, Togane, Japão, 2014-2016: sistemas de grelhas em alumínio desempenham a função de brises.....	43
Figura 16 - Diferentes soluções de proteção com mesmo ângulo de sombreamento.....	43
Figura 17 - Corte ilustrativo de dutos de luz	47
Figura 18 - Aplicação de dutos de luz em ambiente industrial.....	47
Figura 19 - Detalhe de um poço de luz.....	48
Figura 20 - Corte do poço de luz utilizado em pesquisa	48
Figura 21 - Painel prismático	49
Figura 22 - Painel cortado a laser	50
Figura 23 - Seção de prateleira de luz com refletor anidólico.....	51
Figura 24 - Comparação entre a difusão da luz a partir de uma prateleira de luz horizontal (esquerda) e uma prateleira de luz anidólica	51
Figura 25 - Superfície dos elementos trocando energia (ou luz) no método da radiosidade....	60
Figura 26 - Raios de luz traçados a partir de um ponto para diferentes superfícies e para a principal fonte de luz	61
Figura 27 - Tela de saída do TropLux com opção de escolha das componentes para análise ..	62
Figura 28 - Localização da cidade de Maceió	69
Figura 29 - Precipitação mensal em milímetros para a cidade de Maceió	70
Figura 30 - Insolação mensal em horas para a cidade de Maceió	71
Figura 31 - Céu parcialmente nublado com sol visível em Maceió	72
Figura 32 - Campus A. C. Simões antes e depois do REUNI	74
Figura 33 - Modelo de sala de aula utilizado na pesquisa.....	76
Figura 34 - Nomenclatura dos modelos utilizados	78
Figura 35 - Disposição dos pontos em malha no ambiente de simulação.....	87
Figura 36 - Propriedades do vidro em relação ao ângulo de incidência da luz	88

Figura 37 - Parcelas de componentes da iluminação natural. Modelo sem proteção. Orientação Norte	91
Figura 38 - Gráfico de comportamento da eficiência da luz solar refletida em relação aos três sistemas estudados. Orientação Norte. Refletância 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças.....	92
Figura 39 - Eficiência da luz solar refletida e variação percentual entre os sistemas <i>a</i> e <i>c</i> , difusos e especulares. Orientação Norte. Refletâncias entre 10% e 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças.....	93
Figura 40 - Gráfico de comportamento da iluminância média anual em relação aos três sistemas estudados. Orientação Norte. Refletância 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças.....	94
Figura 41 - Gráfico de comportamento da uniformidade média anual em relação aos três sistemas estudados. Orientação Norte. Refletância 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças.....	96
Figura 42 - Uniformidade e variação percentual entre os sistemas <i>a</i> e <i>c</i> , difusos e especulares. Orientação Norte. Refletâncias entre 10% e 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças.....	96
Figura 43 - Variação da iluminância média anual (eixo vertical em lx) a partir da distância da abertura. Orientação Norte. Comparação entre os três sistemas de dispositivos de sombreamento. Refletância 10%	97
Figura 44 - Variação da iluminância média anual (eixo vertical em lx) a partir da distância da abertura. Orientação Norte. Comparação entre os três sistemas de dispositivos de sombreamento. Refletância 90%	98
Figura 45 - Gráficos de variação de $ALNE_{500/50\%}$ ao longo dos ambientes referentes aos modelos NaD10 e NcD10. Orientação Norte. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	100
Figura 46 - Gráfico de variação da eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento do número de peças. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	102
Figura 47 - Gráfico de variação da iluminância média anual em relação ao aumento do número de peças. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	103
Figura 48 - Gráficos de variação de E_{ma} comparando-se modelos referentes ao sistema <i>a</i> e <i>c</i> . Orientações Leste, Oeste e Sul	104
Figura 49 - Gráficos de variação percentual das componentes da iluminação natural diante do aumento do número de peças. Refletância de 90%, modelos difusos e especulares	105
Figura 50 - Gráficos de variação percentual das componentes da iluminação natural diante do aumento do número de peças. Refletância de 10%, modelos difusos e especulares	106
Figura 51 - Uniformidade média anual de modelos difusos e especulares, referentes ao sistema <i>a</i> , e sem proteção. Refletância 90%. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste e Oeste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	108
Figura 52 - Gráfico de variação da uniformidade média anual em relação ao aumento do número de peças. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	109
Figura 53 - Comparação entre a $ALNe$ dos modelos LaD10 e LcD10, orientação Leste. P-	

profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	110
Figura 54 - Comparação entre a ALNe dos modelos OaD10 e OcD10, orientação Oeste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	111
Figura 55 - Comparação entre a ALNe dos modelos OaE10 e OcE10, orientação Oeste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	111
Figura 56 - Comparação entre a ALNE dos modelos SaD10 e ScD10, orientação Sul. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	112
Figura 57 - Gráfico de variação da eficiência da luz solar refletida em relação à especularidade dos dispositivos. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	114
Figura 58 - Gráficos de variação da eficiência da luz solar refletida em relação à refletância dos dispositivos. Modelos sem especularidade (à esquerda) e especulares (à direita). Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletâncias de 10% a 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	116
Figura 59 - Gráfico de variação da iluminância média anual em relação à especularidade dos dispositivos. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	117
Figura 60 - Gráficos de variação iluminância média anual em relação à refletância dos dispositivos. Modelos sem especularidade (à esquerda) e especulares (à direita). Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletâncias de 10% a 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	119
Figura 61 - Gráfico de variação da uniformidade média anual em relação à especularidade dos dispositivos. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	120
Figura 62 - Gráficos de variação da uniformidade média anual em relação à refletância dos dispositivos. Modelos sem especularidade (à esquerda) e especulares (à direita). Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletâncias de 10% a 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.....	122
Figura 63 - Variação da iluminância média anual (eixo vertical em lx) a partir da distância da abertura. Orientação Leste, modelos especulares. Refletância de 10% a 90%	122
Figura 64 - Comparação entre a ALNe dos modelos LcD10 e LcE10, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	124
Figura 65 - Comparação entre a ALNe dos modelos NcD10 e NcD50, orientação Norte. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	124
Figura 66 - Comparação entre a ALNe dos modelos LcM10 e LcM50, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	125
Figura 67 - Comparação entre a ALNe dos modelos OcE10 e OcE90, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	125
Figura 68 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} a partir do aumento da especularidade..	126
Figura 69 - Propriedades de reflexão de superfície especular (a) e difusa (b) de dispositivos tipo brises.....	127
Figura 70 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} a partir do aumento da refletância. Modelos difusos.....	128

Figura 71 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} a partir do aumento da refletância. Modelos especulares.....	128
Figura 72 - Análise estatística para Orientação Norte: a) Planilha de efeitos estimados; b) gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos).....	130
Figura 73 - Análise estatística para Orientação Leste: a) Planilha de efeitos estimados; b) Gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos).....	131
Figura 74 - Análise estatística para Orientação Oeste: a) Planilha de efeitos estimados; b) Gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos).....	132
Figura 75 - Análise estatística para Orientação Sul: a) Planilha de efeitos estimados; b) Gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos).....	133
Figura 76 - Esquema comparativo da incidência solar nas fachadas Norte e Sul: a primeira possibilita maiores ganhos de eficiência da luz solar refletida a partir do aumento do número de peças com alta refletância.....	142
Figura 77 - Esquema da incidência solar nas fachadas Leste e Oeste: maiores ganhos a partir da variação das características de reflexão e refletância.....	142
Figura 78 - Faixas de porcentagem referentes à variação da eficiência da luz solar refletida	152
Figura 79 - Modelo de dispositivo de sombreamento utilizado no estudo.....	155
Figura 80 - Variação da eficiência da luz solar refletida (η_{sr}) diante do aumento da refletância difusa e especular. Modelos planos e côncavos.....	156
Figura 81 - Variação da iluminância média anual (E_{ma}) diante do aumento da refletância difusa e especular. Modelos planos e côncavos.....	156
Figura 82 - Variação da uniformidade (U_{ma}) diante do aumento da refletância difusa e especular. Modelos planos e côncavos.....	157
Figura 83 - Comparação entre a ALNe dos modelos LxD10 e LxD90. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	158
Figura 84 - Comparação entre a ALNe dos modelos LxE10 e LxE90. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros.....	158
Figura 85 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} , e U_{ma} a partir do aumento da refletância. Modelos difusos e especulares.....	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Probabilidade de insolação mensal em Maceió	72
Tabela 2 - Características do modelo	75
Tabela 3 - Máscaras de sombra e ângulos para orientações Norte, Leste e Sul	76
Tabela 4: Variáveis e categorias para análise estatística. Orientação Norte	90
Tabela 5 - Variação de Eficiência de luz solar refletida em relação ao aumento do número de peças, por refletância. Orientação Norte.	92
Tabela 6 - Variação da Iluminância média anual em relação ao aumento do número de peças, por refletância. Orientação Norte.	94
Tabela 7 - Variação da Uniformidade média anual em relação ao aumento do número de peças, por refletância. Orientação Norte.	95
Tabela 8 - Autonomia de luz natural espacial referentes aos modelos difusos e especulares do sistema a e c. Orientação Norte.	99
Tabela 9 - Autonomia de luz natural espacial em modelos difusos e especulares. Orientação Oeste.	123
Tabela 10: Insolação das Fachadas Norte, Leste, Oeste e Sul	129
Tabela 11 - Matrizes de correlação. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul	134
Tabela 12 - Efeitos de cada característica em relação à variação da eficiência da luz solar refletida	136
Tabela 13 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida. Orientação Norte.....	152
Tabela 14 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida. Orientação Leste	152
Tabela 15 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida. Orientação Oeste.....	153
Tabela 16 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida. Orientação Sul	153
Tabela 17 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância. Forma côncava. Orientação Leste.....	160
Tabela 18 – Iluminância média anual em relação ao aumento da refletância. Forma côncava. Orientação Leste	160
Tabela 19 – Uniformidade média anual em relação ao aumento da refletância. Forma côncava. Orientação Leste	161
Tabela 20 - Porcentagens de autonomia de luz natural espacial. Forma côncava. Orientação Leste	161
Tabela 21 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90% Orientação Norte	162
Tabela 22 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Norte	162
Tabela 23 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Norte	163
Tabela 24 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90% Orientação Leste	163
Tabela 25- Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Leste	163
Tabela 26 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Leste	164
Tabela 27 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças.	

Refletância 90% Orientação Oeste	164
Tabela 28 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças.	
Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Oeste	164
Tabela 29 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças.	
Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Oeste	165
Tabela 30 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças.	
Refletância 90% Orientação Sul.....	165
Tabela 31 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças.	
Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Sul.....	165
Tabela 32 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças.	
Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Sul.....	166
Tabela 33 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade.	
Orientação Norte.....	167
Tabela 34- Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade.	
Orientação Leste	167
Tabela 35 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade.	
Orientação Oeste.....	168
Tabela 36- Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade.	
Orientação Sul	168
Tabela 37 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Norte	169
Tabela 38 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Leste.....	170
Tabela 39 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste	171
Tabela 40 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Sul	172
Tabela 41- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Norte	173
Tabela 42 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Leste.....	173
Tabela 43- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Oeste	174
Tabela 44 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Sul.....	174
Tabela 45 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Norte	175
Tabela 46 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Norte.....	175
Tabela 47 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Leste.....	175
Tabela 48 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Leste	176
Tabela 49 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Oeste	176
Tabela 50 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Oeste	176
Tabela 51 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Sul	177

Tabela 52 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Sul.....	177
Tabela 53- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade dos dispositivos. Orientação Norte.....	178
Tabela 54 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade dos dispositivos. Orientação Leste	178
Tabela 55- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade dos dispositivos. Orientação Oeste.....	179
Tabela 56 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade dos dispositivos. Orientação Sul.....	179
Tabela 57 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Norte	180
Tabela 58 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Leste.....	181
Tabela 59 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste	182
Tabela 60 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Sul	183
Tabela 61 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Norte	184
Tabela 62- Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Leste.....	184
Tabela 63 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Oeste	185
Tabela 64- Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Sul.....	185
Tabela 65 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Norte	186
Tabela 66 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Norte.....	186
Tabela 67 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Leste.....	186
Tabela 68 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Leste	187
Tabela 69 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Oeste	187
Tabela 70 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Oeste.....	187
Tabela 71 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Sul.....	188
Tabela 72 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Sul.....	188
Tabela 73 – Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Norte.....	189
Tabela 74 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Leste	189
Tabela 75 – Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Oeste.....	190
Tabela 76 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da	

especularidade. Orientação Sul.....	190
Tabela 77 – Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Norte.....	191
Tabela 78 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Leste.....	192
Tabela 79 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste.....	193
Tabela 80 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Sul.....	194
Tabela 81 – Autonomia de luz natural espacial. Orientação Norte.....	195
Tabela 82 - Autonomia de luz natural espacial. Orientação Leste.....	195
Tabela 83 - Autonomia de luz natural espacial. Orientação Oeste.....	196
Tabela 84 - Autonomia de luz natural espacial. Orientação Sul.....	196

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características de sistemas de sombreamento utilizadas em estudos de avaliação da iluminação natural.....	56
Quadro 2 - Tipos de céus propostos pela CIE.....	63
Quadro 3 - Intervalos de Iluminância Útil de Luz Natural.....	66
Quadro 4 - Sistemas de dispositivos de sombreamento por orientação.....	77
Quadro 5 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Norte.....	79
Quadro 6 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Leste.....	79
Quadro 7 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Oeste.....	79
Quadro 8 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Sul.....	80
Quadro 9 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Norte.....	80
Quadro 10 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Leste.....	81
Quadro 11 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Oeste.....	81
Quadro 12 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Sul.....	82
Quadro 13 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Norte.....	83
Quadro 14 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Leste.....	83
Quadro 15 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste.....	84
Quadro 16 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Sul.....	84
Quadro 17 - Nomenclatura e características dos modelos de dispositivos de sombreamento.....	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALNe	Autonomia de luz natural espacial;
η_{sr}	Eficiência de luz solar refletida
E_{ma}	Iluminância média anual
ΔE_{ma}	Variação da Iluminância média anual
U_{ma}	Uniformidade média anual
ΔU_{ma}	Variação da uniformidade média anual
IULN	Iluminância útil de luz natural
ALN	Autonomia de luz natural
FLD	Fator de luz do dia
ESA	Exposição solar anual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos	23
1.2	Estrutura da tese	23
2	DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO E LUZ SOLAR REFLETIDA.....	25
2.1	A abertura como fonte de luz	26
2.2	O contexto climático: inovações tecnológicas x clima	28
2.3	Efeitos não visuais da luz natural	29
2.4	Luz solar	30
2.4.1	Fontes de luz solar refletida.....	32
2.5	Dispositivos de captação e controle da luz	34
2.5.1	Sistemas tradicionais	36
2.5.2	Brisas	40
2.6	Sistemas avançados de iluminação natural	45
2.6.1	Sistemas de condução da luz	46
2.6.2	Sistemas de refração da luz	48
2.6.3	Sistemas com refletores especulares de luz	50
2.6.4	Brisas e o redirecionamento da luz.....	53
2.7	Parâmetros para avaliação dos dispositivos de sombreamento em relação à eficiência da luz solar refletida	54
3	AValiação DO DESEMPENHO DA ILUMINAÇÃO NATURAL E CLIMA DE MACEIÓ	58
3.1	Ferramentas de simulação da iluminação natural	58
3.1.1	O programa TropLux	61
3.2	Indicadores para avaliação do desempenho da iluminação natural	64
3.2.1	Disponibilidade da iluminação natural	64
3.2.2	Uniformidade.....	68
3.2.3	Limitações	68
3.3	Caracterização do clima de Maceió	69
4	MÉTODOS.....	74
4.1	Ambiente-modelo objeto da pesquisa	74
4.2	Configuração e parametrização de modelos de dispositivos de sombreamento	76
4.2.1	Número de peças dos sistemas	78
4.2.2	Especularidade dos dispositivos	80
4.2.3	Refletância das superfícies dos dispositivos.....	82
4.3	Definição dos indicadores de desempenho para avaliação da iluminação natural	84

4.4	Eficiência da luz solar refletida.....	86
4.5	Definição do software utilizado	87
4.6	Parâmetros de simulação	87
4.7	Análise dos resultados	88
5	RESULTADOS	91
5.1	Orientação Norte.....	91
5.1.1	Eficiência da luz solar refletida (η_{sr})- Orientação Norte.....	91
5.1.2	Indicadores de desempenho- Orientação Norte.....	93
5.2	Todas as orientações analisadas	101
5.2.1	Eficiência da luz solar refletida (η_{sr})- Todas as orientações	101
5.2.2	Indicadores de desempenho- Todas as orientações	102
5.3	Especularidade e refletância	113
5.3.1	Eficiência da luz solar refletida (η_{sr})- Especularidade e refletância	113
5.3.2	Indicadores de desempenho- Especularidade e refletância	116
5.4	Análise estatística dos dados.....	129
5.4.1	Influência dos parâmetros para a eficiência da luz solar refletida.....	129
5.4.2	Correlação entre eficiência da luz solar refletida e indicadores de desempenho	134
6	CONCLUSÃO	138
6.1	Recomendações para o projeto de dispositivos de sombreamento	139
6.2	Luz solar refletida e geometria da insolação	141
6.3	Limitações da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros	143
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
	APÊNDICE A – Percentuais de variação de η_{sr}.....	152
	APÊNDICE B – Influência da forma de dispositivos de sombreamento para a eficiência da luz solar refletida	154
	APÊNDICE C – Dados de simulação.....	162

1 INTRODUÇÃO

O projeto das aberturas de edificações reflete a preocupação com o aproveitamento dos recursos naturais no interior dos ambientes ao longo da história. Durante muito tempo as limitações estruturais não permitiram que os usuários usufríssem de uma grande quantidade de luz nos espaços internos, mas após o surgimento de novas técnicas e materiais, como o arco e o vidro, por exemplo, as possibilidades de captação de luz natural foram ampliadas (MOORE, 1991).

A energia elétrica emergiu trazendo as facilidades da iluminação e refrigeração artificiais e, juntamente com a evolução das técnicas construtivas, contribuiu para que as novas edificações fossem cada vez mais independentes do meio externo. Nesse contexto, surgem as construções sustentáveis, com o objetivo de promover o uso racional da energia elétrica e dos recursos naturais, com destaque para o maior aproveitamento da iluminação natural (GONÇALVES; DUARTE, 2006).

A promoção do conforto ambiental e do bem-estar dos usuários passou a estar relacionada, entre outros aspectos, à presença da luz natural, e os projetos arquitetônicos de residências, ambientes de trabalho e escolares, entre outros, introduziram os mais diversos recursos para captação da iluminação. Diversos estudos apontam que as características físicas do ambiente escolar, sobretudo da sala de aula, são fatores relevantes para o bom desenvolvimento das atividades e, conseqüentemente, para o desempenho dos usuários (BARRETT et al., 2015), contribuindo ainda para promoção da saúde (BOYCE, 2009; HESCCHONG MAHONE GROUP, 2003). Torna-se, portanto, relevante analisar o ambiente construído desses espaços de ensino, a fim de investigar sua adequação à realidade climática, estimulando o uso da iluminação natural nessa tipologia de edificação.

São múltiplos os critérios a serem considerados para manutenção do conforto ambiental e a questão energética pode ser inserida nesse contexto. O uso de energia elétrica em sistemas de iluminação artificial e condicionamento de ar deve ser baseado na minimização de desperdício a partir do emprego de recursos naturais. No Brasil, as maiores participações no consumo dos prédios públicos referem-se ao condicionamento de ar e à iluminação artificial, variando de 50% a mais de 70% do consumo total do setor, dependendo do segmento. Somente as demandas com iluminação, representam a segunda maior fonte de gastos, com 22% do total (ELETROBRÁS, 2017).

É importante que sejam definidas diretrizes projetuais para este tipo de ambiente, tanto para aplicação durante a fase de concepção de novos projetos, quanto para estudos de adequações dos espaços existentes. Vale salientar que o resultado deste tipo de pesquisa auxiliará também projetistas de outras áreas de atuação inseridos na realidade climática de Maceió.

O clima da cidade de Maceió, quente e úmido, caracteriza-se pelo predomínio do céu parcialmente nublado, o que torna a radiação direta intensa e frequente e impõe a necessidade de sombreamento. Segundo Cabús (2002), o mês de julho, que corresponde ao período do ano com menor quantidade de horas de insolação, apresenta percentual de 49% de probabilidade de insolação. No mês de novembro, essa probabilidade chega a quase 74%. À necessidade de sombreamento é somada a exigência de proteção contra as chuvas frequentes, aumentando a obstrução do céu.

Neste clima, a iluminação de edificações pode ser subordinada aos requisitos de proteção e de ventilação, influenciando os projetos dos edifícios e, conseqüentemente, das aberturas. Sob condições de céu claro e parcialmente nublado, o entorno e também os elementos arquitetônicos de proteção são convertidos em importantes fontes de luz difusa. Assim, a iluminação natural interior pode depender mais da luz solar refletida do que da luz natural direta (HOPKINSON et al., 1975). Segundo Baker e Steemers (2002), o projeto de iluminação solar¹ aplica-se quando a luz solar é a condição predominante. Deve-se estar atento ao potencial da luz refletida por superfícies naturais e artificiais. Planejar a forma e as características das superfícies torna-se um importante recurso para o aproveitamento da luz solar refletida.

Neste sentido, pesquisas tem confirmado que as características do entorno são fatores de grande influência na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. Nikiforiadis e Pitts (2003) afirmam que para atingir resultados confiáveis em pesquisas que utilizam simulação computacional é importante identificar todos os fatores que podem influenciar o sistema e considerá-los como parâmetros.

Laranja (2010) aponta, em revisão bibliográfica, diversos autores que dividem os fatores que influenciam a iluminação no ambiente em variáveis internas e externas à edificação. Entre elas destacam-se as dimensões do ambiente, superfícies refletoras e orientação, alturas e afastamento entre as edificações e elementos de proteção contra a radiação solar, os últimos,

¹ Tradução livre para *sunlight design*.

objeto de estudo desta pesquisa.

O uso de dispositivos de controle solar como o brise representa a retomada da preocupação da Arquitetura Moderna com a insolação dos edifícios: sua utilização permite bloquear os raios solares, garantindo visão e ventilação permanentes, e reduzindo o excesso de luminosidade dos ambientes (BITTENCOURT, 2000). Com a inserção desses elementos de controle a trajetória da luz solar refletida para o ambiente é modificada, bem como a quantidade total admitida.

Os dispositivos de sombreamento podem ser projetados para obstruir a visão do céu apenas o necessário para o sombreamento, refletindo a luz solar para o ambiente e minimizando essa perda (LAM, 1986; BAKER; STEEMERS, 2002; SOUZA; SANTOS, 2012).

Diversos estudos apontam que o uso desses elementos pode resultar em redução do consumo de energia elétrica. Pesquisa desenvolvida por Ho et al. (2008) demonstrou que uma configuração apropriada pode reduzir em até 71,5% os gastos com iluminação artificial em salas de aula em Taiwan. Chua e Chou (2010) apontaram redução de até 26,5% na carga de refrigeração do ambiente a partir da inserção de dispositivos de sombreamento em edificações residenciais.

O desempenho dos variados tipos de dispositivos depende da escolha do sistema adequado, levando em consideração as condições climáticas do local, as características da edificação, orientação, o tipo de tarefa visual a ser desenvolvida, além de aspectos estéticos e econômicos. Em regiões de clima tropical a energia solar apresenta um grande potencial de utilização. A luz natural, e, particularmente a luz solar, consequência desse abundante recurso, é uma importante ferramenta na busca por ambientes com menor consumo de energia elétrica.

Sendo assim, a quantidade de luz natural refletida e sua distribuição espacial no interior da edificação variam de acordo com diferentes padrões de dispositivos. No caso dos brises, a quantidade de peças, as características de reflexão e refletância das suas superfícies são capazes de influenciar o desempenho da iluminação e o aproveitamento da luz solar no ambiente. Neste trabalho, foi proposto um estudo paramétrico baseado na variação dessas características em sistemas de sombreamento compostos por brises.

Esta pesquisa pretende considerar a contribuição destes dispositivos para a luz solar refletida, buscando relacioná-la ao desempenho da iluminação natural no ambiente interno. Para a identificação desta contribuição, foi desenvolvido o índice de eficiência da luz solar refletida,

proposto e aplicado nesta pesquisa.

O uso deste índice será útil na identificação e classificação de dispositivos mais eficientes, e, utilizado em conjunto com indicadores, pode contribuir para um melhor desempenho da iluminação natural, auxiliando decisões na fase inicial de concepção dos projetos. O conhecimento deste fenômeno possibilita que sejam repensados o acesso e a forma de quantificação da luz solar nos ambientes internos, contribuindo, ainda, para a previsão de ambientes mais confortáveis e eficientes energeticamente.

1.1 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é estudar o desempenho de brises em salas de aula com relação à eficiência luminosa na captação da luz solar refletida na cidade de Maceió, a fim de identificar o potencial de aproveitamento da luz natural e influenciar o projeto de dispositivos de sombreamento. Os objetivos específicos são:

- Propor um índice para avaliação de dispositivos de sombreamento em relação ao aproveitamento da luz solar refletida para o interior do ambiente;
- Identificar padrões de sistemas de proteção solar inseridos em aberturas laterais mais eficientes em refletir a luz solar para o ambiente diante da influência das seguintes características dos dispositivos de sombreamento:
 - Número de peças;
 - Difusividade e especularidade das superfícies dos dispositivos;
 - Refletância das superfícies dos dispositivos.
- Analisar a relação existente entre a luz solar refletida por dispositivos de sombreamento e o desempenho da iluminação natural em salas de aula na cidade de Maceió;
- Propor recomendações de projeto para dispositivos de sombreamento relacionadas às orientações analisadas de acordo com a contribuição da luz solar refletida para o ambiente.

1.2 Estrutura da tese

Este trabalho divide-se em cinco partes. A primeira parte compreende a introdução e estabelece os objetivos da tese. A introdução destaca a importância da definição de diretrizes

projetuais para ambientes de sala de aula relacionadas ao conforto ambiental e, particularmente, à iluminação natural, indicando a relevância do uso de dispositivos de sombreamento diante do potencial da luz solar na realidade climática de Maceió.

A segunda parte é composta pelas seções 2 e 3 e corresponde ao referencial teórico do trabalho. A seção 2 trata, entre outros aspectos, da evolução das aberturas com a finalidade de levar iluminação natural para o interior das edificações, destacando os diversos tipos de dispositivos de sombreamento disponíveis e evidenciando as características de sistemas compostos por brises que são capazes de promover maior redirecionamento da luz solar refletida. A seção 3 apresenta discussão a respeito das ferramentas e dos indicadores disponíveis para avaliação do desempenho da iluminação natural, além de indicar as principais características do clima da cidade de Maceió. Os tópicos abordados nestas seções possibilitaram o delineamento dos procedimentos metodológicos da pesquisa.

A terceira parte consiste na exposição do método de trabalho (seção 4). São apresentadas as características do modelo utilizado, que corresponde a um ambiente de sala de aula com abertura provida de proteção através de dispositivos de sombreamento. A parametrização para o estudo é definida e tem como resultado a variação do número de peças, difusividade e especularidade e refletância desses dispositivos, levando em consideração as orientações Norte, Leste, Oeste e Sul, dando origem a 156 modelos. Ainda nesta etapa é definida a ferramenta para simulação computacional dos modelos – o programa TropLux 7 – os indicadores para avaliação do desempenho da iluminação natural e a eficiência da luz solar refletida, índice proposto nesta pesquisa.

A seção 5 representa a quarta parte e apresenta os resultados das análises desenvolvidas nesta pesquisa que correspondem ao estudo da eficiência da luz solar refletida e sua relação com indicadores de desempenho da iluminação natural. Esta seção compreende dois tipos de análise: análise exploratória e análise estatística.

A conclusão apresenta a correspondência entre objetivos estabelecidos e resultados encontrados na pesquisa, indicando recomendações para o projeto de dispositivos de sombreamento em relação ao aproveitamento da luz solar refletida.

2 DISPOSITIVOS DE SOMBREAMENTO E LUZ SOLAR REFLETIDA

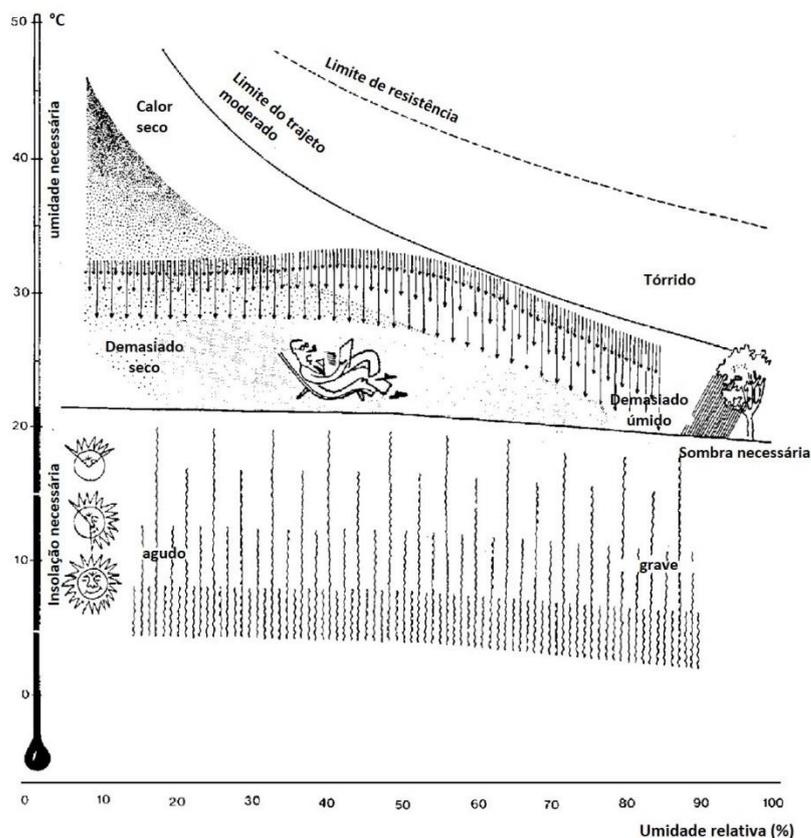
A arquitetura do passado, de maneira notável, buscava a admissão de luz somente onde era desejado: janelas e aberturas zenitais tinham importante destaque no conjunto da estrutura e proporcionavam, como resultado, mudanças constantes nos níveis de iluminação natural em uma edificação ou até mesmo em um ambiente (MOORE, 1991). Pode-se afirmar que a função das aberturas de garantir integração entre o interior e o exterior das edificações ganhou novos significados e requisitos, confundindo-se com a história da Arquitetura.

É comum observar em construções com fins religiosos que a presença de aberturas localizadas de maneira estratégica, próximo a locais importantes como altares, tinha a finalidade de promover destaque a tais espaços, já que a luz natural era associada ao misticismo e divindade. A abertura em uma edificação caracteriza, portanto, tendências e estilos arquitetônicos desde as primeiras referências históricas, levando em consideração ainda a realidade climática de cada localidade.

De acordo com Olgyay e Olgyay (1963), a adaptação das edificações ao clima tem sido uma problemática constante ao longo dos séculos e a expressão arquitetônica deve ser precedida pelo estudo de variáveis climáticas, biológicas e tecnológicas. Os autores foram pioneiros na análise do chamado balanço térmico, indicando os principais elementos do clima que afetam o conforto térmico e desenvolvendo a carta bioclimática, representação gráfica da relação entre conforto e clima, por meio da indicação da chamada “zona de conforto” (ver Figura 1).

Diante da necessidade de se considerar o conforto dos usuários das edificações como requisito fundamental, e com a disseminação dos princípios da arquitetura bioclimática, as aberturas passaram a configurar sistemas mais complexos, com a função de maximizar suas propriedades de ventilação e também de iluminação natural.

Figura 1 - Carta bioclimática esquemática



Fonte: Adaptado de Olgyay e Olgyay, 1963

Em relação à luz natural, sistemas como dispositivos de sombreamento, inicialmente pensados para bloquear a luz solar direta nem sempre desejada, foram otimizados através do desenvolvimento de novos materiais e tecnologias e passaram a constituir importante recurso para o incremento da iluminação natural no ambiente interno.

2.1 A abertura como fonte de luz

A evolução das aberturas ao longo da história foi condicionada pelas inovações técnicas e pelos estilos arquitetônicos sendo responsável por determinar não apenas a aparência externa das edificações, mas também toda a sua forma (PHILLIPS, 2004). Em climas extremos, sobretudo onde o calor e a luz solar são intensos, a arquitetura vernácula teve grande expressão através do controle solar. Em climas quentes e úmidos, habitações primitivas consistiam em grandes coberturas suspensas que mantinham o sol afastado e garantiam sombra; em climas quentes e áridos destacam-se os muxarabis confeccionados em madeira, que minimizavam a penetração do sol em ângulos maiores, ao mesmo tempo em que transmitiam luz refletida difusa

para o ambiente (BAKER; STEEMERS, 2002).

Também é notável, em alguns períodos da história, que as aberturas eram exploradas com a finalidade de despertar sensações. Em alguns templos egípcios (ver Figura 2) a luz natural era admitida através de aberturas voltadas para a posição do sol em determinados períodos, e por aberturas zenitais preenchidas por grelhas de pedra, com a finalidade de suavizar e tornar a luz solar uma fonte de luz difusa, a partir das múltiplas reflexões (MOORE, 1991).

Figura 2 - Templo de Amun, Kamak, Egito. Seção indicando a forma pela qual a luz solar intensa é filtrada para o interior através de fendas de pedra



Fonte: Adaptado de Baker e Steemers (2002)

As limitações estruturais desses períodos não permitiram que grande quantidade de luz natural fosse levada para o interior dessas edificações. A invenção do arco, abóbada e cúpula pelos romanos e seu uso combinado ao vidro permitiram que grandes espaços levassem luz ao ambiente, recurso bastante utilizado nas naves de importantes basílicas deste período. Segundo Baker e Steemers (2002), a associação de Deus com a luz destaca-se no período gótico. A evolução estrutural permitida pelo uso de arcobotantes e contrafortes na sustentação de abóbadas favoreceu a utilização de grandes vãos de janelas preenchidos com vitrais, acentuando a sensação de mistério nas catedrais góticas.

A evolução tecnológica mudou os requisitos das aberturas tradicionais. Até o início do século XIX, os arquitetos dispunham da envoltória da edificação como principal mediadora entre as condições do ambiente externo e interno: a iluminação era proporcionada sobretudo pela luz natural e determinada pelo clima, dimensões de aberturas e localização das atividades (MOORE, 1991).

Porém, a Revolução Industrial provocou importantes mudanças a partir das inovações

construtivas inerentes a esse período e os projetistas conheceram a liberdade de construir sem preocupação com todos os requisitos que determinavam suas formas. Assim, a combinação de energia elétrica com novas tecnologias, como o ar condicionado e a lâmpada fluorescente, influenciaram as possibilidades arquitetônicas: a edificação poderia ser totalmente independente do clima, sendo artificialmente iluminada, refrigerada e aquecida.

2.2 O contexto climático: inovações tecnológicas x clima

A Arquitetura Moderna² emergiu em um contexto de grandes transformações sociais e tecnológicas e registrou a mudança gradual da existência rural à urbana no mundo em industrialização. A Revolução Industrial criou novos problemas, forneceu novos métodos de construção, como o aço, e sugeriu novas formas: o uso do ferro e do vidro permitiu que grandes panos de vidro otimizassem a transparência e esse tipo de construção totalmente envidraçada e transparente tinha um impacto poderoso na arquitetura (MOORE, 1991). Arquitetos como Walter Gropius e Mies van der Rohe destacaram-se no uso dessas novas tecnologias. A Figura 3 exemplifica esta tendência, mostrando os edifícios de apartamentos Lake Shore Drive de van der Rohe, construídos na cidade de Chicago.

A respeito do ambiente construído, o estudo dos precedentes arquitetônicos mostra, a partir da Segunda Guerra Mundial (1930-1945), a banalização da arquitetura do chamado Estilo Internacional acompanhada pela crença de que a tecnologia de sistemas prediais oferecia meios para o controle total das condições ambientais de qualquer edifício e tal atitude teve como consequência a repetição das caixas de vidro e o consumo exagerado de energia nas décadas seguintes, espalhando-se por cidades de todo o mundo. Gonçalves e Duarte (2006) destacam, porém, que levando em consideração a história da arquitetura e das cidades, foi durante pouco tempo que as premissas fundamentais de projeto e seu impacto nas condições de conforto ambiental e no consumo de energia não foram consideradas determinantes.

² Movimento que surgiu durante o final do século XIX e início do século XX ao qual implicava uma concentração da arquitetura na função e na estrutura das edificações, buscando a fuga do ornamento característico do passado (CURTIS, 2008). No Brasil as manifestações da arquitetura moderna iniciaram-se na década de 1920 com o objetivo de produzir uma identidade nacional, simbolizando o avanço e o progresso da nação (CAVALCANTI, 2006).

Figura 3 - Lake Shore Drive Apartment Buildings, do arquiteto Mies van der Rohe: destaque para fachadas totalmente envidraçadas, Chicago, 1948–51



Fonte: ETHERINGTON, 2010

É dentro desta perspectiva que surgem as chamadas edificações sustentáveis, concebidas para fazer o uso racional de recursos naturais, utilizar materiais ecologicamente corretos e alterar o mínimo possível o ambiente no qual estão inseridas. Como consequência, tem-se ambientes capazes de atender a requisitos que vão além daqueles relacionados ao conforto físico dos usuários.

2.3 Efeitos não visuais da luz natural

A abertura, enquanto componente da envoltória do edifício, viabiliza as trocas entre o ambiente e seu exterior, e suas múltiplas funções podem ser divididas entre variáveis físicas e psicológicas. Entre as variáveis físicas, destacam-se as suas funções de ventilação, aquecimento e iluminação e entre as psicológicas, está sua capacidade de permitir ao usuário vivenciar seu entorno através do acesso à vista do exterior, à luz do céu e à luz solar (PEREIRA, 1992).

As pessoas preferem ambientes providos de janelas e algumas pesquisas tem provado os seus benefícios entre vários tipos de usuários, tanto para permitir o uso adequado da luz natural, quanto para garantir a vista da paisagem (HESCCHONG MAHONE GROUP, 2003; WEBB, 2006). Psicólogos destacaram a importância deste estímulo visual no processo de aprendizado e estudos mostraram que alunos de salas de aula com maiores áreas de janelas foram capazes de responder 15% mais rápido a testes de matemática e 23% em atividades de leitura que alunos de salas com menores áreas de janela (HESCCHONG MAHONE GROUP, 2003).

Embora o uso da luz natural enquanto influência para fatores psicológicos e de comportamento humano ainda não seja prioridade no projeto de edificações, tem sido bastante investigado com objetivos específicos, associado aos estilos de vida modernos e também para tratamento clínico de doenças (WEBB, 2006).

O chamado ritmo circadiano está sincronizado com o dia e a noite através de uma resposta a altos níveis de luz no início da manhã e baixos níveis ao final da tarde, a partir da atuação de hormônios como a melatonina. É justamente a ausência desse estímulo que pode causar tanto dificuldades com o sono, quanto problemas de concentração durante o dia (BOYCE, 2009; MARDALJEVIC et al., 2011). A pele também responde à radiação incidente, sintetizando a vitamina D que é necessária para o metabolismo do cálcio e saúde do sistema ósseo, o que chama atenção para a necessidade de uma mínima exposição solar.

2.4 Luz solar

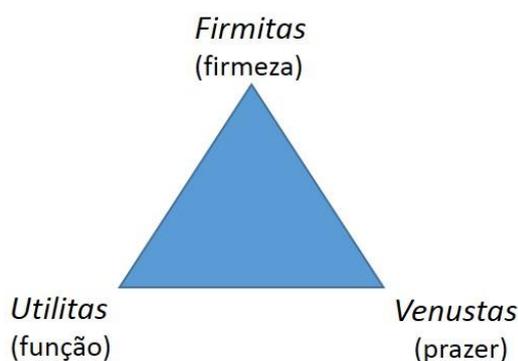
Segundo Hopkinson et al. (1975), as fontes de luz podem ser divididas em dois tipos: fonte primária, que apresenta luz própria e pode ser representada pelo sol; e fonte de luz secundária, que consiste na reflexão de luz proporcionada por um objeto que recebe luz de uma fonte primária. O sol é uma fonte de luz primária e de grande intensidade, sendo a mais potente que o projetista pode escolher. O seu uso pode ter como consequência a necessidade de mediação do conflito mais crítico do projeto de aberturas para edificações: luz solar *versus* ganhos de calor (PEREIRA, 1992). Os dois aspectos a serem considerados impactam de maneira importante no consumo energético das edificações.

Neste sentido, o trabalho de Lam (1986) chama a atenção para uma Arquitetura Moderna que negligencia os diversos benefícios trazidos pelo uso da luz solar: ambiente interior mais confortável e produtivo, satisfação de necessidades biológicas importantes para orientação e segurança, e redução nos custos com energia. Segundo o autor (LAM, 1986) os benefícios proporcionados pela luz solar cumprem a chamada tríade de Vitruvius (Figura 4), que estabelece os princípios fundamentais da arquitetura:

- Firmeza: O uso da luz solar não configura a busca por uma estética que segue tendências, mas a aplicação inteligente de recursos naturais para o cumprimento das necessidades programáticas. O uso desta fonte de luz tem como resultado edifícios cuja beleza não é transitória, mas firme e duradoura.

- **Função:** O projeto de edificações que leva em consideração a luz solar é capaz de reduzir o consumo de energia elétrica, uma vez que a iluminação artificial representa aproximadamente 50% da energia consumida em uma edificação de escritórios, por exemplo. Portanto, a luz solar caracteriza-se como um bom investimento.
- **Prazer:** Além de promover uma forma de iluminação prazerosa, a presença de luz solar permite que seja mantida a noção de lugar, tempo e clima e quando aplicada de forma a considerar as necessidades fisiológicas e psicológicas, pode produzir um ambiente interno confortável e produtivo.

Figura 4 - Tríade de Vitruvius



Fonte: Adaptado de LAM, 1986

Diante das suas características – constante movimento e alta luminância – a luz solar deve ser utilizada preferencialmente na sua forma difusa, refletida pelas superfícies do ambiente interior. Uma superfície iluminada pela luz solar direta pode ser de cinco a dez vezes mais brilhante que a mesma superfície iluminada pela luz do céu (BAKER; STEEMERS, 2002).

Planejar a forma dos elementos arquitetônicos capazes de refletir a luz solar torna-se, portanto, uma importante ferramenta na busca por edificações mais eficientes, e Pereira (1992) destaca algumas razões pelas quais a iluminação através do sol pode ser eficiente para a economia de energia elétrica:

- A luz solar está presente durante a maior parte das horas de trabalho, sobretudo no verão, o que indica que sistemas de aberturas, quando projetados adequadamente, podem proporcionar iluminação suficiente, reduzindo a demanda por iluminação artificial;
- A grande eficácia luminosa da luz solar, quando comparada com lâmpadas elétricas, representa uma solução adequada à medida que garante, além de redução

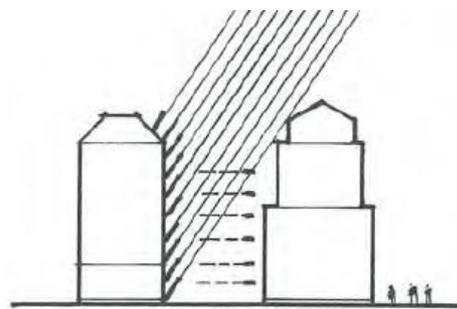
no consumo de energia elétrica para iluminação, ganhos de calor em períodos frios.

De acordo com Lam (1986), o grande número de variáveis envolvidas torna complexo o projeto de iluminação através da luz solar e exige que seu planejamento deve começar o mais cedo possível.

2.4.1 Fontes de luz solar refletida

Em climas ensolarados, a luz solar refletida em superfícies exteriores como solo, construções do entorno e dispositivos de sombreamento é uma fonte de iluminação útil para os ambientes e sua utilização pode ser otimizada diante da variação de características das aberturas. Em cenários de cânions urbanos a luz natural mais disponível para as aberturas situadas nos andares inferiores dos grandes prédios é a luz refletida pelas edificações opostas que possuem os mais variados valores de refletância (LI et al., 2009). Diversos autores dedicaram seus estudos à análise da influência da luz refletida para o desempenho da iluminação natural em ambientes internos, como pode ser visto a seguir. Indo além, algumas pesquisas destacam-se pelo desenvolvimento de metodologias para estimar a presença desta componente na iluminação interna.

Hopkinson et al. (1975) analisaram os efeitos da luz solar refletida no solo e na fachada oposta à abertura sobre a distribuição da iluminação no interior do ambiente (Figura 5). Os resultados mostraram que a luz solar refletida na fachada reduz a diferença entre a componente refletida exterior em um ponto do ambiente a 1,50m da abertura e um ponto a 6,00m da abertura de cerca de 6:1 para aproximadamente 4:1, aumentando a uniformidade de iluminação. O efeito da adição da componente refletida pelo solo seria reduzir ainda mais a diferença entre os pontos de 6:1 para 3:1. Os autores investigaram ainda os efeitos das refletâncias das superfícies para o desempenho da iluminação no ambiente.

Figura 5 - Fachada oposta como fonte secundária de iluminação

Fonte: LAM, 1986

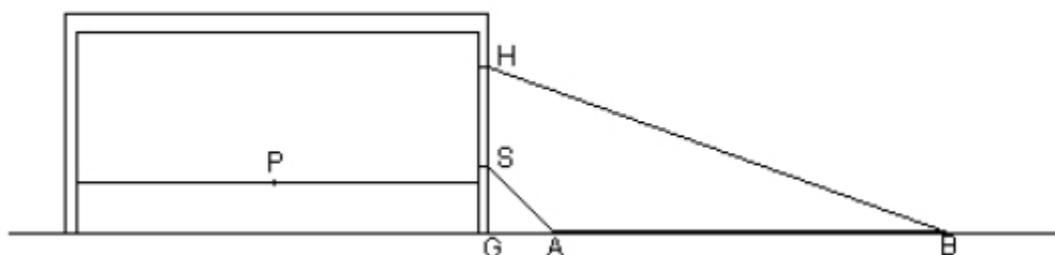
Du e Sharples (2011) investigaram o impacto de diferentes geometrias e distribuições de índices de refletância difusa para a variação da luz natural refletida internamente pelas paredes de átrios, em condições de céu encoberto. As refletâncias das paredes foram distribuídas em faixas, em padrão horizontal e vertical. Os resultados mostraram que apenas distribuições horizontais de refletâncias afetam os níveis de luz natural na área central da parede do átrio, e que variações na relação entre largura e comprimento do átrio incrementam o efeito trazido pela distribuição de refletâncias.

Cabús (2002) analisou a influência da luz natural refletida pelo solo em relação ao desempenho da iluminação natural nos ambientes do trópico úmido levando em consideração, entre outros aspectos, a influência de dispositivos de sombreamento para a componente refletida pelo solo. Através da divisão do solo em faixas, o autor identificou uma área onde o solo pode ser mais eficiente em relação à iluminação no interior do ambiente, da qual o projetista pode tirar vantagem, a partir do uso de materiais com maiores valores de refletância, conforme mostra a Figura 6. Os resultados mostraram ainda que a marquise se destaca como mais eficiente entre os demais dispositivos investigados e que a luz refletida pelo solo representa uma parte significativa da iluminação natural total no plano de trabalho, podendo chegar a 40%.

Li et al. (2009) desenvolveram um método de cálculo para estimar o fator de luz do dia vertical (*vertical daylight factor*) de fachadas rodeadas por grandes obstruções externas. O VTD é definido como a razão em percentual da iluminância da superfície vertical de um edifício pela iluminância horizontal instantânea proporcionada pelo céu desobstruído, excluindo-se a luz solar direta e levando-se em consideração ainda a luz refletida pelos edifícios do entorno e a luz refletida pelo solo. Os resultados foram comparados com sucesso, através de regressão simples, a resultados encontrados por meio de simulação computacional.

Segundo Lam (1982) é difícil utilizar o solo como principal fonte de luz de um ambiente, sobretudo em áreas densamente urbanizadas, pois para que uma área de solo seja iluminada, é necessário que haja grandes espaços livres entre as edificações. As possibilidades de uso dessa fonte de luz tornam-se mais limitadas em relação a ambientes localizados em edifícios de múltiplos andares.

Figura 6 - Faixa (AB) onde o solo pode ser mais eficiente em relação à iluminação no interior do ambiente



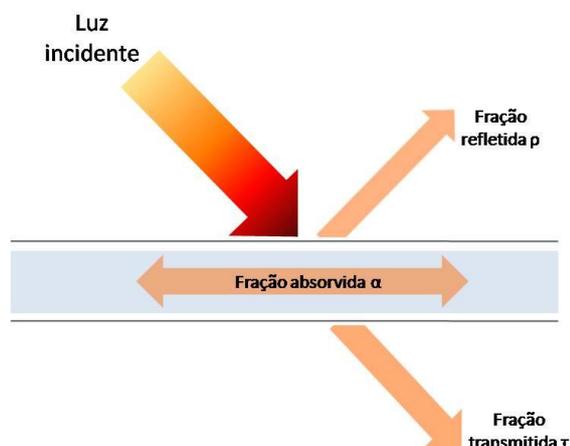
Fonte: CABÚS, 2002

Em situações onde o entorno não é capaz de proporcionar adequado aproveitamento da luz solar para o ambiente, o uso de dispositivos para captação e controle da luz inseridos em aberturas laterais pode ser um recurso útil.

2.5 Dispositivos de captação e controle da luz

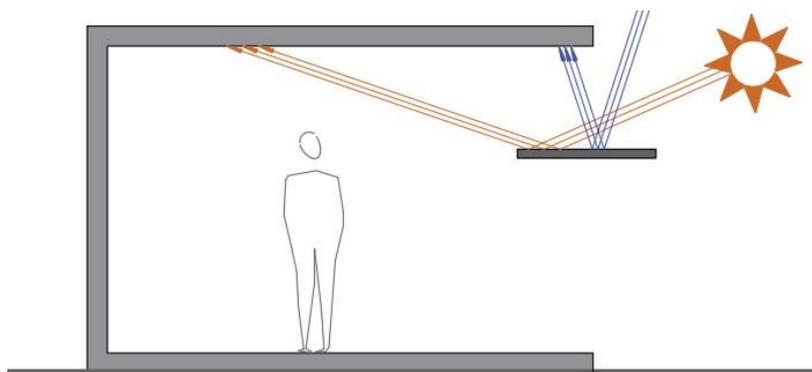
Entender a natureza da luz e seu controle por meio dos fenômenos de reflexão, transmissão e refração é necessário para conceber, diagramar e projetar as formas arquitetônicas e detalhes da iluminação solar. Quando a luz atinge uma superfície, uma fração ρ da radiação incidente é refletida e retorna ao ambiente exterior sem ultrapassar a superfície; outra fração α é absorvida pelo material e a última fração τ pode ser transmitida ao ambiente interior, o que acontece quando a superfície é transparente ou translúcida (Figura 7) (MOORE, 1991). As razões entre a energia resultante de cada um desses fenômenos e a radiação incidente são denominadas, respectivamente, refletância, absortância e transmitância.

As propriedades de materiais opacos ou transparentes variam em função da direção do ângulo de incidência da luz. Se uma superfície opaca é especular, significa afirmar que ela é capaz de refletir como um espelho. A reflexão especular é produzida por superfícies polidas, onde o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

Figura 7 - Comportamento da luz ao atingir uma superfície

Fonte: Adaptado de Moore,1991

Reflexões especulares podem ser úteis quando passíveis de controle, mas podem tornar-se um problema quando não controladas, aumentando os riscos de ofuscamento. Segundo Lam (1986), materiais refletores especulares são mais eficientes quando projetados para redirecionar a luz solar, sendo capazes de interceptar e conduzi-la para uma área de mesmo tamanho no interior do ambiente (Figura 8). Por outro lado, são menos eficientes quando proporcionam apenas pequenas mudanças de direção da luz solar.

Figura 8 - Materiais refletores especulares são mais eficientes para redirecionar a luz solar

Fonte: Adaptado de LAM,1986

Superfícies opacas e transparentes também podem ser classificadas como difusas. Materiais difusos tem como característica a existência de irregularidades nas suas superfícies, o que resulta em reflexão ou transmissão da luz incidente em todas as direções. O brilho da superfície resultante deste fenômeno será o mesmo visto a partir de qualquer ângulo, devido à

redistribuição da energia, proporcionando maior suavidade à iluminação (LAM, 1986).

Segundo Baker e Steemers (2002), uma perfeita difusão da luz é muito rara, considerando as propriedades dos materiais de construção. Porém, em uma situação onde haja múltiplas reflexões da luz, o comportamento geral deste processo se aproximará de um perfeito fenômeno de difusão. A maioria dos materiais disponíveis possui características de reflexão mista, sendo capaz de produzir reflexões difusas e especulares. A efetiva refletância de uma superfície é menor se essa superfície for complexamente configurada (LAM, 1986).

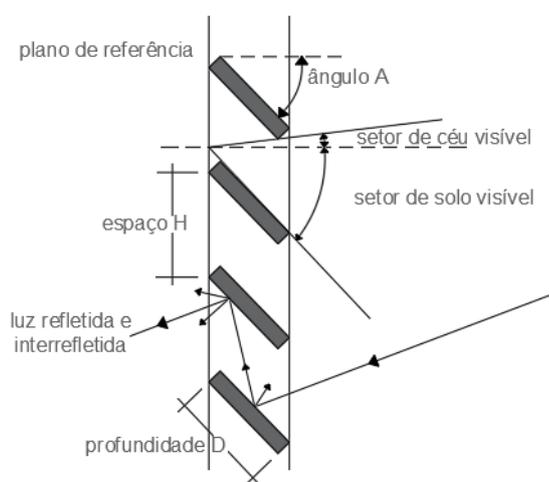
Com base no conhecimento dos mecanismos de manipulação da luz natural e sua interação com os elementos construtivos da edificação, sistemas de iluminação natural têm sido desenvolvidos com a finalidade de coletar e redistribuir a luz natural no interior do ambiente.

2.5.1 Sistemas tradicionais

Na busca por uma arquitetura que utilize recursos energéticos solares, e diante da necessidade de economia de energia, destaca-se a importância de elementos arquitetônicos e sistemas de aberturas que favoreçam o uso da iluminação natural, protegendo os espaços da luz direta do sol e prevenindo ganhos de calor desnecessários (FROTA, 2001). No contexto climático do Brasil, país que possui grande parte do seu território situado entre o Equador e o Trópico de Capricórnio, estes aspectos devem ser adequadamente controlados.

Os dispositivos de sombreamento, quando bem projetados, podem garantir comportamento seletivo da radiação solar, permitindo que os raios solares passem pelas aberturas somente nos períodos desejados. O projeto de um dispositivo de sombreamento exige um maior conhecimento da geometria da insolação da localidade em questão (OLGYAY; OLGAY, 1973). O conhecimento dos ângulos de azimute e altura solar é fundamental para a utilização dos métodos usuais de projeto desses elementos.

Segundo Baker e Steemers (2002) a admissão de luz de forma controlada por meio das aberturas e de seus elementos proporciona melhores condições de iluminação, evitando-se a insolação direta no ambiente. Esse comportamento é característico da variação da direção da luz para o ambiente interno através dos múltiplos processos de reflexão e interreflexão entre os elementos de controle solar, conforme ilustra a Figura 9. Portanto, além da definição geométrica, é necessário que sejam planejadas ainda as características de reflexão desses dispositivos (BAKER; STEEMERS, 2002).

Figura 9 - Efeito do ângulo e das características dos brises

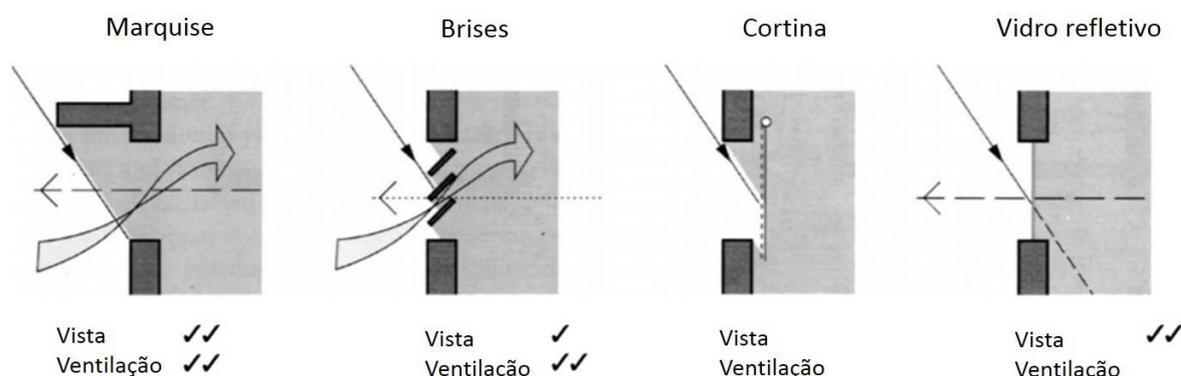
Fonte: Adaptado de Baker e Steemers (2002).

A função dos dispositivos de sombreamento vai além, portanto, de excluir a luz solar indesejada: esses elementos podem ser utilizados para redirecionar a luz natural para áreas mais distantes das aberturas. Diversos estudos têm investigado o desempenho de dispositivos de sombreamento (KRUGER; DORIGO, 2008; FRANCO, 2007; SANTOS; SOUZA, 2012; DUBOIS, 2003) confirmando sua importância para o uso adequado da iluminação natural em ambientes internos.

Diante do crescente desenvolvimento tecnológico, os projetistas dispõem de uma grande quantidade de soluções para as envoltórias das edificações com o objetivo de promover o sombreamento de suas aberturas. Aliado a isso, o avanço nos processos de simulação computacional e maior facilidade para o desenvolvimento de estudos paramétricos permitem acesso a soluções projetuais de dispositivos de sombreamento adequadas para diversas realidades climáticas (MARDALJEVIC et al., 2011).

É importante também que, para a escolha de um sistema de abertura de uma edificação, seja levado em consideração o resultado plástico da solução e as suas demais funções, como por exemplo, a possibilidade de vista ao exterior e ventilação. Baker e Steemers (2002), representam na Figura 10 os requisitos de diferentes dispositivos de sombreamento que vão além do desempenho da iluminação natural.

Figura 10 - Desempenho de dispositivos de sombreamento em relação à ventilação e visão ao exterior



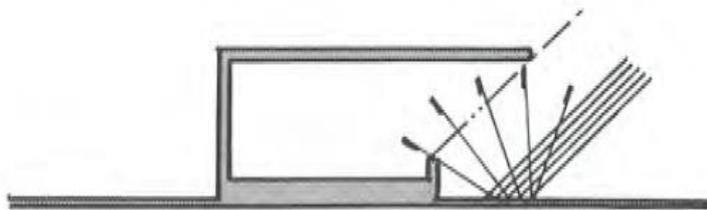
Fonte: Adaptado de Baker e Steemers (2002)

O sombreamento de uma abertura, caracterizado pelo controle da radiação direta, pode ser estabelecido de diferentes formas, através do uso de vidros especiais, marquises, prateleiras de luz e brises, por exemplo. Segundo Felipe (2016), os vidros para controle solar disponíveis no mercado mais utilizados em edificações são os vidros refletivos, duplos ou triplos, com tratamento de baixa emissividade e espectralmente seletivos. Os vidros refletivos têm como característica a redução da radiação em todos os períodos e na mesma proporção, considerando-se suas parcelas visíveis e não visíveis, direta e difusa, o que resulta em uma importante redução da iluminação nos períodos de baixa disponibilidade de luz natural, afetando diretamente o uso de luz artificial (SILVA, 2014).

Felipe (2016) comparou o desempenho luminoso de sistemas de aberturas compostos por vidros de diferentes características de controle solar e dispositivos de sombreamento. Os dispositivos de sombreamento analisados, brises horizontais e verticais, apresentaram melhor performance em relação à promoção da iluminação natural do ambiente, ampliando em mais de 140% a Autonomia de Luz Natural de 300lx e 70% os ganhos na Iluminância Útil de Luz Natural (100 a 2.000lx).

As marquises são elementos horizontais de proteção que oferecem uma solução simples de sombreamento e controle de ofuscamento, sobretudo nas áreas próximas às aberturas, podendo ser eficientes em diversas situações. Muitas vezes as marquises caracterizam-se como a extensão das cobertas. Porém, como não são definidas como elementos de redirecionamento, é necessário que haja uma área suficiente de solo no entorno disponível para que seja utilizada como fonte primária de iluminação da luz refletida, como mostra a Figura 11 (LAM, 1986).

Figura 11 - Redirecionamento da luz natural pelo solo, sendo a marquise uma fonte secundária



Fonte: LAM, 1986

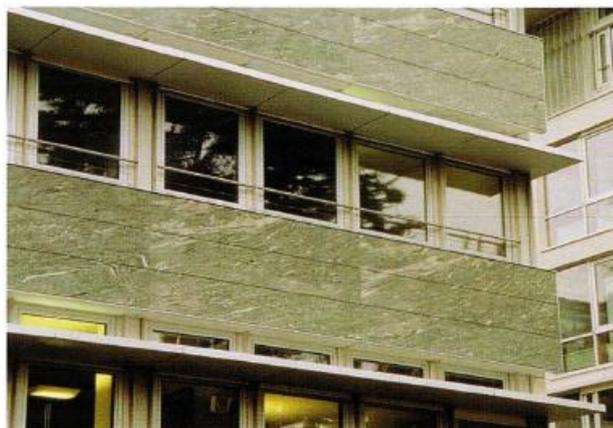
Nas situações onde não há área suficiente de solo disponível, a função das marquises de bloquear a luz solar direta resume-se aos períodos em que o sol não está baixo no horizonte, o que torna este elemento menos eficiente no caso das orientações Leste e Oeste. Para uma proteção efetiva das aberturas laterais, deverá ser previsto o uso de outro elemento de proteção, como persianas, instaladas no interior, e que poderão influenciar negativamente a iluminância adequada para o desempenho das atividades no ambiente (LEE; TAVIL, 2007).

Prateleiras de luz são elementos dispostos também na horizontal ou próximo a esta posição, que promovem o sombreamento de parte inferior da janela, em condições de maior altura solar, do mesmo modo que a marquise, ao mesmo tempo em que refletem a luz através da sua superfície superior para o interior do ambiente. Geralmente a prateleira é instalada de maneira a dividir a janela em duas partes: uma inferior, que garante a vista ao exterior, e outra superior (LITTLEFAIR, 1999), estendendo-se ou não para o interior do ambiente e garantindo visão permanente ao exterior (Figura 12).

A prateleira de luz não é um elemento novo, mas pesquisas têm estimulado os projetistas a usarem esses elementos (BELTRÁN et al., 1994; GRAZIANO, 2000; FRANCO, 2007; MANHAS, 2016). Em relação ao custo de investimento, as prateleiras de luz apresentam vantagem em longo prazo comparando-se a dispositivos de controle solar como cortinas e persianas (GRAZIANO, 2000).

Graziano (2000) estudou o desempenho de prateleiras de luz em modelo físico e virtual, a partir da variação de parâmetros como inclinação do dispositivo e refletância de sua superfície, na cidade de Florianópolis. Os resultados obtidos mostraram que o dispositivo altera o desempenho da abertura em relação à distribuição da luz no ambiente, reduzindo os níveis de luz natural nas áreas próximas à abertura. Porém, segundo o autor, o incremento observado nos níveis de iluminação do interior do ambiente em comparação à janela sem prateleira é pouco significativo.

Figura 12 - Aplicação de prateleira de luz para proteção solar em aberturas laterais



Fonte: BAKER; STEEMERS, 2002)

Franco (2007) comparou o desempenho de prateleiras de luz com ajuste de inclinação automático na cidade de São Paulo e obteve como resultado o incremento na disponibilidade de luz natural no interior do modelo físico em escala estudado em sua pesquisa. O ganho de calor entre os modelos com prateleiras passivas e automáticas manteve-se o mesmo, sendo menor que os ganhos provenientes de uma fachada desprotegida, e maiores em comparação com o desempenho de brises (FRANCO, 2007), que são capazes de proteger completamente a abertura contra a radiação solar direta nas suas diversas orientações.

2.5.2 Brises

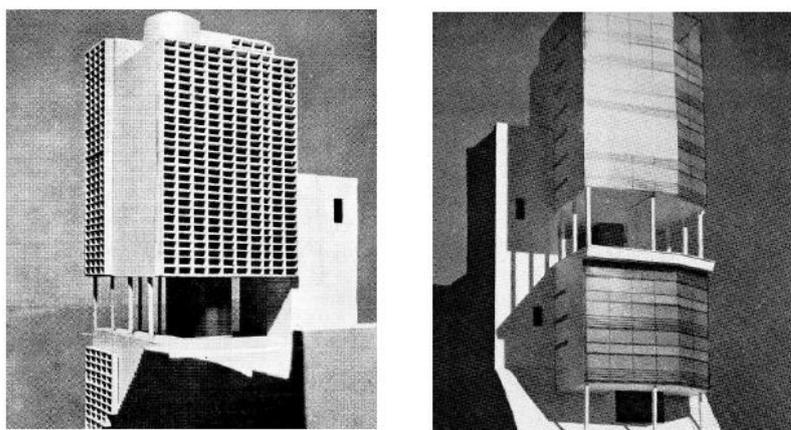
O brise é um elemento construtivo constituído por peças em formato de lâminas, geralmente dispostas paralelamente e instaladas, na maioria das vezes, externamente à abertura, protegendo as superfícies verticais da edificação contra a radiação solar direta. A função destes dispositivos é sombrear com o objetivo de minimizar a incidência do sol sobre a abertura, proporcionando melhores condições de temperatura e controle da incidência solar, e consequentemente, reduzindo o consumo de energia com o condicionamento de ar (SILVA, 2014).

Le Corbusier ganhou destaque na utilização da luz natural em favor dos princípios racionais do movimento moderno, dedicando-se ao estudo das aberturas e de sua consequência plástica para o edifício. A ampla utilização da pele de vidro nas fachadas das edificações na Arquitetura Moderna alterou a relação entre o ambiente interno e o clima, enfatizando o problema do sobreaquecimento proporcionado por esse material construtivo (MOORE, 1991). O uso da fachada envidraçada em regiões de clima quente exigia certa adaptação através do

emprego de alguns dispositivos capazes de combater a insolação e o calor excessivos.

No início da década de 1930 a arquitetura produzida por Le Corbusier destacou-se por indicar a necessidade de busca por novas posturas no ato de projetar utilizando a luz natural como um dos meios para uma arquitetura consciente. Os apartamentos Ponsik de 1932 (ver Figura 13), projetados por Le Corbusier para a Argélia, mostravam como um edifício alto poderia combinar as fachadas de vidro com o painel de lâminas protetoras: na orientação Norte, a fachada totalmente envidraçada; no Leste uma pequena área de aberturas é locada sem necessidade de controle solar; no Sul e Oeste os brises são instalados (OLGYAY; OLGAYAY, 1976). Nesse projeto a necessidade de proteção demandada por cada fachada/orientação foi aliada à solução plástica encontrada.

Figura 13 - Apartamentos de Ponsik, Argélia, do arquiteto Le Corbusier. 1930-32: Fachadas compostas por brises e panos de vidro de acordo com a orientação do edifício



Fonte: OLGAYAY; OLGAYAY, 1973

No Brasil, como consultor do projeto do Ministério da Educação e Saúde de Lúcio Costa e equipe no Rio de Janeiro em 1936, Le Corbusier teve que lidar com a escolha entre uma vista desejável e os problemas da exposição ao sol de fechamentos transparentes (OLGYAY; OLGAYAY, 1973). Além de buscar o aproveitamento adequado da iluminação natural para cada orientação, o memorial descritivo do projeto do Ministério da Educação e Saúde enfatiza ainda a preocupação dos projetistas em garantir a ventilação permanente entre a fachada e os protetores horizontais, através de um distanciamento de 50cm entre tais elementos, e do uso de elementos verticais fixados em apenas dois pontos da estrutura, com o intuito de evitar transmissão de calor por condução, como mostra a Figura 14 (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). Durante o desenvolvimento deste projeto, a teoria de Le Corbusier foi posta em prática em larga escala e a partir daí os brises tornaram-se quase uma marca da arquitetura brasileira (SILVA,

2014).

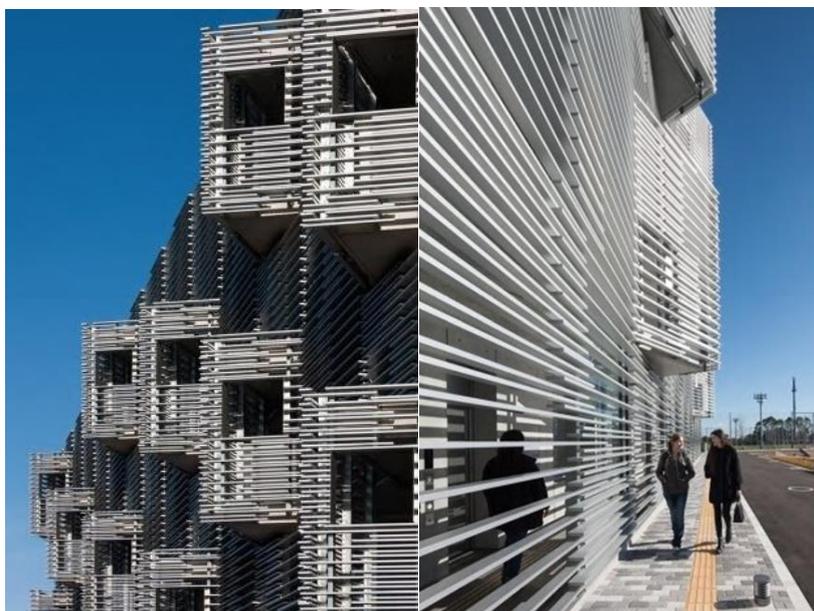
Figura 14 - Ministério da Educação e Saúde, Rio de Janeiro, 1936. Detalhe do sistema de brises utilizado para proteção das aberturas



Fonte: SANTOS, 2014

Segundo Bittencourt (2000), durante esse período o sentimento de nacionalidade, "de país tropical", proporcionou à arquitetura uma adequação física da construção ao clima, na busca por uma expressão plástica que caracterizasse sua identidade cultural. Assim, o *brise-soleil* foi desenvolvido e amplamente utilizado pela arquitetura moderna brasileira em resposta à necessidade climática. Os brises também se caracterizam pela expressão formal marcante e adquirem grande importância compondo as obras realizadas entre os anos de 1930 e 1960 (GUTIERREZ; LABAKI, 2005). Diante das vantagens apresentadas, é muito comum a utilização de brises por projetistas em obras atuais e em diversas realidades climáticas. A Figura 15 corresponde ao alojamento estudantil em Togane, no Japão, onde sistemas de grelha em alumínio de tamanhos variados desempenham a função de brises, protegendo toda a fachada principal.

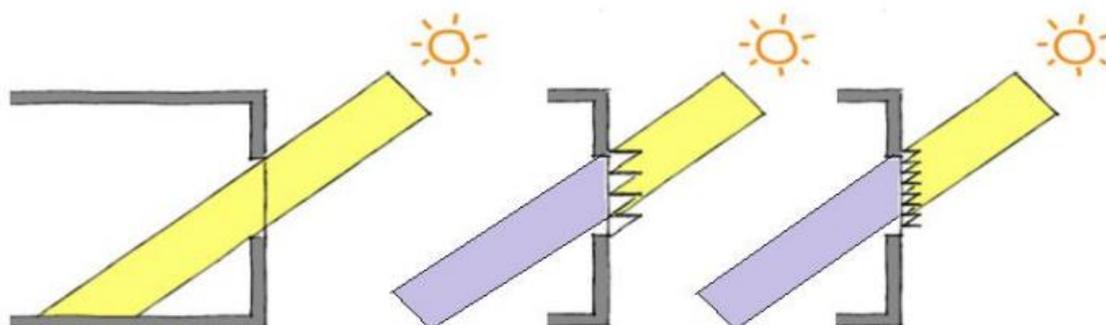
Figura 15 - Alojamento Estudantil, Josai International University, Togane, Japão, 2014-2016: sistemas de grelhas em alumínio desempenham a função de brises



Fonte: NEIVA; DEL RIO, 2016

Brises proporcionam controle dos ganhos de calor com uma grande variedade de tipos e soluções estéticas, dialogando com a composição arquitetônica da edificação. Quanto ao movimento, podem ser classificados como móveis ou fixos, e em relação à posição que ocupam na fachada, classificam-se como horizontais, verticais ou mistos (BITTENCOURT, 2000). Elementos de proteção como os brises permitem uma diversidade de soluções, variando em tamanho e forma, sem que suas características de sombreamento sejam alteradas (ver Figura 16).

Figura 16 - Diferentes soluções de proteção com mesmo ângulo de sombreamento



Fonte: DAMASCENO, 2014

Diante dessa flexibilidade plástica e da capacidade de responder com sucesso a diferentes estratégias bioclimáticas, os brises tem sido objeto de estudo de pesquisas em contextos de

clima diversos, com o objetivo de investigar a maneira como influenciam o desempenho da iluminação natural.

Dubois (2003) analisou o desempenho de quatro tipos de dispositivos de sombreamento, entre eles, brises horizontais e inclinados a 45° , para um ambiente de escritório com uso de computadores orientado a sul, na Dinamarca. Os resultados mostraram que esses dispositivos apresentaram desempenho superior a marquises e toldos, por exemplo, e que garantiram níveis de iluminância adequados ao uso do espaço. Os brises a 45° ainda apresentaram resultados satisfatórios em relação à luminância das superfícies do ambiente, reduzindo o risco de ofuscamento.

Fiúza (2008) investigou a influência de brises horizontais com diferentes números de peças e áreas de insolação, inseridos em aberturas laterais e orientadas a norte, para as condições de iluminação no ambiente construído em Florianópolis. Para tanto, a autora comparou essas diferentes composições de dispositivos com diferentes refletâncias, mantendo o mesmo ângulo de obstrução. Os resultados mostraram que o uso de altas refletâncias nos modelos com maior número de peças ampliou em mais de 40% a iluminância do ambiente. A altura solar também influenciou a iluminância no dia estudado (21/03): nas condições de maior altura solar, a porcentagem da área insolada dos dispositivos foi reduzida, assim como a admissão de luz natural.

Lima e Bittencourt (2012) analisaram a influência da inclinação, espaçamento e refletância de brises horizontais de mesma máscara de sombra na iluminância média anual em ambientes de escritórios na cidade de Maceió. Os resultados apresentados indicam que, levando em consideração todos os modelos analisados, a inserção de brises reduziu o ganho térmico pela radiação solar através da janela em todas as orientações, o que representa uma condição desejável na localidade em questão. Em relação à iluminância, observa-se que a inserção de brises resultou em redução das médias anuais de cada orientação em mais de 50%, porém apenas as orientações Norte e Sul mantiveram os níveis entre 500lx e 2000lx, faixa definida como desejável, segundo o método da iluminância útil de luz natural. No caso do Leste e do Oeste, as iluminâncias médias foram reduzidas para valores abaixo de 500lx, o que pode representar prejuízo para o desempenho de atividades no ambiente. Em relação às variáveis analisadas na pesquisa, observa-se que diferentes configurações de brises com mesma máscara de sombra podem apresentar desempenhos diferentes de iluminação. Observou-se ainda que as orientações Leste e Oeste apresentam maior tendência de reflexão da radiação solar para o

interior do ambiente, indicando que a componente refletida da iluminação tem maior participação no resultado final do que nas orientações Norte e Sul (LIMA; BITTENCOURT, 2012).

Outro requisito importante que tem sido investigado é a capacidade de incremento da uniformidade das iluminâncias do ambiente proporcionada pelos brises. Kim e Kim (2010) desenvolveram um dispositivo de sombreamento externo que consiste em um sistema de brises horizontais aplicado de forma inclinada a 20° em relação ao plano da fachada, definido de acordo com a altura solar e o ângulo de incidência em períodos críticos do ano. Tal sistema foi comparado com o desempenho de persianas internas e com o mesmo sistema de brises horizontais aplicado de forma paralela à fachada em um ambiente de apartamento na Korea. Dividindo-se o ambiente em três áreas de acordo com sua profundidade e distância da abertura (frontal, central e posterior), os resultados demonstraram que o dispositivo inclinado apresentou melhor desempenho na área frontal e posterior do ambiente, aumentando respectivamente em 20% e 28% a iluminância média em relação à persiana interna.

Devido à crescente busca por ambientes mais eficientes energeticamente, diversos autores dedicam-se a estudos que analisam a redução de gastos com energia elétrica proporcionada pelos dispositivos de sombreamento, seja pelo menor uso de iluminação artificial, seja pela redução de gastos com condicionamento de ar (DATTA, 2001; MARTINS, 2007; CHUA; CHOU, 2010). Martins (2007) comparou a redução dos gastos com refrigeração em edificações de escritórios proporcionada pelo uso de protetores em relação à abertura exposta, nas diversas orientações na cidade de Maceió. Foram considerados modelos de ambientes de escritório com esquadria em pele de vidro, esquadria simples desprotegida e abertura sombreada por dispositivo de proteção, bloqueando a radiação direta durante o período de estudo. Os resultados mostraram que na orientação Oeste a inserção de dispositivos resultou em uma redução anual do consumo de energia com refrigeração no ambiente de escritório de 18,7%, em comparação com o ambiente desprovido de proteção na abertura.

2.6 Sistemas avançados de iluminação natural

Foi visto que os dispositivos de sombreamento se caracterizam por influenciar o desempenho da iluminação natural no ambiente e reduzir gastos com energia, quando projetados levando em consideração cada realidade climática. Porém, atender aos requisitos de iluminação natural nem sempre consiste em uma tarefa fácil de ser realizada, uma vez que

frequentemente a iluminância é excessiva nas áreas próximas das aberturas e insuficiente nas zonas mais profundas do ambiente. No intuito de superar as limitações dos sistemas tradicionais, e a partir da utilização de novos materiais e tecnologias, os sistemas avançados de iluminação tem sido largamente empregados.

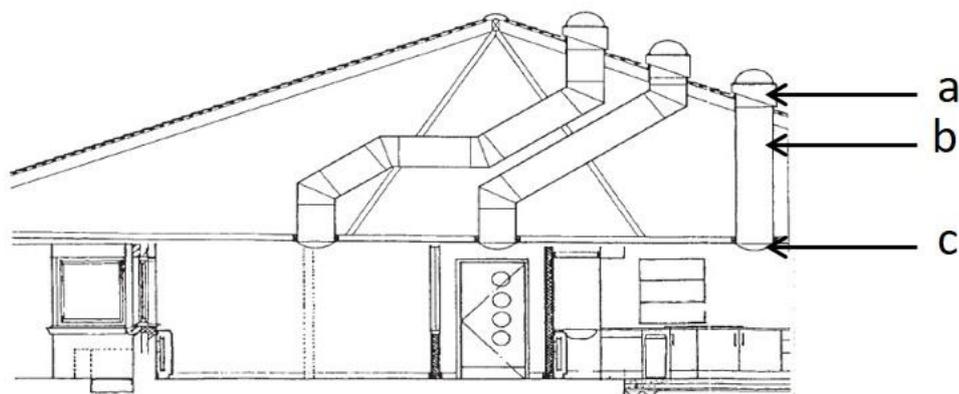
Entre as várias tipologias de sistemas avançados de iluminação natural, destacam-se os sistemas de condução da luz, os que tiram proveito da refração da luz e os sistemas com refletores especulares da luz.

2.6.1 Sistemas de condução da luz

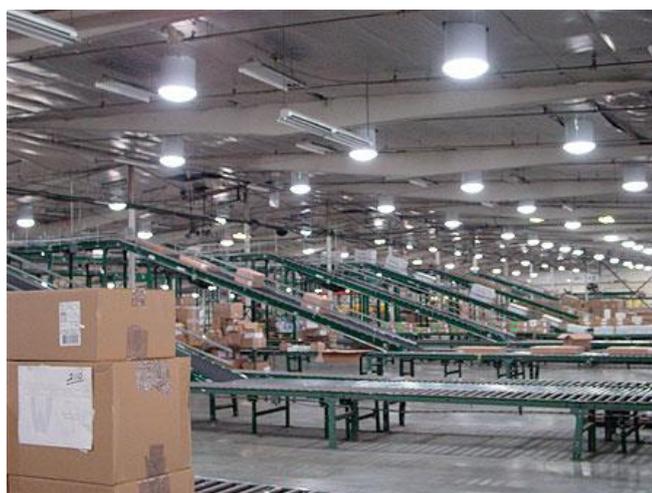
Dutos de luz são dispositivos de captação de luz solar que tem a função de direcioná-la para o interior da edificação através do emprego de materiais reflexivos, como espelhos, por exemplo. Os dutos compreendem basicamente três componentes (Figura 17): um coletor externo, geralmente localizado na cobertura (a), um sistema que conduz a luz até o interior (b) e um dispositivo tipo "luminária" que distribui a luz no ambiente (c) (PHILLIPS, 2004). A Figura 18 mostra um exemplo de aplicação de dutos de luz em um ambiente industrial.

Phillips (2004) aponta algumas desvantagens para o uso desses dispositivos, entre elas o custo relativamente alto de instalação e a necessidade de manutenção constante a fim de que seja preservada a eficiência do sistema. Para o emprego de dutos de luz é importante que haja uma avaliação do custo-benefício de acordo com as condições e necessidades do projeto.

O poço de luz é uma variação do duto de luz e pode ser definido como um espaço luminoso interno que conduz a luz natural para áreas internas da edificação (ABNT, 1999). A Figura 19 mostra o detalhe de um poço de luz em uma edificação. De acordo com Martins (2011) o poço é um dispositivo que facilita a configuração do projeto em terrenos compactos, pelo fato de proporcionar ao arquiteto maior liberdade na distribuição dos ambientes. Além disso, evita ganho de calor por incidência solar direta e pode contribuir para a distribuição da luz no interior do ambiente.

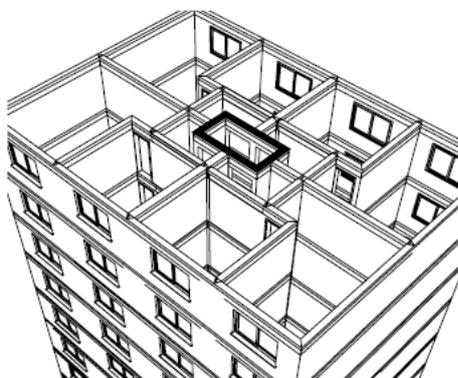
Figura 17 - Corte ilustrativo de dutos de luz

Fonte: Adaptado de Phillips, 2004

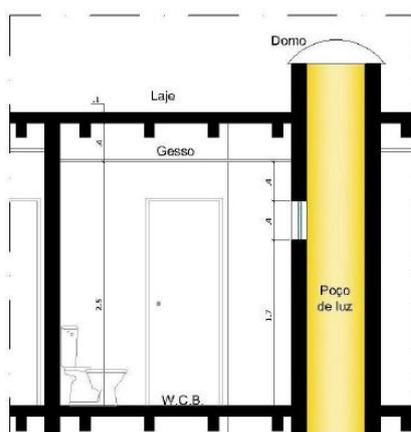
Figura 18 - Aplicação de dutos de luz em ambiente industrial

Fonte: GRUBERGER, 2011

Martins (2011) estudou a contribuição de poços de luz para a iluminação de um ambiente de banheiro em um edifício residencial com nove andares na cidade de Maceió (Figura 20). A partir de um modelo com poço de luz de $0,81\text{m}^2$, concluiu-se que a luz chegou até o sexto andar, sendo desprezível a iluminação a partir do quinto andar, para as duas condições de céu estudadas, claro e parcialmente nublado, indicando que este dispositivo apresenta melhor desempenho para edificações com menor altura.

Figura 19 - Detalhe de um poço de luz

Fonte: GRAZIANO, 2000

Figura 20 - Corte do poço de luz utilizado em pesquisa

Fonte: MARTINS, 2011

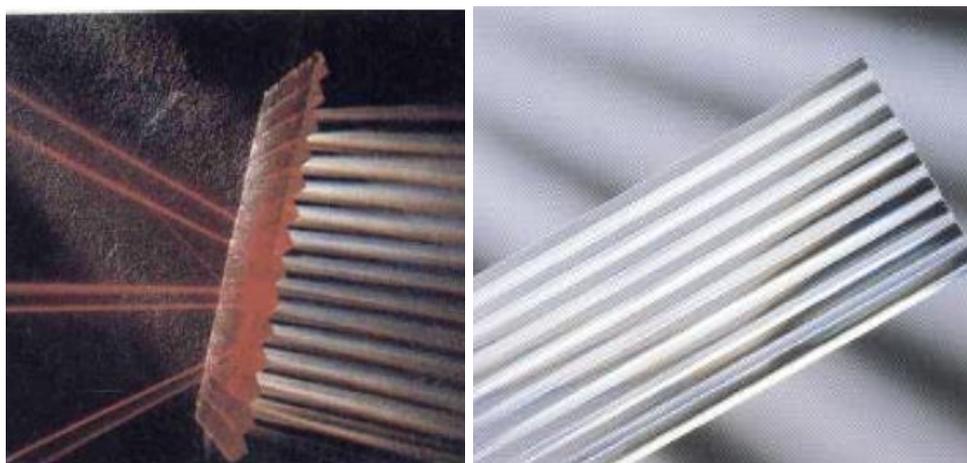
2.6.2 Sistemas de refração da luz

Sistemas de refração da luz são elementos geralmente constituídos por um conjunto de pequenos dispositivos ópticos posicionados em um plano paralelo próximo ao plano do vidro, ou inseridos entre dois planos. Essa categoria compreende elementos como painéis prismáticos e painéis cortados a laser (*laser cut panel*), entre outros tipos (MACÊDO, 2002).

Os elementos prismáticos são fabricados de material transparente formados por uma face plana de um lado e facetas prismáticas do outro, e cada tipo tem suas características adequadas para o bloqueio ou redirecionamento da luz solar (ver Figura 21). Os painéis prismáticos eram fabricados inicialmente em vidro, mas atualmente são produzidos apenas em acrílico. Os painéis podem ser produzidos de duas formas: através de corte de prismas em uma placa de acrílico em quatro configurações diferentes, ou através de corte especializado que produz os prismas espaçados a menos de um milímetro de distância (CHAVES, 2012).

Em pesquisa realizada para três cidades brasileiras utilizando painéis prismáticos nas aberturas laterais de um ambiente de escritório, Chaves (2012) concluiu que o uso desses elementos contribuiu para a redução dos níveis excessivos de iluminância próximo à abertura, em relação ao vidro comum, reduzindo os riscos de ofuscamento. Segundo Macêdo (2002), o custo de instalação dos painéis prismáticos pode ser consideravelmente alto em comparação com os sistemas convencionais.

Figura 21 - Painel prismático



Fonte: BAKER; STEEMERS, 2002

O painel cortado a laser, *laser cut panel* (Figura 22), é um tipo de painel prismático que consiste em uma peça de acrílico na qual são feitos cortes paralelos, através de uma máquina a laser, que funcionam como defletores internos de luz, refletindo a luz de ângulos mais altos de céu para o fundo do ambiente (EDMONDS, 1993, RIBEIRO; CABÚS, 2015). A forma como o elemento interage com a luz está relacionada com alguns parâmetros do elemento, como a inclinação do corte nas placas, a espessura do material, a distância entre os cortes e o índice de refração do material (RIBEIRO, 2017).

Em pesquisa utilizando painel cortado a laser, Ribeiro (2017) investigou a aplicação dos elementos em cenários de verticalização urbana na cidade de Maceió. Os resultados mostram que a aplicação do elemento acarreta um aumento na uniformidade da iluminância em todos os casos estudados, podendo chegar a até 42% para a orientação leste. O painel na posição vertical gera um aumento de uniformidade pelo bloqueio da luz solar direta, o que atesta que o seu uso na vertical pode funcionar como um protetor solar na janela, protegendo contra os raios luminosos que se concentrariam na parte próxima à janela, mas garantindo visão do exterior. Em outras situações, com o painel a 30 e a 45 graus, os ganhos em uniformidade vêm

acompanhados de aumento na iluminância média, o que aponta que tais posições são as mais indicadas para a aplicação do elemento. Observa-se, também, que os resultados mais expressivos ocorreram para os céus em que há sol visível, pois grande parte da luz dentro dos ambientes para os melhores resultados era da componente de sol refletido.

Figura 22 - Paineis cortados a laser



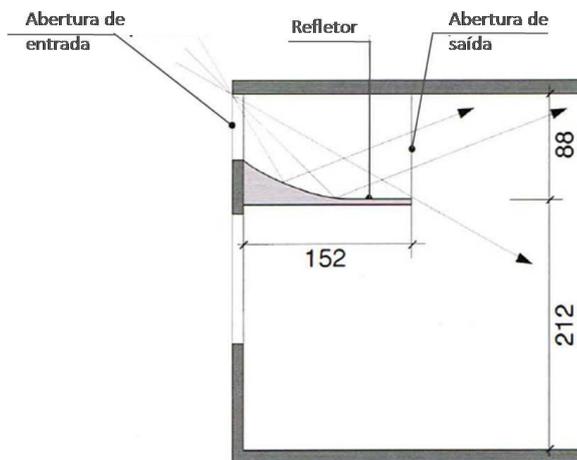
Fonte: www.solartran.com.au

2.6.3 Sistemas com refletores especulares de luz

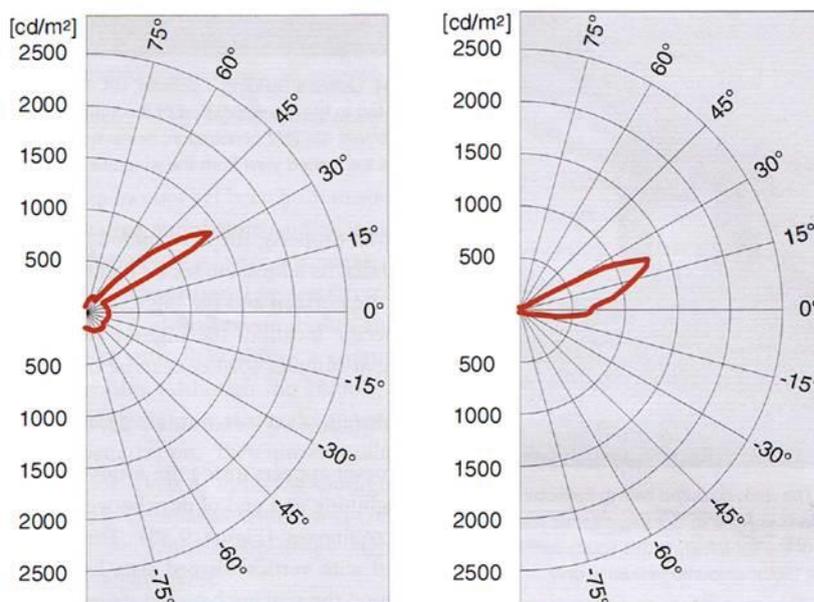
Uma das formas mais simples e usuais em sistemas avançados de iluminação para o redirecionamento da luz solar é a utilização de superfícies refletoras especulares. Essas superfícies são utilizadas, muitas vezes, para incrementar as propriedades de reflexão de dispositivos de sombreamento tradicionais, como prateleiras de luz e brises (PEREIRA, 1992; BELTRÁN et al., 1994; KONTADAKIS et al., 2017).

No caso das prateleiras de luz, concebidas para direcionar a luz para áreas mais distantes da abertura, pode ser utilizado um refletor anidólico com superfície curva que não interfira na aparência do sistema, mantendo as dimensões e forma de uma prateleira horizontal, conforme mostra a Figura 23.

Segundo Baker e Steemers (2002) a comparação entre as características do perfil de difusão da prateleira de luz horizontal e da prateleira de luz com refletor curvo mostra que os dois sistemas proporcionam mesmo fluxo de luz. Porém, o segundo possui maior potencial para direcionar a luz para regiões mais profundas do ambiente, já que distribui o fluxo de luz entre 10 e 30 graus, enquanto o segundo apenas acima de 30 graus (ver Figura 24).

Figura 23 - Seção de prateleira de luz com refletor anidólico

Fonte: Adaptado de Baker e Steemers, 2002

Figura 24 - Comparação entre a difusão da luz a partir de uma prateleira de luz horizontal (esquerda) e uma prateleira de luz anidólica

Fonte: BAKER; STEEMERS,2002

Pereira (1992) estudou o desempenho de sistemas de brises horizontais com superfícies espelhadas inseridos em aberturas laterais para a iluminação natural no ambiente interno. Os resultados mostraram que sob condições de céu claro, os brises melhoraram os níveis de iluminância nas áreas mais distantes das aberturas e reduziram esses níveis nas áreas mais próximas. Segundo o autor, os brises atuaram como dispositivos de sombreamento quando reduziram os riscos de ofuscamento e protegeram os usuários da luz solar direta e também como dispositivos que redirecionam a luz solar, à medida que incrementam distribuição interna de luz natural.

Beltran et al. (1994) apresentaram uma avaliação de três sistemas avançados de iluminação natural projetados para interceptar e redirecionar a luz solar em um ambiente na cidade de Los Angeles. Um dos três sistemas consiste em uma prateleira de luz com geometria otimizada e revestida com filme altamente reflexivo especular. O objetivo do projeto dos dispositivos era melhorar os níveis de iluminação em diferentes pontos do ambiente, variando de acordo com a distância da abertura, e promover maior uniformidade na distribuição das iluminâncias sob diferentes condições de sol e céu. Os dados obtidos mostraram que a luz solar é mais eficientemente redirecionada para a área posterior do ambiente quando o sol está posicionado na frente da janela, incrementando a iluminação no plano de trabalho em aproximadamente 200lx ao longo do ano.

Os brises também podem ter sua função de redirecionamento da luz incrementada através do uso de materiais com características de reflexão especular. Da mesma maneira que a prateleira de luz, esse sistema, em integração com o teto do ambiente, por exemplo, pode permitir que a luz difusa atinja maiores distâncias no ambiente. Segundo Leung et al. (2013) existem relativamente poucos estudos sobre a performance de brises refletivos na literatura.

Leung et al. (2013) estudaram o comportamento de um sistema avançado para o redirecionamento de luz natural composto por brises com superfície refletiva especular a ser instalado na parte superior da esquadria, em um ambiente de escritórios na cidade de Melbourne. O cenário utilizando o sistema foi comparado a um caso de referência, sem a proteção e a outro cenário, onde o sistema de brises foi substituído por um painel de corte a laser. Os resultados da pesquisa mostraram que o sistema de brises foi responsável por aumentar os níveis de iluminância média no ambiente entre 10% e 82%, sendo o maior ganho identificado na área mais distante da abertura, em comparação com o caso de referência. Em relação à análise qualitativa da iluminação natural, os resultados indicam que o sistema de brises proporcionou melhor distribuição da luz natural no ambiente, em comparação com o painel de corte a laser, indicando maior capacidade de condução da luz para áreas mais profundas do ambiente. Os autores apresentam ainda uma metodologia para prever a iluminância interna baseando-se em dados e variáveis da iluminância externa, como iluminância vertical externa, iluminância horizontal global, radiação solar global, azimute e altura solar. Através de estudos estatísticos, seria possível determinar a influência de cada uma dessas variáveis na iluminação natural interna de pontos mais profundos do ambiente (LEUNG et al., 2013).

Kontadakis et al. (2017) estudaram o desempenho de um sistema avançado de iluminação para redirecionamento de luz solar caracterizado por uma prateleira de luz sobre a qual são

acoplados três espelhos que se ajustam de acordo com o movimento do sol e refletem a luz para a superfície do teto do ambiente. Foram simulados cinco cenários, entre os quais uma sala de referência sem proteção e duas salas protegidas pelo sistema de redirecionamento de luz solar proposto, sendo uma delas dotada ainda por brises externos. O estudo foi realizado considerando a abertura voltada para o sul. Os cenários foram simulados para a cidade de Volos, na Grécia. Os resultados mostraram que durante o solstício de verão os cenários que incluíam os dispositivos tiveram melhor desempenho comparando-se com os casos de referência, principalmente na parte posterior do ambiente: a iluminância média aumentou em até 128% com o uso do sistema, em relação ao ambiente desprotegido. O dispositivo também incrementou a uniformidade em 110% durante o solstício de verão e em 53% durante o solstício de inverno.

2.6.4 Brises e o redirecionamento da luz

Está claro que os brises, a partir das suas diversas configurações, podem promover o bloqueio total da radiação direta e quando projetados levando-se em consideração os aspectos pontuados até aqui, são capazes de incrementar as condições de iluminação natural no interior do ambiente devido à luz natural refletida, além de promover a redução nos gastos de energia (MARTINS, 2007; FIÚZA, 2008; CHUA; CHOU, 2010;). Apenas diante da variação da sua geometria, como inclinação e espaçamento, ou das características do material utilizado, brises com os mesmos ângulos de proteção podem apresentar diferentes desempenhos em relação à iluminação natural (PEREIRA, 1992; LIMA; BITTENCOURT, 2012).

O redirecionamento do fluxo luminoso proporcionado por esses elementos atua no aumento dos índices de uniformidade, contribuindo para garantia de níveis de iluminância mais adequados ao desempenho das atividades nas áreas mais distantes das aberturas (KIM; KIM, 2010; LEUNG et al., 2013).

As pesquisas citadas apresentam diferentes métodos para avaliar o comportamento da luz refletida levando em consideração parâmetros como refletância de superfícies do entorno e a geometria dos elementos construídos, como forma de buscar o maior aproveitamento desta componente para a iluminância do ambiente interno. Para que se busquem formas mais eficientes para a admissão da luz solar na forma refletida, é fundamental o conhecimento do comportamento desta componente no ambiente interno, bem como sua relação com o desempenho da iluminação natural

Entre os trabalhos relacionados a estudos com brises, identifica-se, portanto, uma lacuna

a respeito da composição da luz refletida por estes elementos, em relação à contribuição do céu e do sol. Nos trópicos, particularmente, a luz solar deve ser investigada, e sua utilização na forma refletida deve ser buscada, devido à disponibilidade deste tipo de energia durante grande parte do ano (LAM, 1986; BAKER; STEEMERS, 2002;).

2.7 Parâmetros para avaliação dos dispositivos de sombreamento em relação à eficiência da luz solar refletida

Parâmetros ou variáveis podem ser úteis para avaliação dos sistemas de sombreamento em relação ao desempenho da iluminação natural. No caso de sistemas compostos por brises horizontais, a geometria engloba aspectos como potencial de mascaramento por orientação, número de peças, profundidade e espessura das peças, espaçamento, entre outros. Já as características das superfícies desses dispositivos podem variar de acordo com o tipo de reflexão que proporcionam, e com o índice de refletância. Avaliações dessas características apontadas em sistemas de brises são encontradas na maioria das vezes na literatura como análises paramétricas envolvendo dimensionamento e propriedades dos seus componentes, resultantes de estudos de caso ou ainda comparativamente, levando em consideração diferentes realidades climáticas.

Lima (2016) avaliou sistemas de abertura compostos por um envidraçamento e um dispositivo de proteção solar externo, constituído de brises horizontais móveis e retráteis em um ambiente de escritório localizado na cidade de Maceió. O objetivo do estudo foi desenvolver um trabalho para suporte a decisões de projeto quanto a diferentes critérios de desempenho relacionados à iluminação natural e uso de energia. Em relação aos sistemas, foram utilizadas algumas variáveis que foram base para o estudo paramétrico, entre elas, o ângulo de sombreamento proporcionado pelos brises. Os resultados indicaram que, combinando uma situação de envidraçamento com vidro incolor simples, percentual de abertura de 75% em relação à fachada e brise fixo com ângulo de sombreamento de 30°, é possível atingir 50% de horas anuais com iluminâncias entre 500lx e 2000lx em todos os pontos estabelecidos para o plano de trabalho. As conclusões da autora salientam que esses elementos, quando combinados, tendem a fornecer o buscado equilíbrio entre iluminação e ganhos de calor.

Cartana et al. (2016) avaliaram o desempenho luminoso de elementos de controle solar projetados por meio de modelagem paramétrica e posteriores simulações computacionais. Os elementos desenvolvidos foram adequados a uma fachada plana, a Oeste, aberta ao exterior e,

visando o estabelecimento de relações de causa e efeito entre a geometria e os elementos, foram definidos parâmetros geométricos de variação entre os modelos: direção, espessura e profundidade dos componentes. Entre os resultados encontrados nos modelos estudados, os autores demonstraram que os elementos que possuem maior profundidade em relação às dimensões de suas aberturas apresentaram os melhores desempenhos em relação à iluminância útil de luz natural, todos acima de 77%.

O Quadro 1 resume as principais características físicas de sistemas de sombreamento com brises utilizadas em estudos paramétricos para avaliação da iluminação natural identificadas na revisão bibliográfica.

Wagdy et al. (2017) analisaram o desempenho de sistemas de brises horizontais com três peças, posicionados externamente à abertura voltada para o Sul, na cidade do Cairo, Egito, em relação ao ângulo de sombreamento e inclinação das peças. Os ambientes modelos correspondem a duas configurações de quartos de hospital. Foram considerados sete ângulos de sombreamento e onze ângulos de inclinação das peças (entre 10° e 110°, variando a cada 10°). O método de avaliação utilizado foi a autonomia espacial de luz natural. Os resultados mostraram que os ângulos de inclinação das aletas que proporcionaram melhor desempenho ficaram entre 30° e 110°, dependendo do tipo de quarto analisado, representando um amplo intervalo de variação do parâmetro. Já em relação ao ângulo de sombreamento, as duas configurações de quarto apresentaram níveis aceitáveis de autonomia entre 41° e 54°. Os autores enfatizam que o ângulo de sombreamento é mais influente que o ângulo de inclinação das peças para determinar o desempenho aceitável de brises.

Mantendo fixo o ângulo de sombreamento para cada uma das quatro orientações analisadas, Lima e Bittencourt (2012) avaliaram sistemas de brises com três diferentes dimensões de espaçamento entre as peças, quatro inclinações e duas refletâncias (50% e 80%), inseridos em aberturas laterais de ambientes situados na cidade de Maceió. A partir dos resultados encontrados, é possível afirmar que quanto maior a inclinação das peças, menor a porcentagem de iluminância útil de luz natural e que o aumento da refletância foi mais influente para o desempenho da iluminação nas orientações Leste e Oeste. A variação do espaçamento das peças não modificou significativamente a quantidade de iluminação no interior do ambiente.

Fiúza (2008) também destacou a importância do parâmetro refletância a partir do estudo de sistemas de dispositivos de sombreamento com mesmo ângulo de sombreamento, mas com quatro diferentes números de peças e mesma área de exposição. Foram consideradas

refletâncias de 0% e de 85% e a orientação Norte. Observou-se que a refletância dos dispositivos apresentou maior influência para o desempenho da iluminação nos modelos com maior quantidade de peças.

Quadro 1 - Características de sistemas de sombreamento utilizadas em estudos de avaliação da iluminação natural

Parâmetros utilizados em estudos com dispositivos de sombreamento tipo brises	Autores
Ângulo de sombreamento; Ângulo de inclinação das aletas;	WAGDY et al., 2017
Ângulo de sombreamento; Quantidade de aletas; Acionamento (brises fixos ou dinâmicos).	LIMA, 2016
Espessura das aletas; Profundidade das aletas; Permeabilidade do sistema.	CARTANA et al., 2016
Ângulo de inclinação das aletas; Espaçamento das aletas; Refletância dos brises.	LIMA; BITTENCOURT, 2012
Porcentagem de área visível das aletas; Refletância dos brises.	FIÚZA, 2008.
Ângulo de inclinação das aletas; Características de reflexão dos brises (difusa ou especular).	PEREIRA, 1992.

Fonte: Elaborado pela autora

A importância das características de reflexão foi enfatizada por Pereira (1992) que focou sua pesquisa no desempenho de brises horizontais com reflexão especular inseridos em abertura lateral, em Sheffield, Inglaterra. O autor comparou este sistema de proteção com o uso de vidros duplos. O desempenho do sistema foi relacionado às condições de céu e disponibilidade de luz solar direta, apresentando melhores resultados sob céu claro. A iluminância na parte posterior do ambiente foi ampliada em mais de três vezes e a uniformidade foi incrementada em 30% em relação ao ambiente com vidro duplo. O autor enfatiza que quanto maior a variação na direção da luz solar, mais eficiente é o sistema, sugerindo que brises especulares são mais adequados para baixas latitudes.

Analisando os resultados dessas pesquisas, percebe-se que a refletância, as características de reflexão e o ângulo de sombreamento dos brises destacam-se como os parâmetros que mais

influenciam a iluminação natural nos ambientes. Já características como espaçamento e espessura das aletas resultaram em pouca alteração nos resultados.

No campo da iluminação natural um grande número de pesquisas tem se dedicado ao estudo de novas soluções para o maior aproveitamento da iluminação natural, com destaque para os dispositivos de sombreamento, sobretudo em região de clima quente e úmido. Neste sentido, os brises inseridos em aberturas laterais ganham importância à medida que promovem o redirecionamento da luz na forma refletida para o interior dos ambientes, contribuindo para a manutenção da iluminância e uniformidade adequados.

No entanto, pouco se conhece a respeito da composição da luz refletida, levando-se em consideração a contribuição do céu e do sol, ainda que diversos autores tenham confirmado sua influência positiva para a iluminação natural.

A lacuna identificada na bibliografia chama a atenção quando se trata particularmente da luz solar, energia abundantemente disponível nos trópicos e com potencial para reduzir gastos com energia artificial. Com o intuito de conduzir a luz solar para o interior da edificação foram desenvolvidos novos materiais e métodos que resultaram nos chamados sistemas avançados de iluminação natural, que tem como características o incremento da iluminação nas áreas mais afastadas das aberturas, superando as limitações dos dispositivos tradicionais. Apesar de a literatura confirmar os benefícios trazidos por esses sistemas inovadores, a ausência de estudos paramétricos que analisem a contribuição da luz solar para a iluminação compromete o conhecimento acerca do fenômeno de redirecionamento da luz e da eficiência desses dispositivos.

3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA ILUMINAÇÃO NATURAL E CLIMA DE MACEIÓ

Este capítulo trata do uso de ferramentas computacionais para simulação, bem como dos indicadores utilizados para avaliação do desempenho da iluminação natural, enfatizando as principais características do clima da cidade de Maceió.

3.1 Ferramentas de simulação da iluminação natural

Nascimento (2016) apresenta uma evolução das normas brasileiras que abordam o desempenho luminoso do ambiente, sendo a mais recente a Norma ABNT ISO/CIE 8995, publicada em 2013. Esta norma trata sobre iluminação em ambientes de trabalho e traz os principais indicadores para avaliação do ambiente luminoso, entre eles a distribuição da luminância, iluminância e ofuscamento. A autora destacou, a partir de estudo bibliográfico, a necessidade da associação de diferentes variáveis para melhorar a avaliação do desempenho da iluminação pelas normas vigentes, como por exemplo a consideração do tempo em que a iluminância mínima é atingida durante o ano.

Métodos ou indicadores de desempenho que consideram diretamente as preferências dos usuários passaram a ser desenvolvidos nas últimas décadas, através do estudo de aplicabilidade de novos parâmetros (MARDALJEVIC et al., 2011) e utilizados nas pesquisas mais recentes de iluminação natural. O uso de indicadores, aliado à utilização de programas para simulação computacional, ampliaram os limites de investigação acerca das condições de iluminação natural e das suas diversas formas de manipulação, levando em consideração a realidade climática de qualquer localidade.

O uso da simulação computacional na área de iluminação tem se disseminado nas últimas décadas, e, devido ao fato de a iluminação natural ser uma relevante característica de edifícios sustentáveis e da dificuldade de avaliá-la em quantidade e qualidade através de regras simples, é fundamental que programas computacionais de iluminação natural tenham um alto nível de aceitação e utilização no mercado (REINHART; FITZ, 2006).

As análises desenvolvidas atualmente pelos vários programas computacionais para avaliação da iluminação natural são fundamentadas na chamada modelagem da luz natural baseada no clima (*climate-based daylight modelling*). Este termo é utilizado para definir qualquer análise que considere na sua totalidade os componentes da iluminação natural — sol e

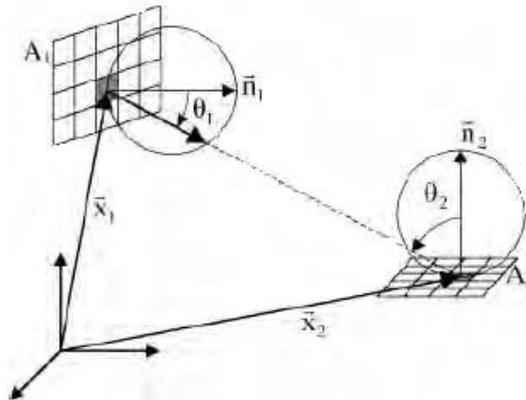
céu — e os dados apropriados ao local de estudo, pelo período de um ano (MARDALJEVIC et al., 2011). Tais dados são derivados de arquivos meteorológicos que contêm informações sobre a disponibilidade de luz natural para cada hora do ano (MARDALJEVIC et al., 2011). As análises baseadas nessas informações podem abranger esse total de horas, mas também podem ser restritas a determinados períodos, como por exemplo, o período diário de duração do trabalho.

Para a manipulação desses dados e, conseqüentemente, sua conversão em saídas úteis para avaliação do desempenho do ambiente, o processo de simulação da iluminação pode recorrer ao uso de duas metodologias avançadas, como a radiosidade e raio traçado (CHAN; TZEMPELIKOS, 2012).

O método da radiosidade foi desenvolvido originalmente para cálculos de energia, e na iluminação natural é utilizado para determinar a iluminância e luminância de um conjunto de pontos localizados na superfície de elementos, como paredes e teto, por meio de trocas de energia luminosa entre essas superfícies (IEA, 2000), conforme ilustra a Figura 25. Este processo permite que sejam geradas cenas independentemente do posicionamento do observador. Algumas das premissas e limitações do método da radiosidade são (IEA, 2000):

- Superfícies de paredes devem ser subdivididas em pequenos elementos finitos caracterizados por propriedades fotométricas homogêneas, como por exemplo, coeficiente de reflexão;
- Todos os elementos devem ser perfeitamente difusos;

Essas considerações devem ser aplicadas também no caso de obstruções externas ao ambiente em estudo. Como desvantagens do método, podem ser citadas a dificuldade de trabalhar com superfícies transparentes, com a colisão especular, e com cálculos atualizados, com variação de tipo de céu, hora e azimute.

Figura 25 - Superfície dos elementos trocando energia (ou luz) no método da radiosidade

Fonte: IEA, 2000

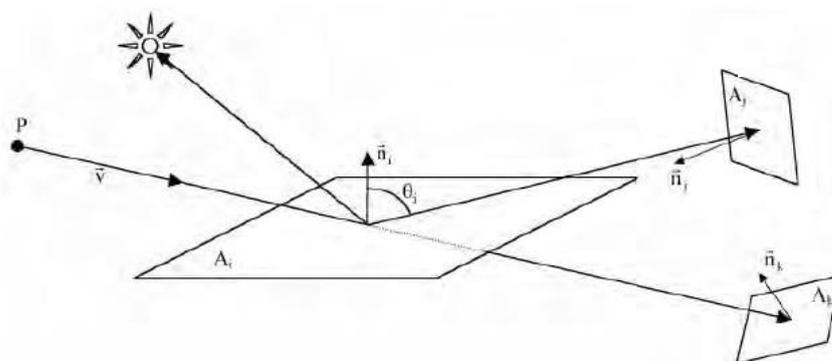
O método do raio traçado analisa o percurso do raio, a partir de sua emissão até encontrar a superfície que a absorverá (*forward raytracing*), ou a partir da superfície atingida até encontrar a fonte de luz natural (*backward raytracing*). A maior parte dos programas para cálculos de iluminação utilizam esta última técnica (IEA, 2000). Inicialmente a técnica do raio traçado foi desenvolvida no campo da computação gráfica, devido à sua capacidade de lidar com cenários complexos (CHAN; TZEMPELIKOS, 2012), porém passou a ser utilizada na área de cálculos de iluminação, encontrando, assim um campo onde poderia ser aplicada adequadamente (CABÚS, 2005).

As características do método permitem que seja determinada a visibilidade das superfícies através do rastreamento de raios de luz imaginários a partir do ponto de vista do observador (

Figura 26). Devido ao potencial dos algoritmos de computador e processadores, milhões de raios podem ser rastreados para proporcionar uma imagem renderizada de alta resolução (IEA, 2000).

A principal vantagem do raio traçado é a capacidade de dar soluções simples para geometrias complexas e o fato de possibilitar que as colisões não se restrinjam apenas aos fenômenos difusos, como no caso do método da radiosidade (CHAN; TZEMPELIKOS, 2012). A reflexão especular é calculada de forma simples, enquanto eventos difusos ou mistos não têm restrições para serem calculados, mas podem necessitar de grande tempo de processamento. Para melhorar o desempenho do processamento faz-se necessário o uso de algoritmos numéricos sofisticados, como é o caso do método Monte Carlo.

Figura 26 - Raios de luz traçados a partir de um ponto para diferentes superfícies e para a principal fonte de luz



Fonte: IEA, 2000

O método Monte Carlo é uma abordagem estatística utilizada quando métodos analíticos são impossíveis ou computacionalmente dispendiosos e é particularmente eficiente para tratar problemas multidimensionais como a troca radiativa em geometrias complexas (KALOS; WHITLOCK, 1986).

Diversos programas utilizam as metodologias de cálculo do raio traçado e da radiosidade, e alguns oferecem módulos que combinam as duas metodologias, como é o caso do Radiance® e do DaySim®. O programa TropLux, utilizado para esta pesquisa, usa o método do raio traçado para calcular a disponibilidade de luz natural no ambiente interno.

3.1.1 O programa TropLux

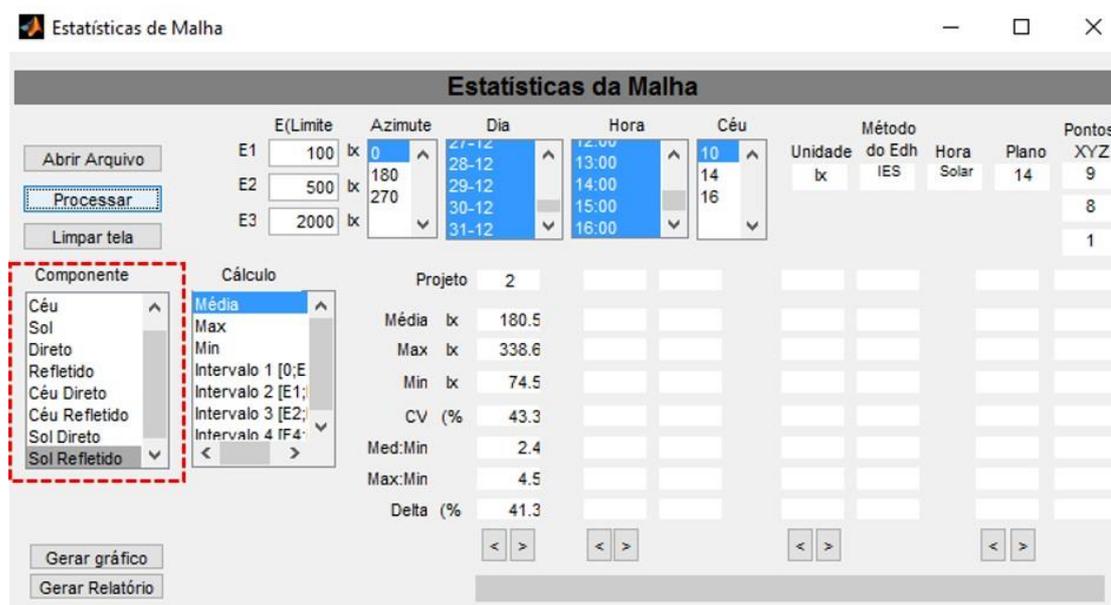
O programa TropLux (CABÚS, 2002) foi desenvolvido em 2002 e desde então vem sendo constantemente atualizado pelo Grupo de Pesquisa em Iluminação, GRILU, da Universidade Federal de Alagoas. Nesta pesquisa foi utilizado o programa na sua versão 7. O TropLux baseia-se em três conceitos fundamentais: o método do raio traçado, o método Monte Carlo aplicado à iluminação natural (TREGENZA, 1983) e o conceito de coeficientes de luz natural (TREGENZA; WATERS, 1993).

Os coeficientes de luz natural propostos por Tregenza e Waters (1993) fazem a relação da iluminância de uma dada superfície em função da luminância de uma determinada subdivisão do céu. Também utilizam a iluminância normal num plano desobstruído em função dessa mesma subdivisão. No caso do TropLux, são utilizados dois tipos de subdivisão: para o cálculo da componente refletida é utilizada a proposta da CIE, que divide o céu em 145 partes, e para o cálculo da componente direta, utiliza-se uma subdivisão com 5.221 partes, que traz melhorias

na precisão dos resultados em função do tamanho angular do sol (CABÚS, 2005).

Quanto às aberturas, o programa permite localizá-las variando sua dimensão e posicionamento, além de possibilitar a utilização de elementos arquitetônicos externos ou internos para proteção solar. O software ainda permite que cada componente da iluminação no ambiente seja analisada separadamente, possibilitando a análise da luz solar refletida, objeto de estudo desta pesquisa. A Figura 27 ilustra uma das telas de saída de dados do programa, onde se tem a possibilidade de escolha das componentes diretas ou refletidas (ver destaque em vermelho) para análise de iluminância e uniformidade da malha de pontos.

Figura 27 - Tela de saída do TropLux com opção de escolha das componentes para análise



Fonte: TropLux 7 (CABÚS, 2016)

Em relação às características do ambiente interno, o TropLux permite utilizar formas complexas e configurar as características de reflexão das superfícies. Em função de todos os parâmetros necessários, é possível calcular a iluminância em um ou mais pontos dentro do ambiente.

O TropLux é um programa consolidado enquanto ferramenta de pesquisa em iluminação natural e tem sido utilizado em trabalhos científicos como teses (LARANJA, 2010; HAREDY, 2016), dissertações (CORREIA, 2008; NASCIMENTO, 2016; RIBEIRO, 2017), artigos de congressos (LIMA; BITTENCOURT, 2012; LINS; BATISTA, 2016) e revistas nacionais (MENDES et al., 2005) e internacionais (RAMOS; GHISI, 2010). Através do TropLux é possível avaliar o desempenho da iluminação natural a partir dos dados fornecidos pelo

programa, utilizando-se os indicadores de desempenho existentes, como também desenvolver novas metodologias de análise.

3.1.1.1 Configuração de céu com distribuição dinâmica de luminâncias

O programa TropLux permite a simulação das características da iluminação natural no ambiente interno e baseia-se nos 15 tipos de céu descritos pela CIE- *Commission Internationale de l'Eclairage* (2003), conforme descreve o Quadro 2. Esses tipos de céus são variações dos céus claro, parcialmente nublado e encoberto. A partir da configuração do céu de acordo com a proposta da CIE, o programa possibilita a simulação de ambientes com geometrias complexas segundo variação em dias e horas.

Quadro 2 - Tipos de céus propostos pela CIE

Tipo	Descrição
1	Encoberto- Gradação de luminâncias íngremes em função da altura solar e uniformidade azimutal
2	Encoberto- Gradação de luminâncias íngremes em função da altura solar e brilho moderado ao redor do sol
3	Encoberto- Gradação de luminâncias moderada com uniformidade azimutal
4	Encoberto- Gradação de luminâncias moderada e brilho moderado ao redor do sol
5	Céu de luminâncias uniformes
6	Parcialmente encoberto- Sem gradação em função da altura solar e com brilho moderado ao redor do sol
7	Parcialmente encoberto- Sem gradação em função da altura solar e com uma região circunsolar brilhosa
8	Parcialmente encoberto- Sem gradação em função da altura solar e com uma coroa solar distinta
9	Parcialmente encoberto- com obstrução
10	Parcialmente encoberto- com uma região circunsolar brilhosa
11	Céu branco- azul com coroa solar distinta
12	CIE Padrão de céu claro com baixa turbidez
13	CIE Padrão de céu claro com atmosfera poluída
14	Céu túrbido sem nuvens com ampla coroa solar
15	Céu branco- azul túrbido com ampla coroa solar

Fonte: CIE, 2003

O TropLux dispõe de uma configuração de céu com distribuição dinâmica de luminâncias (CDDL), que é determinado por uma rotina do TropLux. Esta rotina escolhe um dos 3 tipos de céu padrão CIE recorrentes na cidade em estudo, no caso de Maceió, céu 1, 10 e 14, de acordo com a sua probabilidade no dia e na hora calculados, usando os estudos de Cabús (2002) e de Manhas (2016).

3.2 Indicadores para avaliação do desempenho da iluminação natural

Pode-se afirmar que indicadores para avaliação de desempenho de edificações são medidas de qualidade relacionadas a diversos aspectos, como eficiência energética, segurança e qualidade de projeto e são utilizados em estudos comparativos para guiar novos projetos ou classificar um edifício existente (REINHART et al., 2006). A grande quantidade de dados resultantes de simulações computacionais deve ser convertida em métodos, a fim de que suas respostas possam ser úteis para os projetistas no momento da concepção do projeto (REINHART; WIENOLD, 2010). Segundo Mardaljevic et al. (2009), o objetivo dessas medidas é combinar vários fatores que irão prever resultados de desempenho melhores ou piores, e assim auxiliar na tomada de decisões.

Reinhart et al. (2006) afirmam que o desenvolvimento de tais indicadores é mais difícil e potencialmente menos efetivo para aspectos qualitativos do projeto, como iluminação natural. Pesquisadores tem se dedicado a responder à questão: "o que é uma boa iluminação natural?". Segundo Mardaljevic et al. (2009), pode-se afirmar que um espaço com boa iluminação natural é aquele capaz de minimizar o desconforto e promover altos níveis de qualidade visual unicamente ou predominantemente através da luz natural com frequência durante o ano.

Reinhart e Wienold (2010) acreditam que uma boa iluminação é promovida por um espaço iluminado principalmente com luz natural, que combina grande satisfação dos seus usuários em relação ao conforto térmico e visual com baixo uso de energia proveniente de iluminação artificial, aquecimento e condicionamento de ar. Portanto, o projeto para utilização de luz natural deve buscar disponibilidade anual de iluminação, com o objetivo de reduzir o consumo de energia e garantir a satisfação dos usuários dos ambientes.

Na busca por medidas que pudessem ser expressas em valores absolutos e complementassem estudos antes baseados em medidas simplificadas, alguns indicadores foram desenvolvidos e são largamente utilizados em pesquisa de iluminação natural, relacionados à sua disponibilidade e uniformidade no plano de trabalho, conforme será detalhado a seguir.

3.2.1 Disponibilidade da iluminação natural

Disponibilidade de luz natural é quantidade de luz de que se pode dispor em determinado local, levando-se em consideração tanto as condições geográficas quanto climáticas da região. A NBR 15.215:2005 (ABNT, 2005) lista os parâmetros que influenciam o cálculo da disponibilidade de luz, sendo eles os dados relativos à posição do sol, dados sazonais, como dia

e mês do ano, latitude, longitude e o tipo do céu. Diante dessas variáveis, deve-se salientar a importância de técnicas ou métodos para estimar essa disponibilidade e permitir a avaliação do desempenho de um projeto em relação à iluminação natural. As próximas seções apresentam alguns dos métodos utilizados para avaliação do desempenho da iluminação natural.

3.2.1.1 Fator de Luz do Dia (FLD)

O Fator de Luz do Dia é definido como a razão entre a iluminância interna em um ponto do edifício e iluminância horizontal externa sob condições de céu encoberto padrão CIE (HOPKINSON et al., 1975; MOORE, 1991; TREGENZA, 2004;), e é geralmente expresso como porcentagem, sem considerar valores absolutos de iluminância. Segundo Reinhart et al. (2006), o FLD tem a vantagem de ser de fácil entendimento e aplicação entre os projetistas, mas é normalmente associado à ideia de "quanto mais melhor", promovendo o uso de janelas com grandes alturas, tetos e paredes com acabamento de alta refletância, grandes áreas de fachada e aberturas zenitais com vidros de alta transmitância. As diretrizes de iluminação natural baseadas no FLD estão geralmente em conflito com outros parâmetros, como por exemplo, ganhos de calor (MARDALJEVIC et al., 2009).

Além desses aspectos, o FLD tem como limitação o fato de não levar em consideração a orientação da fachada, localização da edificação, incidência da luz solar direta e condições variáveis do céu. É chamado de método estático para avaliação do desempenho da iluminação natural. Já os métodos dinâmicos baseiam-se em períodos que normalmente compreendem um ano e levam em consideração a radiação solar externa anual. Entre eles, destacam-se métodos já estabelecidos como Autonomia de Luz Natural (ALN) e a Iluminância Útil de Luz Natural (IULN), e mais recentes, como a Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe) e Exposição Solar Anual (ESA).

Esses métodos são fundamentados na modelagem da luz natural baseada no clima. A sua vantagem em comparação aos métodos estáticos é que eles consideram a quantidade e características das variações de luz natural ao longo do dia e do ano, para uma dada locação do edifício. Segundo Cabús (2002), três fatores contribuíram para o desenvolvimento deste tipo de abordagem: o custo crescente da energia elétrica, o crescimento de uma consciência ecológica e a disponibilidade de computadores com maior capacidade de processamento.

3.2.1.2 Autonomia de Luz Natural (ALN)

A Autonomia de Luz Natural corresponde à porcentagem de horas de trabalho durante

um ano em que uma iluminância mínima recomendada é atingida apenas através da luz natural (REINHART; WIENOLD, 2011). A iluminância mínima recomendada pode ser definida por meio de leis e normas específicas, de acordo com o tipo de atividade desenvolvida no ambiente em questão.

3.2.1.3 Iluminância Útil de Luz Natural (IULN)

A Iluminância Útil de Luz Natural, estabelece limites inferior e superior para admissão da iluminação natural e baseia-se na identificação de períodos nos quais intervalos de valores de iluminância são atingidos. A partir do desenvolvimento de pesquisas prévias sobre preferências e comportamento dos usuários em ambientes não residenciais, os autores definiram em 100lx a medida inferior, onde um ponto sobre um plano horizontal estaria iluminado de maneira insuficiente e 3.000lx o limite superior onde o mesmo estaria excessivamente iluminado (REINHART et al., 2006; MARDALJEVIC et al., 2011). O Quadro 3 apresenta os intervalos propostos pela IULN. Tanto as medidas de Autonomia de Luz Natural, quanto de IULN são expressas em porcentagem das horas do ano para cada ponto ou malha de pontos analisados.

Quadro 3 - Intervalos de Iluminância Útil de Luz Natural

Intervalos da IULN	
Valores < 100 lx	Insuficientes
Valores entre 100 lx e 500 lx	Passíveis de integração com a iluminação artificial
Valores entre 500 lx e 3.000 lx	Iluminância desejável
Valores > 3.000 lx	Excessivos

Fonte: MARDALJEVIC; NABIL, 2011

3.2.1.4 Iluminância

Um requisito frequentemente utilizado para avaliação de um espaço em relação à iluminação é a capacidade de adaptação dos usuários às atividades a serem desenvolvidas no ambiente. Para o desempenho de tais atividades, cada ambiente possui recomendações a respeito dos níveis adequados de iluminância a serem atingidos. Essas recomendações estão presentes em leis e normas específicas, tais como a NBR ISO/CIE 8998, que discorre sobre valores de iluminância a serem alcançados no plano de trabalho, e que será utilizada como referência nesta pesquisa.

3.2.1.5 Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe) e Exposição Solar Anual (ESA)

As medidas de desempenho Autonomia de Luz Natural Espacial e Exposição Solar Anual foram definidas e adotadas na LM-83-12 pela *Illuminating Engineering Society of North America*, (IESNA, 2012) e têm sido utilizadas para avaliação da iluminação natural em ambientes internos (FELIPPE, 2016; PELLEGRINO et al., 2017). Ambos são acompanhados do valor de iluminância a ser atingido e do período de tempo considerado em cada caso.

A $ALNe_{300/50\%}$ pode ser descrita como a porcentagem da área analisada que atinge a iluminância estabelecida, 300lx, apenas através da luz natural durante 50% das horas de utilização do ambiente (IESNA, 2012). De acordo com o critério de avaliação proposto, para que um espaço apresente condição “preferível” de iluminação natural, a $ALNe_{300/50\%}$ deve ser igual ou maior que 75% da área analisada, e para que apresente condição “aceitável”, a $ALNe_{300/50\%}$ deve ser igual ou maior que 55%. O valor da iluminância-alvo é definido de acordo com a atividade desempenhada no ambiente em questão, e o período de análise corresponde a 10 horas por dia, das 8h às 18h³ (IESNA, 2012). O método também estabelece uma malha de pontos ideal para análise. As simulações são baseadas em dados do Ano Meteorológico Típico (TMY), hora a hora, obtidos a partir da estação disponível mais próxima ao local da pesquisa. A intensidade da luminância solar e a distribuição da luminância da abóbada celeste serão derivados dos dados do TMY (IESNA, 2012).

O $ESA_{1000/250h}$ corresponde à porcentagem da área analisada que excede o limite de iluminância de 1000lx proveniente diretamente da luz solar por mais de 250 horas de utilização do ambiente (IESNA, 2012) e só pode ser utilizado em ambientes onde há luz solar direta incidente no plano de trabalho. Quando utilizados em conjunto, os dois métodos são capazes de indicar a suficiência de iluminância anual do plano de trabalho e o potencial de ofuscamento gerado pela luz solar direta.

Apesar de os valores de ALNe e ESA serem representados através de números correspondentes a uma porcentagem de espaço, é possível que o comportamento da luz natural seja analisado graficamente, possibilitando a identificação de áreas iluminadas de maneira insuficiente e a comparação entre diferentes estratégias de projeto.

³ Os dados do Ano Meteorológico Típico relativos a uma hora envolvem, na verdade, médias horárias com informações centradas em meia hora. Por exemplo, 9h de um dia corresponde à média de 8h para 9h, e, para utilização do método ALNe, esse período deve considerar a posição solar referente ao horário de 8:30h (IESNA, 2012).

3.2.2 Uniformidade

A forma como a luz natural é distribuída no espaço é de fundamental importância para o desenvolvimento de atividades e para a qualidade da iluminação no ambiente interno, já que a existência de variações excessivas na iluminância horizontal pode contribuir para a ocorrência de problemas de adaptação visual, devendo ser evitadas (DUBOIS, 2003).

A Norma Brasileira da ABNT ISO/CIE 8995-1 de 2013, que trata da iluminação em ambientes de trabalho, indica que a uniformidade da iluminância na tarefa, definida como a razão entre o valor mínimo e o valor médio (ver Equação 1), não deve ser menor que 0,7, ou 70% e que a iluminância no entorno imediato não pode ser inferior a 0,5, ou 50% (ABNT, 2013). Quando analisado em uma malha de pontos expressa a variação percentual da iluminância dos pontos com relação à média global. A expressão matemática abaixo a demonstra:

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{med}}} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Segundo Dubois (2003), diversos autores argumentam que critérios como esse não são apropriados para avaliação de ambientes internos iluminados por aberturas laterais, onde a tolerância por parte dos usuários para menor uniformidade de iluminâncias pode ser maior, em comparação com ambientes iluminados artificialmente.

3.2.3 Limitações

Os diferentes indicadores de disponibilidade de luz natural apresentados até aqui, podem ser utilizados com os mais variados objetivos, individualmente ou de maneira complementar, uma vez que fornecem diferentes tipos de informação. Porém, em se tratando de pesquisas comparativas, as quais se utilizam de estudos paramétricos, alguns indicadores apresentam limitações.

Em relação à Iluminância Útil de Luz Natural (IULN), por exemplo, estabelecida como o intervalo de iluminâncias entre 100lx e 3.000lx, a dificuldade consiste em se comparar dois ambientes cuja porcentagem de horas dentro deste intervalo seja o mesmo. De acordo com os requisitos da IULN, os dois ambientes teriam o mesmo desempenho em termos de disponibilidade de luz natural, porém, na prática, a média de iluminância de cada um deles poderia ser bem diferente, levando em consideração os valores entre 100lx e 3.000lx, e dificultando uma comparação mais precisa.

Já o indicador iluminância tem como limitação o fato de se tratar de uma média e, portanto, não ser capaz de representar de forma eficaz as variações existentes, provenientes da aplicação de um estudo paramétrico comparativo, necessitando de adequação para avaliação mais eficiente da iluminação natural.

3.3 Caracterização do clima de Maceió

A cidade de Maceió está localizada no estado de Alagoas, na latitude 9°39'56 S e longitude 35°44'7 O, conforme visto na Figura 28. Está situada sobre um platô costeiro sedimentário com quatro diferentes altitudes, variando entre 4m e 80m em relação ao nível do mar (CABÚS, 2002). De acordo com dados do IBGE (2017), possui população estimada de 1.021.709 habitantes, e seu território possui área de 509 Km².

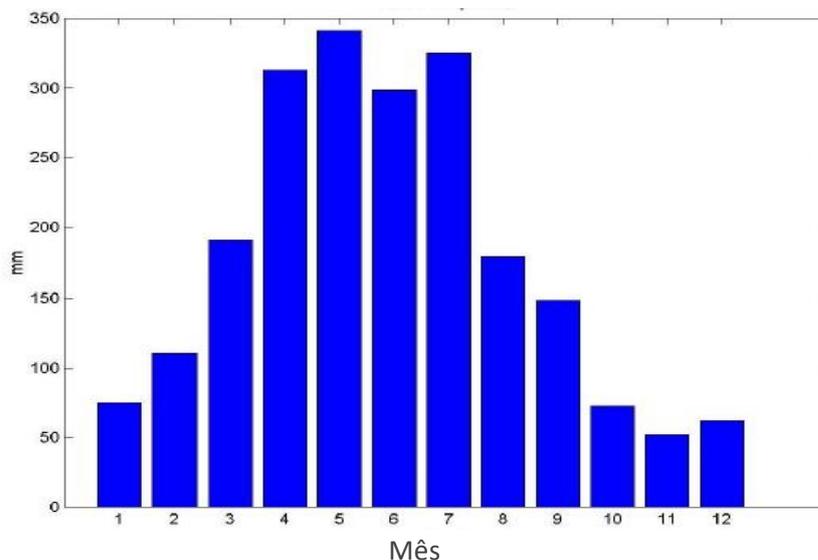
Maceió está situada em uma região de clima quente e úmido, que se caracteriza por pequenas oscilações na temperatura do ar, seja durante o dia ou ao longo do ano, elevada umidade e presença de intensa radiação solar (CABÚS, 2002).

Figura 28 - Localização da cidade de Maceió



Fonte: Adaptado de IBGE, 2016

Figura 29 - Precipitação mensal em milímetros para a cidade de Maceió

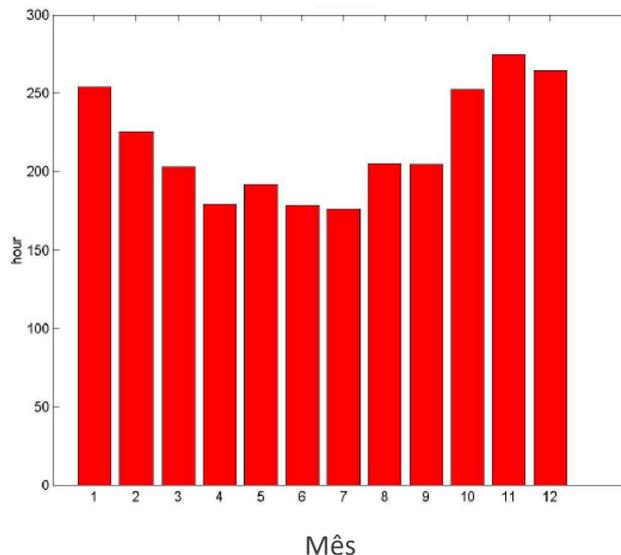


Fonte: CABÚS, 2002

A média de temperatura anual na cidade corresponde a 24,8°C, sendo o mês de fevereiro o que apresenta maior média mensal, com 26,3°, e agosto o mês que apresenta a menor média, com 23,5°. A umidade relativa anual é de 78,3% (CABÚS, 2002)⁴. Diante da pequena amplitude térmica anual, a principal diferença entre as estações do ano passa a ser a precipitação, com valor anual de 2.167,7mm, e com 60% do total concentrado entre os meses de abril a julho (CABÚS, 2002), conforme mostra o gráfico da Figura 29.

A presença do sol corresponde a uma importante característica do clima de Maceió. Com altas temperaturas e chuvas concentradas em períodos bem definidos, a insolação é frequente durante grande parte do ano, principalmente nos períodos secos. O gráfico da Figura 30 apresenta a quantidade de horas de insolação por mês (CABÚS, 2002). Observa-se que a insolação apresenta maiores médias entre os meses de outubro e janeiro, com valores acima de 250 horas, sendo a insolação anual total de 2.627 horas.

⁴ Os dados apresentados por Cabús (2002) e utilizados nesta seção são baseados em Normais Climatológicas referentes a 30 anos, entre 1961 e 1990. Departamento Nacional de Meteorologia, Normais Climatológicas: Brasília, 1992.

Figura 30 - Insolação mensal em horas para a cidade de Maceió

Fonte: CABÚS, 2002

Cabús (2002) propôs um método que relaciona o tempo de insolação mensal com a duração dos dias no período de um mês com a finalidade de definir a probabilidade de insolação mensal. A Tabela 1 apresenta a probabilidade mensal de insolação para a cidade de Maceió. A partir desses dados, é possível observar a importância da consideração da luz solar para o projeto da iluminação natural nesta região: o mês de julho, que apresenta a menor probabilidade, ainda consegue proporcionar quase 50% de insolação durante o dia.

De acordo com os resultados da pesquisa realizada por Cabús (2002), o céu parcialmente nublado é o tipo mais comum em Maceió, com 61,8% de ocorrência (ver Figura 31), seguido do céu encoberto, com 25,8% e do céu claro, com 12,4%. Sob condições de céu claro e parcialmente nublado as superfícies que refletem a luz do sol tornam-se importantes fontes secundárias de luz natural, já que a luz do sol se apresenta de forma intensa para ser usada diretamente sobre o plano de trabalho.

Tabela 1 - Probabilidade de insolação mensal em Maceió

Mês	Duração do dia (horas)	Insolação (horas)	Probabilidade de insolação (%)
Janeiro	387,4	254,2	65,6
Fevereiro	344,4	225,7	65,5
Março	373,4	203,0	54,4
Abril	353,4	179,4	50,8
Mai	358,3	191,8	53,5
Junho	343,4	178,6	52,0
Julho	356,3	176,0	49,4
Agosto	362,0	205,2	56,7
Setembro	357,9	204,6	57,2
Outubro	378,1	252,4	66,8
Novembro	372,9	274,7	73,7
Dezembro	389,1	264,2	67,6

Fonte: CABÚS, 2002

Figura 31 - Céu parcialmente nublado com sol visível em Maceió



Fonte: CABÚS, 2002

Diante dessas particularidades, algumas estratégias são mais indicadas para o projeto de edificações no clima quente e úmido. O predomínio de altos índices de umidade exige que seja mantida a ventilação permanente nos ambientes, e a ocorrência de chuvas constantes durante parte do ano indica a necessidade de proteção das fachadas. Além disso, devido à presença de intensa radiação solar, o projetista deve priorizar o sombreamento das aberturas, bloqueando a luz solar direta nos horários definidos em estudo prévio, prevenindo assim os ganhos de calor.

Pode-se afirmar, portanto, que a utilização de dispositivos de sombreamento constitui uma importante estratégia bioclimática levando-se em consideração o clima de Maceió.

Diversas pesquisas apresentadas em seções anteriores deste trabalho evidenciaram a eficiência desses dispositivos em prevenir ganhos térmicos, contribuindo para maior uniformidade na distribuição de iluminâncias em ambientes localizados em Maceió (MARTINS, 2007; LIMA, BITENCOURT, 2012; LIMA, 2016) e em contextos climáticos diversos.

Em revisão bibliográfica observou-se que as análises e métodos propostos nas pesquisas não apresentam como resultado a contribuição da luz solar refletida para a iluminância global do ambiente. Foi visto que um dos métodos mais utilizado para avaliar a iluminação natural, o Fator de Luz do Dia, não considera a contribuição da luz solar, e muitos pesquisadores, alternativamente, dedicaram-se a entender o comportamento desta componente no espaço através do estudo de cartas solares, por exemplo, ou do desenvolvimento de novos métodos de predição. Indicadores como autonomia de luz natural (ALN), iluminância útil de luz natural (IULN) e autonomia de luz natural espacial (ALNe), desenvolvidos para avaliar a manutenção de determinada iluminância no plano de trabalho, não levam em consideração a contribuição do sol para a iluminação do ambiente. Já o indicador de exposição solar anual (ESA) apenas pode ser utilizado em ambientes com incidência solar direta no plano de trabalho.

Pode-se afirmar que a lacuna identificada na literatura também é resultado dos indicadores disponíveis e se constitui na busca por um método que seja capaz de avaliar a contribuição da luz solar refletida pelos elementos do entorno construído na iluminação natural interna.

Diante do desenvolvimento de tal método e do conhecimento dos principais indicadores disponíveis, é possível buscar a relação entre a luz solar refletida e o desempenho da iluminação natural no interior do ambiente, de modo que sejam levadas em consideração as consequências da presença desta fonte de luz no plano de trabalho. A metodologia de pesquisa apresentada a seguir está, portanto, relacionada com a revisão bibliográfica desenvolvida nesta etapa do trabalho, buscando o atendimento aos objetivos estabelecidos.

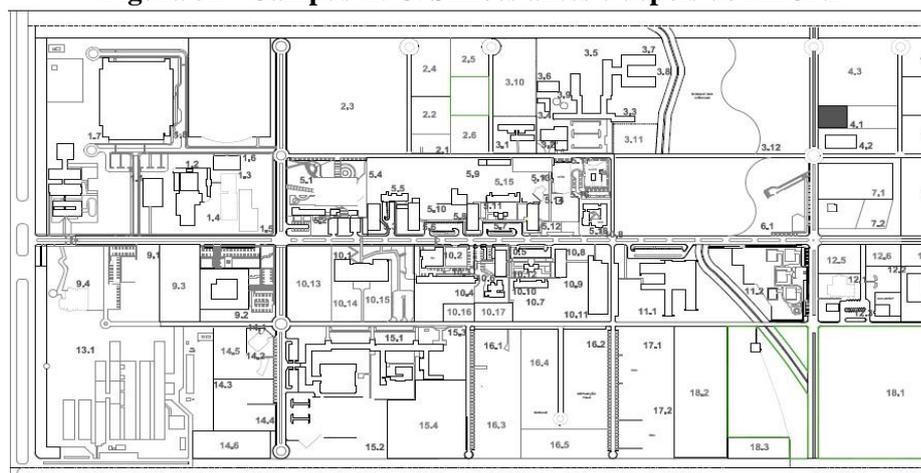
4 MÉTODO

Nesta seção são apresentados os métodos de trabalho adotados, bem como as ferramentas utilizadas para a resolução dos objetivos da pesquisa. Ela abrange três tópicos principais. O primeiro consiste na definição do ambiente-modelo e na configuração e parametrização dos dispositivos de sombreamento, objetos de estudo deste trabalho. O segundo apresenta os indicadores de desempenho e o software para simulação utilizado como principal ferramenta metodológica do trabalho. O último tópico dedica-se à forma de apresentação dos resultados.

4.1 Ambiente-modelo objeto da pesquisa

O modelo utilizado para esta pesquisa representa o espaço de uma sala de aula com capacidade para quarenta alunos e foi definido a partir do levantamento das salas de aula projetadas e construídas no Campus A. C. Simões da Universidade Federal de Alagoas durante o período de duração do Plano de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais - REUNI. O REUNI teve duração de quatro anos, entre os anos de 2008 e 2012. A Figura 32 mostra o impacto na infraestrutura do Campus A. C. Simões representado pela comparação entre o antes e o depois do REUNI. As projeções em laranja representam as edificações construídas durante o período.

Figura 32 - Campus A. C. Simões antes e depois do REUNI





Fonte: Superintendência de infraestrutura- UFAL, 2013

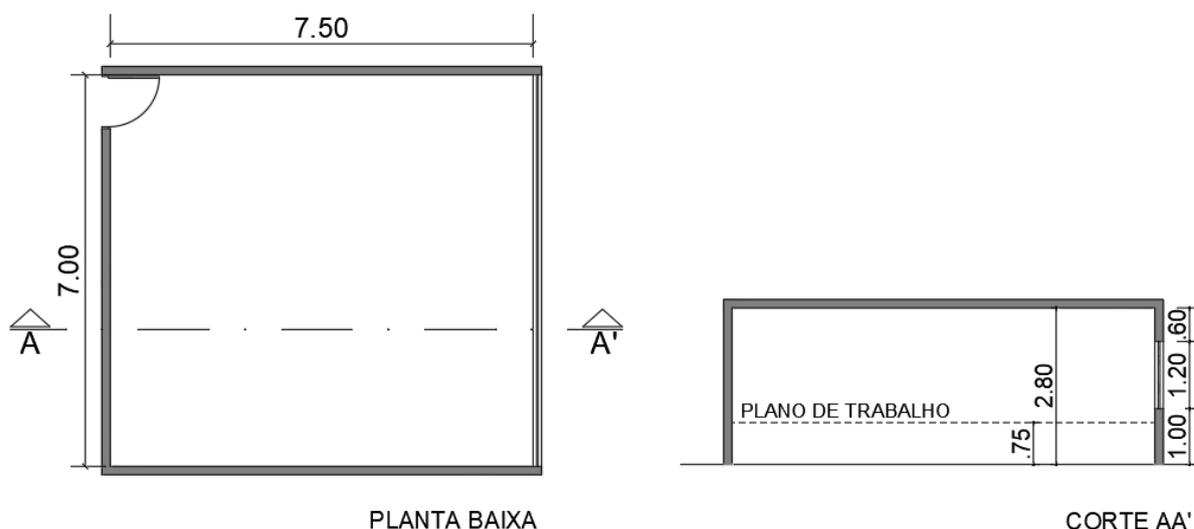
Ao longo desses anos foram construídas cento e quinze salas de aulas, distribuídas em diversos prédios, e dentro desse total, a maior parte, que corresponde a 30%, foi de salas de aula com capacidade para quarenta alunos (Superintendência de infraestrutura- UFAL, 2013). Os 70% restantes, dividiram-se em salas de aulas para vinte, trinta e sessenta alunos. Demais características físicas do ambiente, como dimensões e altura do pé-direito, bem como características das aberturas e refletâncias das superfícies, também foram utilizadas levando em consideração os padrões de salas de aula existentes no Campus. As demais características do modelo se encontram na Tabela 2. A Figura 33 apresenta planta baixa e corte do ambiente.

Tabela 2 - Características do modelo

Características do modelo	
Dimensões	7,00m x 7,50m
Área	52,5m ²
Pé-direito	2,80m
Refletâncias (piso/ parede/ teto)	0,30/ 0,60/ 0,70
Abertura	7,00m x 1,20m (peitoril 1,00m)

Fonte: Elaborado pela autora

Figura 33 - Modelo de sala de aula utilizado na pesquisa

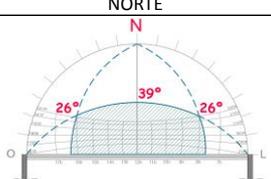
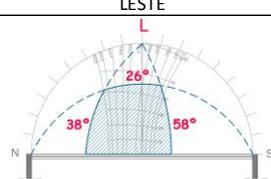
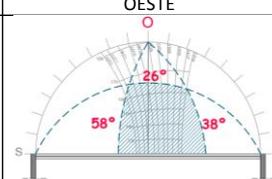
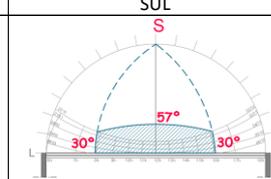


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Configuração e parametrização de modelos de dispositivos de sombreamento

Para o desenvolvimento da pesquisa foram configurados três sistemas de proteção, a partir do uso de dispositivos horizontais, para as orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Foram utilizados os mesmos ângulos de proteção para os sistemas de mesma orientação, de modo que no período definido não houvesse luz solar direta no ambiente, para que fosse analisada apenas a luz solar refletida pelos dispositivos. A Tabela 3 apresenta as máscaras de sombra e os ângulos α (horizontal) e Υ (vertical lateral esquerdo e direito) correspondentes para cada orientação.

Tabela 3 - Máscaras de sombra e ângulos para orientações Norte, Leste e Sul

Máscaras de sombra por orientação	NORTE		LESTE		OESTE		SUL		
					α	Υ_e/Υ_d	α	Υ_e/Υ_d	α
Ângulos	39°	26°/26°	26°	38°/58°	26°	58°/38°	57°	30°/30°	

Fonte: Elaborado pela autora

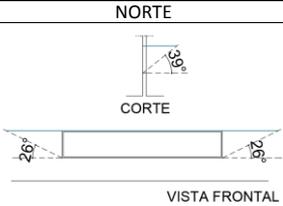
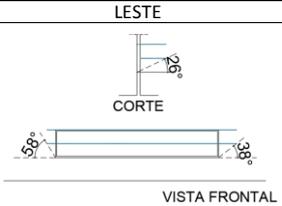
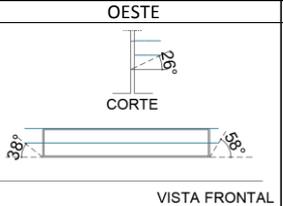
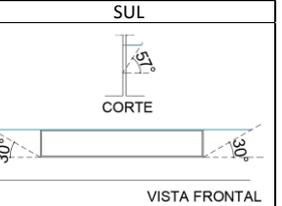
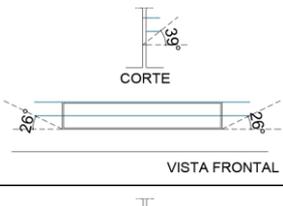
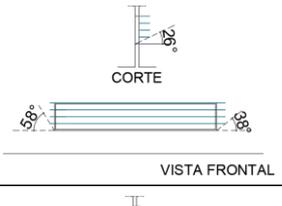
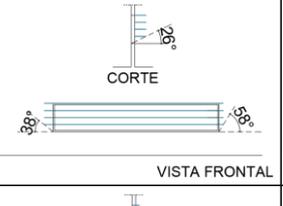
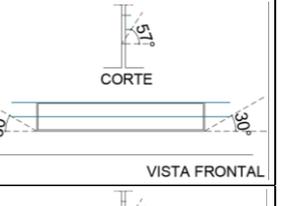
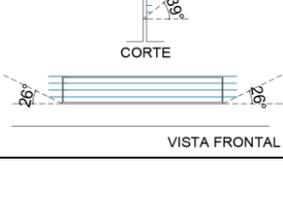
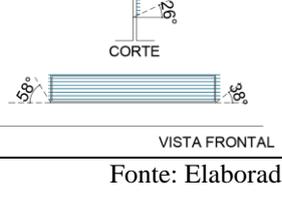
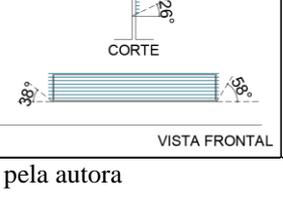
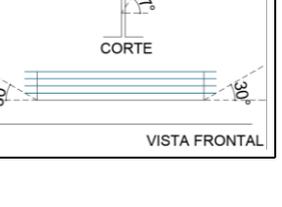
O próximo passo foi a configuração dos dispositivos de sombreamento utilizados para o processo de parametrização proposto para esta pesquisa. Com base nos objetivos estabelecidos – entre eles, o estudo da luz solar refletida para o ambiente interno – foram definidas três variáveis dos sistemas de dispositivos a serem analisadas:

- Número de peças;
- Especificidade;
- Refletância;

A primeira variável definida foi “número de peças”, a partir do desenvolvimento de três sistemas de dispositivos com diferentes quantidades de peças para cada orientação. Os sistemas foram desenvolvidos de maneira que a área de reflexão total das peças de cada sistema totalizasse sempre o mesmo valor, mantendo-se assim a mesma área de exposição solar por orientação, conforme Quadro 4.

A seguir serão apresentados os modelos propostos para o estudo de cada parâmetro definido para a etapa de análise exploratória. Para a análise estatística foi necessária uma adequação das categorias de cada variável a ser investigada e esta etapa será detalhada posteriormente.

Quadro 4 - Sistemas de dispositivos de sombreamento por orientação

	NORTE	LESTE	OESTE	SUL
SISTEMA a				
SISTEMA b				
SISTEMA c				

Fonte: Elaborado pela autora

Cada modelo apresenta na sua nomenclatura a representação do sistema ao qual pertence, da sua especificidade ou difusividade e da sua refletância. A representação do sistema ao qual pertence o modelo é definido através das letras *a*, *b* e *c*, que indicam a variação do número de peças. No caso das orientações Norte e Sul, os sistemas *a*, *b* e *c* correspondem, respectivamente, a dispositivos com uma, duas e quatro peças. Já nas orientações Leste e Oeste, a denominação dos sistemas corresponde a dispositivos com duas, quatro e oito peças.

A característica de reflexão dos dispositivos define se o tipo de reflexão é especular, difusa ou mista. Na nomenclatura, a letra *D* indica o valor da refletância difusa do modelo, e a letra *E*, o valor da refletância especular. No caso de haver valores de refletância tanto para reflexão difusa, quanto para especular, o modelo se caracteriza como de reflexão mista. No caso de o valor de refletância difusa *D* ser zero, o modelo em questão é totalmente especular, e no caso de o valor de refletância especular *E* ser zero, o modelo é totalmente difuso.

A refletância dos dispositivos, por sua vez, é caracterizada pela soma dos valores de refletância correspondentes à reflexão difusa e especular. A orientação à qual pertence o modelo é representada pela inicial da denominação, sendo *N* referente à Norte, *L* a Leste, *O* a Oeste e *S* a sul.

O modelo SaD45E45, por exemplo, corresponde à orientação Sul, ao sistema com menor quantidade de peças (sistema *a*) e possui refletância mista de 90%, sendo 45% difusa e 45% especular, conforme mostra a Figura 34. As características físicas de cada modelo serão detalhadas a seguir.

Figura 34 - Nomenclatura dos modelos utilizados



Fonte: Elaborado pela autora

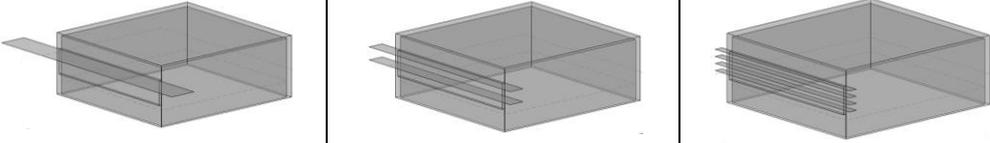
4.2.1 Número de peças dos sistemas

Para a análise da variação do número de peças, foi utilizada inicialmente a refletância 90% em todos os modelos estudados, dentro de cada grupo com reflexão difusa, mista e totalmente especular, conforme mostram os quadros de 5 a 8 que resumem a matriz de simulação desta variável para cada orientação. As demais refletâncias (de 10% a 70%) também foram utilizadas na análise. Não foi considerada a espessura das peças.

Nota-se que as orientações Leste e Oeste apresentam maior quantidade de peças nos seus sistemas, em comparação com as demais orientações. Isto se deve ao fato de que esta orientação

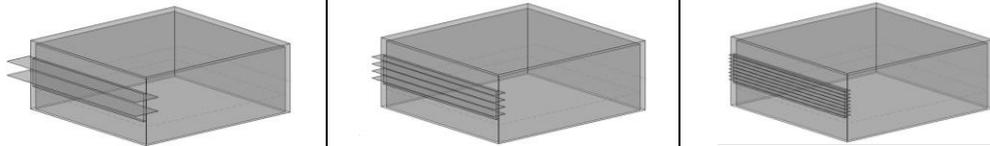
exige maior proteção contra insolação direta no período definido para o estudo, no caso de dispositivos horizontais de sombreamento.

Quadro 5 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Norte

ORIENTAÇÃO	NORTE								
SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
									
MODELOS	NaD90	NaD45E45	NaE90	NbD90	NbD45E45	NbE90	NcD90	NcD45E45	NcE90

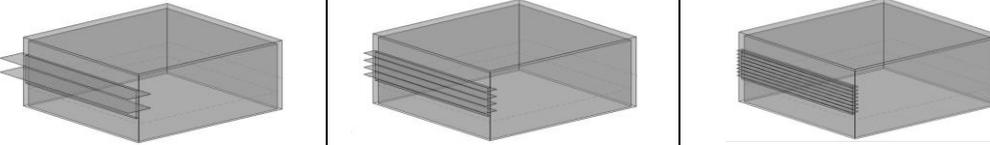
Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 6 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Leste

ORIENTAÇÃO	LESTE								
SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
									
MODELOS	LaD90	LaD45E45	LaE90	LbD90	LbD45E45	LbE90	LcD90	LcD45E45	LcE90

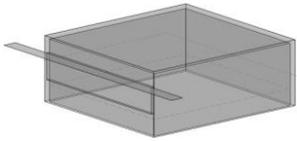
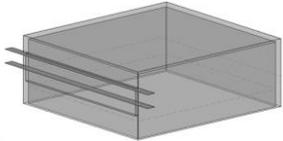
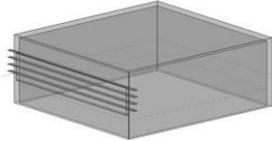
Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 7 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Oeste

ORIENTAÇÃO	OESTE								
SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
									
MODELOS	OaD90	OaD45E45	OaE90	ObD90	ObD45E45	ObE90	OcD90	OcD45E45	OcE90

Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 8 - Modelos para análise do número de peças dos dispositivos. Orientação Sul

ORIENTAÇÃO	SUL								
SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
									
MODELOS	SaD90	SaD45E45	SaE90	SbD90	SbD45E45	SbE90	ScD90	ScD45E45	ScE90

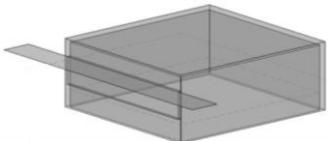
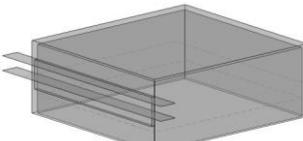
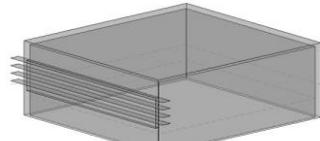
Fonte: Elaborado pela autora

4.2.2 Especificidade dos dispositivos

Também foram analisados os efeitos do incremento da especificidade dos dispositivos através da variação dos percentuais de cada tipo de reflexão em cada modelo estudado. Para esta análise, a refletância total foi fixada em 90% em todos os cinco modelos de cada sistema, por orientação estudada, conforme mostram os quadros de 9 a 12. Dentro de cada orientação e sistema foram definidos cinco modelos de dispositivos com reflexão especular variando entre 0 (modelos totalmente difusos) e 100% (modelos totalmente especulares), possuindo três desses modelos reflexão mista (difusa e especular).

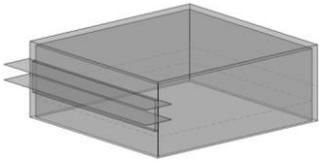
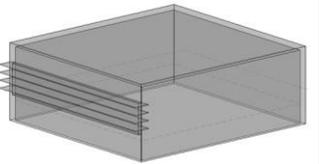
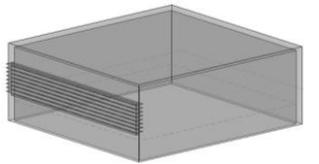
Nos três modelos com reflexão mista, a especificidade aumenta de forma crescente, sendo de 30% no primeiro modelo misto, de 45% no segundo e 60% no terceiro.

Quadro 9 - Modelos para análise da especificidade dos dispositivos. Orientação Norte

ORIENTAÇÃO	NORTE								
SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
									
MODELOS	NaD90E0			NbD90E0			NcD90E0		
	NaD60E30			NbD60E30			NcD60E30		
	NaD45E45			NbD45E45			NcD45E45		
	NaD30E60			NbD30E60			NcD30E60		
	NaD0E90			NbD0E90			NcD0E90		

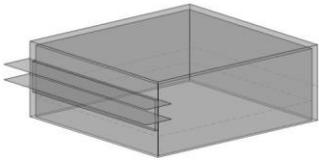
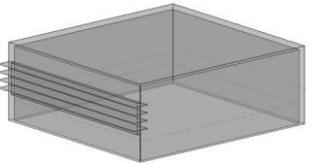
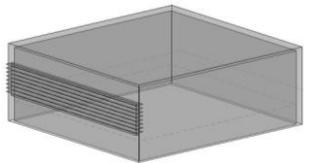
Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 10 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Leste

ORIENTAÇÃO	LESTE		
	Sistema a	Sistema b	Sistema c
SISTEMAS			
MODELOS	LaD90E0	LbD90E0	LcD90E0
	LaD60E30	LbD60E30	LcD60E30
	LaD45E45	LbD45E45	LcD45E45
	LaD30E60	LbD30E60	LcD30E60
	LaD0E90	LbD0E90	LcD0E90

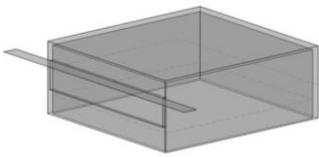
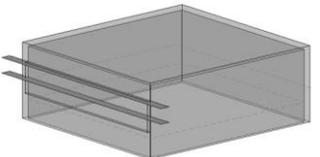
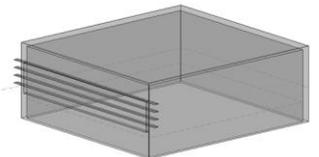
Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 11 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Oeste

ORIENTAÇÃO	OESTE		
	Sistema a	Sistema b	Sistema c
SISTEMAS			
MODELOS	OaD90E0	ObD90E0	OcD90E0
	OaD60E30	ObD60E30	OcD60E30
	OaD45E45	ObD45E45	OcD45E45
	OaD30E60	ObD30E60	OcD30E60
	OaD0E90	ObD0E90	OcD0E90

Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 12 - Modelos para análise da especularidade dos dispositivos. Orientação Sul

ORIENTAÇÃO	SUL		
	Sistema a	Sistema b	Sistema c
SISTEMAS			
MODELOS	SaD90E0	SbD90E0	ScD90E0
	SaD60E30	SbD60E30	ScD60E30
	SaD45E45	SbD45E45	ScD45E45
	SaD30E60	SbD30E60	ScD30E60
	SaD0E90	SbD0E90	ScD0E90

Fonte: Elaborado pela autora

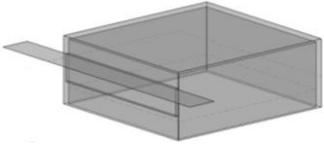
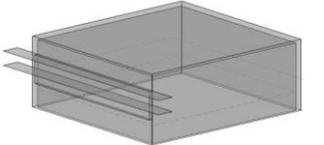
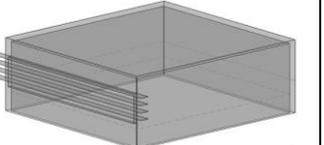
4.2.3 Refletância das superfícies dos dispositivos

A fim de investigar a influência das refletâncias para o desempenho dos dispositivos em relação ao redirecionamento da luz solar, foram utilizadas refletâncias variadas na simulação com a finalidade de reproduzir possibilidades de materiais empregados em dispositivos de sombreamento.

Considerando-se os três sistemas de dispositivos definidos para este estudo, foram estabelecidos dois grupos diferentes para cada sistema: o grupo dos dispositivos sem especularidade e o grupo dos dispositivos com reflexão total especular. Cada um desses dois grupos possui cinco modelos, com refletâncias variando entre 10% e 90%. Vale destacar que as refletâncias de 10% e 90%, embora não sejam comuns entre os materiais utilizados na construção, foram adotados nesta pesquisa para garantia de maior amplitude deste parâmetro.

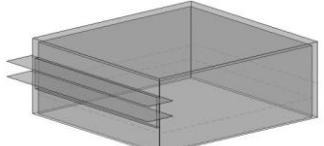
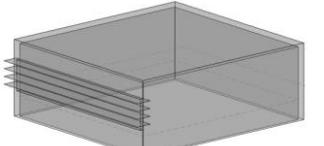
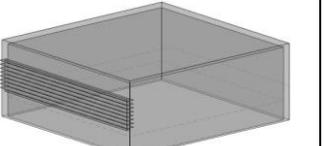
Os quadros de 13 a 16 apresentam os modelos utilizados para a análise da variação da refletância em cada orientação estudada.

Quadro 13 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Norte

ORIENTAÇÃO	NORTE					
SISTEMAS	Sistema a		Sistema b		Sistema c	
						
MODELOS	NaD10	NaE10	NbD10	NbE10	NcD10	NcE10
	NaD30	NaE30	NbD30	NbE30	NcD30	NcE30
	NaD50	NaE50	NbD50	NbE50	NcD50	NcE50
	NaD70	NaE70	NbD70	NbE70	NcD70	NcE70
	NaD90	NaE90	NbD90	NbE90	NcD90	NcE90

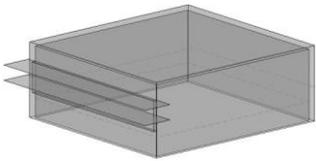
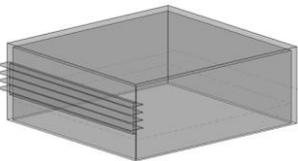
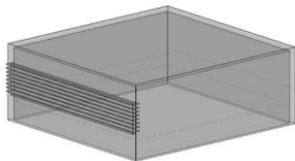
Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 14 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Leste

ORIENTAÇÃO	LESTE					
SISTEMAS	Sistema a		Sistema b		Sistema c	
						
MODELOS	LaD10	LaE10	LbD10	LbE10	LcD10	LcE10
	LaD30	LaE30	LbD30	LbE30	LcD30	LcE30
	LaD50	LaE50	LbD50	LbE50	LcD50	LcE50
	LaD70	LaE70	LbD70	LbE70	LcD70	LcE70
	LaD90	LaE90	LbD90	LbE90	LcD90	LcE90

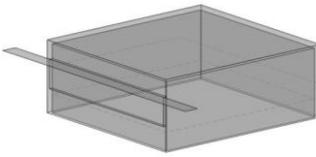
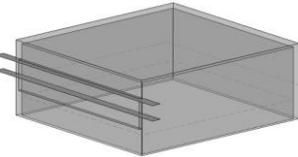
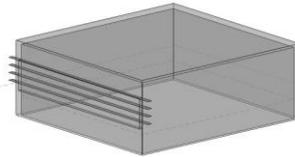
Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 15 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste

ORIENTAÇÃO	OESTE					
	Sistema a		Sistema b		Sistema c	
SISTEMAS						
MODELOS	OaD10	OaE10	ObD10	ObE10	OcD10	OcE10
	OaD30	OaE30	ObD30	ObE30	OcD30	OcE30
	OaD50	OaE50	ObD50	ObE50	OcD50	OcE50
	OaD70	OaE70	ObD70	ObE70	OcD70	OcE70
	OaD90	OaE90	ObD90	ObE90	OcD90	OcE90

Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 16 - Modelos para análise da refletância dos dispositivos. Orientação Sul

ORIENTAÇÃO	SUL					
	Sistema a		Sistema b		Sistema c	
SISTEMAS						
MODELOS	SaD10	SaE10	SbD10	SbE10	ScD10	ScE10
	SaD30	SaE30	SbD30	SbE30	ScD30	ScE30
	SaD50	SaE50	SbD50	SbE50	ScD50	ScE50
	SaD70	SaE70	SbD70	SbE70	ScD70	ScE70
	SaD90	SaE90	SbD90	SbE90	ScD90	ScE90

Fonte: Elaborado pela autora

4.3 Definição dos indicadores de desempenho para avaliação da iluminação natural

Os métodos para análise do desempenho dos dispositivos de sombreamento foram baseados na avaliação de aspectos relacionados à disponibilidade, distribuição e manutenção da iluminação. Os indicadores utilizados no estudo foram Iluminância média anual (E_{ma}), Uniformidade média anual (U_{ma}) e Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe).

A iluminância média da malha de pontos localizada no ambiente foi utilizada para o período de um ano (E_{ma}), e também foi considerada a sua variação (ΔE_{ma}), proporcionada pela parametrização nos variados cenários estudados. A variação da iluminância média anual é dada

pela seguinte equação:

$$\Delta E_{ma} = \frac{E_{mat} - E_{map}}{E_{map}} \times 100\% \quad [\text{Eq. 2}]$$

Sendo E_{map} a iluminância média do tipo padrão de cada grupo e E_{mat} a iluminância média dos demais tipos. Este indicador é útil por representar o ganho real em porcentagem na iluminância média no plano de trabalho proporcionado por cada tipo analisado e facilitar a comparação entre os grupos analisados.

Para o estudo da Uniformidade também foi analisada a distribuição de iluminâncias na malha de pontos do ambiente, para o período de um ano (U_{ma}). A uniformidade utilizada nesta pesquisa é definida pela Equação 1 (subseção 3.2.2) e também foi levada em consideração a análise da sua variação, conforme Equação 3:

$$\Delta U_{ma} = \frac{U_{mat} - U_{map}}{U_{map}} \times 100\% \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde U_{map} corresponde à uniformidade média do tipo padrão e U_{mat} à uniformidade média dos demais tipos. No estudo realizado foram calculados os índices de uniformidade para cada situação, considerando como objetivo principal a avaliação comparativa entre as soluções definidas previamente, uma vez que o valor recomendado pela norma citada, que corresponde a 0,7 ou 70%, não foi estabelecido como parâmetro devido à dificuldade de ser obtido apenas com o uso da iluminação natural, conforme discutido na seção 3.2.2.

Também foi analisada a Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe), adaptada para aplicação a partir da configuração de céu com distribuição dinâmica de luminâncias, baseado na probabilidade real de ocorrência de três tipos de céu para Maceió. O método da exposição solar anual (ESA) não foi utilizado nesta pesquisa, uma vez que no plano de trabalho do ambiente modelo com proteção não há incidência direta da luz solar.

O período de estudo estabelecido para a aplicação do método corresponde a 10 horas diárias, durante todo o ano, das 8h às 18h (IESNA, 2012). Porém o período de análise tem sido adaptado para aplicação de acordo com a realidade climática, o período de ocupação do ambiente e com os objetivos de cada pesquisa, reduzindo ou ampliando as horas em relação às recomendações originais (FELIPPE, 2016; KORSAVI et al., 2016; NAULT et al., 2017). Nesta pesquisa, o período de estudo também foi adaptado, reduzido para o período das 8h às 16h, levando em consideração a hora solar. Cabe salientar que o ambiente em estudo se trata de uma sala de aula para ensino universitário e que os horários de funcionamento de um ambiente desse

tipo correspondem a praticamente todas as horas do dia e da noite. Este estudo, porém, limitou-se a investigar parte desse período, sem prejuízo do cumprimento dos objetivos estabelecidos.

A iluminância definida para o ambiente foi de 500lx, diferente dos 300lx indicados pela LM-83-12 (IESNA, 2012). Esta pesquisa baseia-se na norma NBR ISO/CIE 8998 para a definição da iluminância a ser alcançada no plano de trabalho do ambiente em questão, bem como da malha de pontos para análise. Os ambientes foram avaliados a partir do método da Autonomia de Luz Natural Espacial, $ALNe_{500lx/50\%}$, a partir de uma malha de 72 pontos. Para este indicador, também foi analisada a distribuição das porcentagens de tempo em que a iluminância de 500lx é alcançada no plano de trabalho, para que fosse possível estabelecer comparação do comportamento da luz natural entre os variados cenários definidos.

4.4 Eficiência da luz solar refletida

Para o desenvolvimento do índice de eficiência da luz solar refletida (η_{sr}), definido e proposto nesta pesquisa, a componente de luz solar refletida média anual de cada modelo foi analisada separadamente e relacionada à iluminância média anual global no plano de trabalho. A partir da utilização deste índice, foi possível identificar a eficiência de cada sistema em refletir a luz solar para o interior do ambiente, contribuindo assim, para um maior aproveitamento dessa fonte de luz na forma difusa.

A eficiência de cada sistema de dispositivos em refletir a luz solar para o ambiente interno é dada através da Equação 4:

$$\eta_{sr} = \frac{E_{sr}}{E_g} \times 100\% \quad [\text{Eq. 4}]$$

Onde E_g corresponde à iluminância global e E_{sr} corresponde à iluminância relativa à componente de luz solar refletida.

Especialistas da área concordam que, embora os sistemas de controle da luz natural sejam importantes componentes para a qualidade da iluminação e redução do consumo de energia, sua configuração é geralmente definida nas últimas fases do processo de projeto (LESLIE et al., 2012). O uso deste índice pode contribuir para um melhor desempenho da iluminação natural no ambiente interno, auxiliando decisões na fase inicial de concepção dos projetos.

4.5 Definição do software utilizado

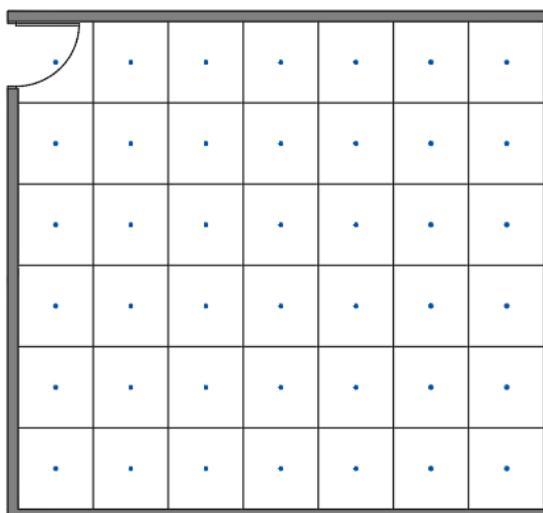
O programa TropLux na sua versão 7, utilizado como ferramenta para desenvolvimento da pesquisa, foi considerado adequado para o desenvolvimento da pesquisa, conforme discussão na seção 3.1.1. Todos os tipos de sistemas de sombreamento propostos foram modelados no programa para posterior realização de simulações computacionais a fim de que fossem gerados os dados necessários para as análises posteriores.

Os dados obtidos foram transferidos para planilhas de acordo com a parametrização proposta, e organizados na forma de gráficos que serão apresentados nas próximas seções do trabalho.

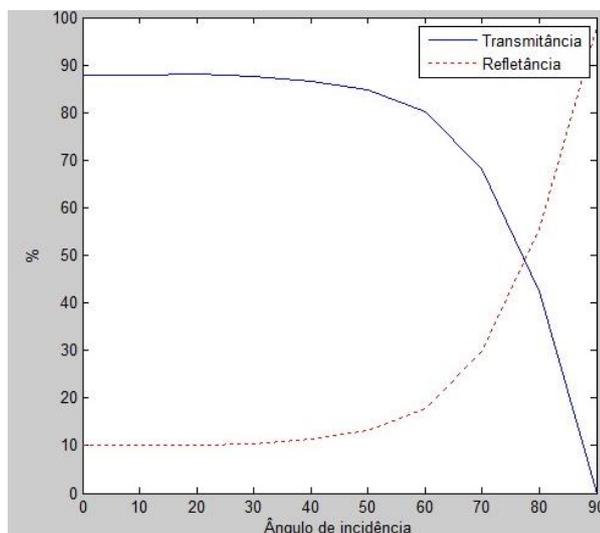
4.6 Parâmetros de simulação

Os dados foram calculados em uma malha de pontos definidos pela norma da ABNT ISO/CIE 8995, que se baseia no tamanho e na forma da superfície de referência. Para o ambiente modelo em questão, a referida norma, no seu Anexo B, recomenda a utilização de uma malha de 9 x 8, totalizando 72 pontos de cálculo (ver Figura 35). A eficiência da luz solar refletida e os indicadores de desempenho de cada ambiente serão obtidos a partir da média dos pontos da malha. Para o vidro que compõe a janela do ambiente modelo foram adotadas as características de vidro comum, padrão do TropLux, conforme mostra a Figura 36. A altura do plano de trabalho foi fixada em 75cm.

Figura 35 - Disposição dos pontos em malha no ambiente de simulação



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 36 - Propriedades do vidro em relação ao ângulo de incidência da luz

Fonte: TropLux.

As simulações foram realizadas para a cidade de Maceió, Alagoas. Com o intuito de obter dados anualizados, foram considerados todos os dias do ano, em 9 horários, entre 8h e 16h (hora solar), hora a hora.

De acordo com Cabús (2002), o céu parcialmente nublado é o tipo mais comum em Maceió, com 61,8% de ocorrência, seguido do céu encoberto, com 25,8% e do céu claro, com 12,4%. Diante da consideração desses dados, as simulações basearam-se na probabilidade real de ocorrência dos três tipos de céu para a Cidade de Maceió, a partir da utilização da configuração de céu com distribuição dinâmica de luminância, disponível no TropLux.

Foram realizadas simulações considerando as orientações Norte, Sul, Leste e Oeste da abertura. A escolha das orientações teve como base a trajetória solar ao longo da abóbada celeste: nas orientações Norte e Sul o movimento aparente do sol se aproxima de uma trajetória paralela ao plano da fachada, porém com diferença de insolação entre elas; nas orientações Leste e Oeste o sol percorre a abóbada na direção normal ao plano da fachada. Para este estudo não foram consideradas obstruções no entorno do modelo.

4.7 Análise dos resultados

A análise dos resultados foi dedicada ao estudo da eficiência da luz solar refletida e sua relação com indicadores de desempenho da iluminação natural. Este capítulo compreende dois tipos de análise: análise exploratória e análise estatística.

A análise exploratória foi realizada inicialmente a partir da observação do comportamento da eficiência da luz solar refletida (η_{sr}) frente aos parâmetros estabelecidos para a pesquisa, levando em consideração as orientações definidas. Em um segundo momento, esta análise teve o objetivo de investigar o comportamento dos indicadores de desempenho da iluminação natural diante da presença de luz solar refletida no ambiente, também por meio do uso do índice de eficiência da luz solar refletida (η_{sr}). Os indicadores definidos para este fim foram a iluminância média anual (E_{ma}), a uniformidade média anual (U_{ma}) e suas variações (ΔE_{ma} e ΔU_{ma}) e a autonomia de luz natural espacial (ALNe).

Com o intuito de proporcionar melhor entendimento a respeito da análise dos dados, inicialmente foram detalhados os dados referentes à orientação Norte e ao parâmetro “número de peças”. Posteriormente, foram analisadas as demais orientações em comparação com a primeira, e, por fim, os demais parâmetros investigados.

Os dados resultantes das simulações foram inseridos em planilhas elaboradas de acordo com a parametrização pré-definida, e constam no Apêndice C. Este tratamento de dados foi necessário para posterior montagem dos gráficos inerentes à análise exploratória.

A fim de verificar o comportamento das variáveis definidas e confirmar estatisticamente os resultados encontrados na análise exploratória foi realizada a análise estatística dos dados, a partir do uso de Regressão Múltipla e Correlação. Usando o método dos mínimos quadrados, a regressão permite avaliar o comportamento de uma variável dependente diante de duas ou mais variáveis independentes. Para tanto, foi necessário o ajuste dos modelos definidos, a fim de padronizar as categorias de cada variável investigada. Todos os parâmetros definidos foram utilizados na análise estatística, conforme mostra a Tabela 4, elaborada de acordo com as categorias estabelecidas para a orientação Norte.

No caso das orientações Leste e Oeste, as categorias da variável “número de peças” são diferentes, uma vez que nestas situações os sistemas possuem maior quantidade de peças. Observa-se que a variável 03 “Especularidade dos dispositivos” consiste em uma variável qualitativa dos dispositivos, referente à característica de reflexão das superfícies das peças, e, para que fosse incluída nesta etapa de análise, foi necessária sua conversão em valor numérico (1, 2 e 3), sendo o menor valor correspondente à situação de modelo sem especularidade (difuso).

Tabela 4: Variáveis e categorias para análise estatística. Orientação Norte

Variável	Tipo	Definição	Categorias do modelo	Categorias estatística
Variável 01	Dependente	Índice de eficiência de luz solar refletida (η_{sr})	–	–
Variável 02	Independente	Número de peças	Sistema a- 01 peça	1
			Sistema b- 02 peças	2
			Sistema c- 04 peças	4
Variável 03	Independente	Especularidade dos dispositivos	Sem especularidade	1
			50% de especularidade	2
			100% de especularidade	3
Variável 04	Independente	Refletância dos dispositivos	0,1	0,1
			0,5	0,5
			0,9	0,9

Fonte: Elaborado pela autora

Para que fosse mantido o mesmo número de categorias de variáveis, neste caso, três categorias, foram utilizadas três refletâncias, entre as cinco utilizadas na análise exploratória. Com a mesma finalidade, a variável 03 também foi reduzida para três situações de especularidade.

A fim de se obter a relação entre eficiência e indicadores de desempenho da iluminação natural, foi desenvolvida análise estatística por meio do uso de matrizes de correlação. A importância de se estabelecer essa relação está na possibilidade de auxílio quanto a escolha de soluções capazes de ampliar a parcela de luz solar refletida no ambiente.

Também nesta etapa foi utilizado o mesmo número de categorias de variáveis. Os resultados da análise estatística de regressão foram apresentados na forma de planilha de efeitos estimados, onde constam os valores dos efeitos de cada variável independente para a variação da eficiência da luz solar refletida, além de gráficos que relacionam a interação de duas variáveis.

O último capítulo apresenta a síntese dos resultados representada pela indicação de recomendações para o projeto para dispositivos de sombreamento baseadas na eficiência da luz solar refletida e no desempenho da iluminação natural.

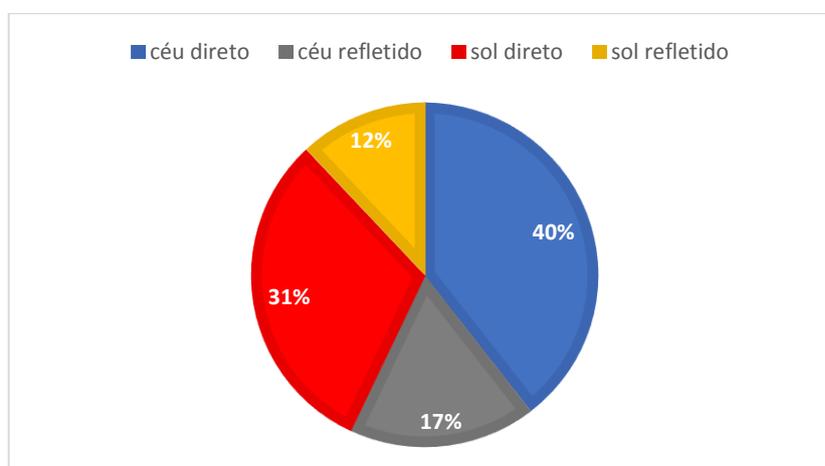
5 RESULTADOS

Para a análise da eficiência, o comportamento da luz solar refletida foi observado diante da variação de características, ou parâmetros, de dispositivos de sombreamento, primeiramente referentes à orientação Norte e posteriormente para Leste, Oeste e Sul. O parâmetro utilizado inicialmente para este fim é o número de peças dos dispositivos.

5.1 Orientação Norte

A Figura 37 mostra a porcentagem das componentes da iluminação no ambiente-modelo desprovido de proteção, com abertura voltada para a orientação Norte. Sem a proteção solar na abertura percebe-se que as parcelas com maiores contribuições são referentes ao céu e sol direto. A importância da inserção de dispositivos, conforme discutido nas etapas anteriores, está na busca por maior contribuição da luz solar na forma refletida.

Figura 37 - Parcelas de componentes da iluminação natural. Modelo sem proteção. Orientação Norte



Fonte: Elaborado pela autora

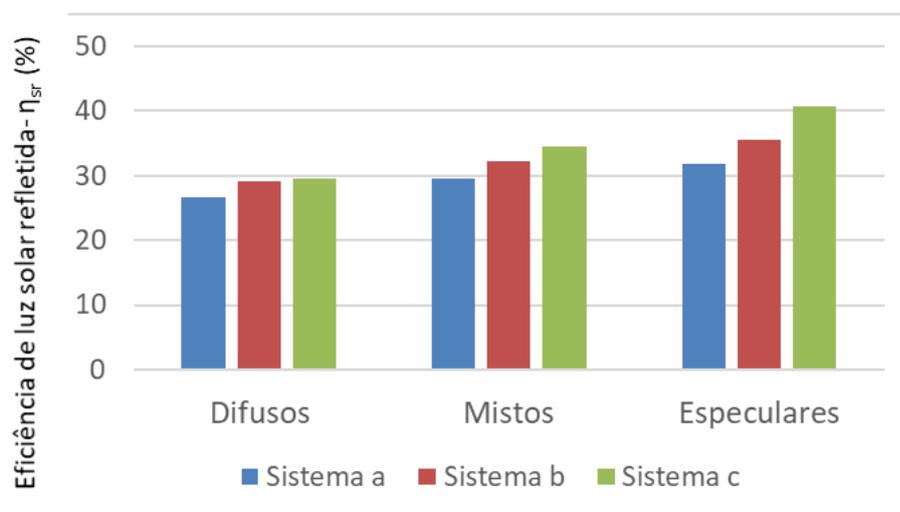
5.1.1 Eficiência da luz solar refletida (η_{sr})- Orientação Norte

Em modelos com refletância de 90%, a análise da orientação Norte indicou que a inserção de mais peças pode resultar em maior aproveitamento da luz solar. Os modelos especulares apresentaram ganhos de 28% e correspondem ao grupo capaz de proporcionar maiores variações na eficiência. Os modelos com reflexão mista e difusos apresentaram ganhos de 17% e 11%, respectivamente.

A Figura 38 mostra graficamente a variação do índice de eficiência da luz solar refletida

dos três grupos com diferentes tipos de reflexão diante do aumento no número de peças dos dispositivos, no caso de refletância de 90%. Na orientação Norte observa-se a variação resultante desse aumento, sobretudo no caso do grupo especular.

Figura 38 - Gráfico de comportamento da eficiência da luz solar refletida em relação aos três sistemas estudados. Orientação Norte. Refletância 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças



Fonte: Elaborado pela autora

Analisando-se os modelos com refletâncias abaixo de 90% referentes à orientação Norte (Tabela 5) observa-se que somente a partir da refletância de 70%, no caso dos modelos difusos, e da refletância de 50%, no caso dos modelos especulares, o aumento do número de peças resulta em ganhos para o aproveitamento da luz solar refletida.

Tabela 5 - Variação de Eficiência de luz solar refletida em relação ao aumento do número de peças, por refletância. Orientação Norte.

Refletância (%)	Variação de η_{sr} (%)	
	Difusos	Especulares
10	-28	-25
30	-18	-9
50	-1	5
70	2	17
90	11	27

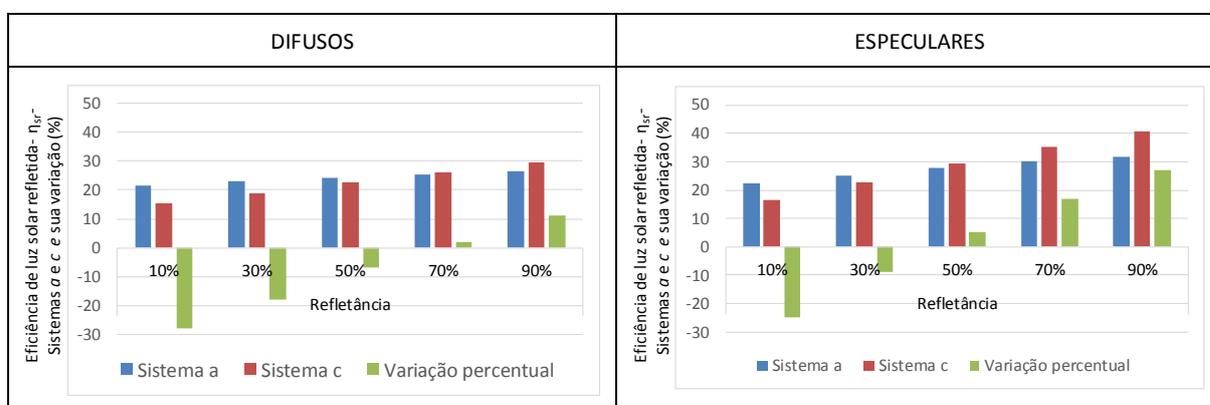
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 39 compara os valores da eficiência da luz solar refletida diante do aumento do número de peças entre modelos pertencentes ao sistema com menor número de peças (sistema a) e ao sistema com maior número de peças (sistema c). A barra verde mostra a variação

percentual positiva ou negativa do índice a partir do aumento do número de peças nos cinco grupos de refletância (10%, 30%, 50%, 70% e 90%).

A partir dos dados mostrados é possível afirmar que no caso de menores refletâncias, um maior número de peças não proporciona aumento do índice de eficiência da luz solar refletida. Quando se trata de modelos com refletância de 90%, o aumento do número de peças é capaz de proporcionar ganhos nos três grupos de reflexão, e corresponde a uma estratégia interessante para o aproveitamento da luz solar refletida.

Figura 39 - Eficiência da luz solar refletida e variação percentual entre os sistemas a e c, difusos e especulares. Orientação Norte. Refletâncias entre 10% e 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças



Fonte: Elaborado pela autora

5.1.2 Indicadores de desempenho- Orientação Norte

Com o objetivo de investigar o comportamento de indicadores de desempenho da iluminação natural diante do aumento do número de peças, foram analisadas as variações da iluminância média anual (ΔE_{ma}), da uniformidade média anual (ΔU_{ma}) e a autonomia de luz natural espacial (ALNe).

5.1.2.1 Variação da Iluminância média anual (ΔE_{ma})- Orientação Norte

A partir da observação dos dados presentes na Tabela 6, é possível afirmar que a orientação Norte proporciona ganhos significativos para a iluminância média anual diante do aumento do número de peças dos dispositivos com refletância de 90%.

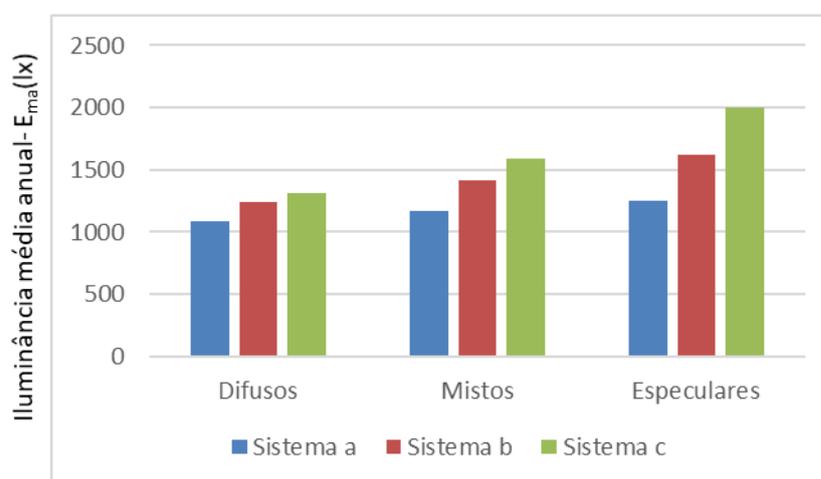
Tabela 6 - Variação da Iluminância média anual em relação ao aumento do número de peças, por refletância. Orientação Norte.

Refletância (%)	ΔE_{ma} (%)	
	Difusos	Especulares
10	-14	-11
30	-10	1
50	-2	17
70	8	36
90	20	60

Fonte: Elaborado pela autora

Tais ganhos são superiores no caso de dispositivos com reflexão do tipo especular, da mesma maneira que foi observado em relação à eficiência da luz solar refletida. O aumento da E_{ma} proporcionado pela variação do sistema *a* para o sistema *c* entre os modelos sem especularidade chegou a 20% e no caso dos modelos especulares foi de 60%. A Figura 40 apresenta a variação da iluminância média no caso de modelos com refletância de 90%. Percebe-se que no sistema *c* são observadas as maiores diferenças entre os desempenhos dos três grupos de reflexão, enquanto que no caso do sistema *a*, os valores de E_{ma} são aproximados.

Figura 40 - Gráfico de comportamento da iluminância média anual em relação aos três sistemas estudados. Orientação Norte. Refletância 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças



Fonte: Elaborado pela autora

Analisando os modelos com refletâncias abaixo de 90% (ver Tabela 6), também é possível notar comportamento semelhante ao da componente de luz solar refletida: somente a partir da refletância de 70%, no caso dos modelos difusos, e da refletância de 30%, no caso dos modelos especulares, o aumento do número de peças resulta em ganhos para E_{ma} . Levando-se em

consideração os modelos analisados neste estudo, é necessário que se esteja atento à influência da refletância dos dispositivos de sombreamento, quando se tem o objetivo de trazer mais iluminação para o interior do ambiente.

Pode-se notar que, no caso da orientação Norte, um maior número de peças teve como resultado maiores valores de iluminância e maior aproveitamento da luz solar na forma refletida em modelos de dispositivos com refletância a partir de 70%. A próxima seção investiga o efeito do aumento do número de peças para a distribuição da iluminância no plano de trabalho.

5.1.2.2 Variação da Uniformidade média anual (ΔU_{ma})- Orientação Norte

A Tabela 7 mostra que na orientação Norte o aumento no número de peças atuou na redução do índice de uniformidade, demonstrando que, no caso dos modelos estudados, uma configuração mais complexa dos dispositivos não favorece a distribuição de iluminâncias no ambiente.

Tabela 7 - Variação da Uniformidade média anual em relação ao aumento do número de peças, por refletância. Orientação Norte.

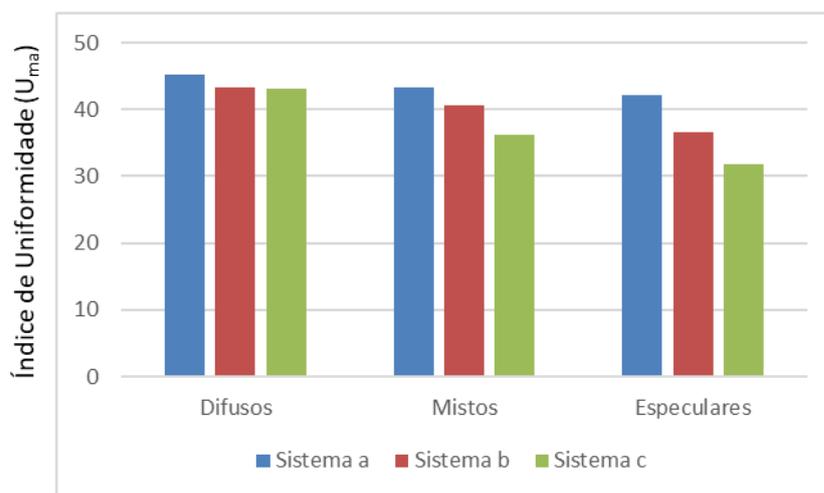
Refletância (%)	ΔU_{ma} (%)	
	Difusos	Especulares
10	16	13
30	8	4
50	8	-5
70	1	-15
90	-4	-24

Fonte: Elaborado pela autora

O grupo dos dispositivos especulares foi responsável pela maior redução da uniformidade no ambiente, sendo de 24% a sua variação comparando-se o sistema *a* e o sistema *c*. Já os dispositivos difusos apresentaram a menor variação de uniformidade frente ao aumento do número de peças, sendo de 4% a redução do índice.

É possível analisar graficamente esta variação a partir da observação da Figura 41 que apresenta a variação da uniformidade diante do aumento do número de peças, no caso de modelos com refletância de 90%: percebe-se que os modelos difusos apresentam a menor variação diante da mudança dos sistemas, seguidos dos mistos.

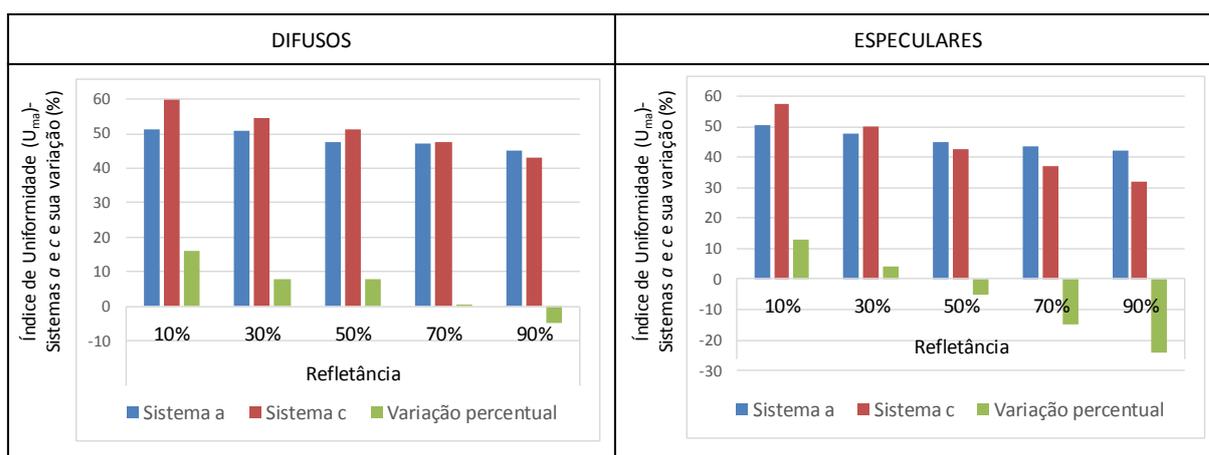
Figura 41 - Gráfico de comportamento da uniformidade média anual em relação aos três sistemas estudados. Orientação Norte. Refletância 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças



Fonte: Elaborado pela autora

Nas seções anteriores foi visto que o aumento do número de peças em modelos com refletâncias menores resultou em comportamento diferente em comparação com modelos com refletância de 90%. No gráfico da Figura 42 percebe-se que no caso dos modelos difusos, o aumento do número de peças com refletâncias de 10%, 30%, 50% e 70% resultou em ganhos distribuídos de forma decrescente para uniformidade.

Figura 42 - Uniformidade e variação percentual entre os sistemas a e c, difusos e especulares. Orientação Norte. Refletâncias entre 10% e 90%. Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças



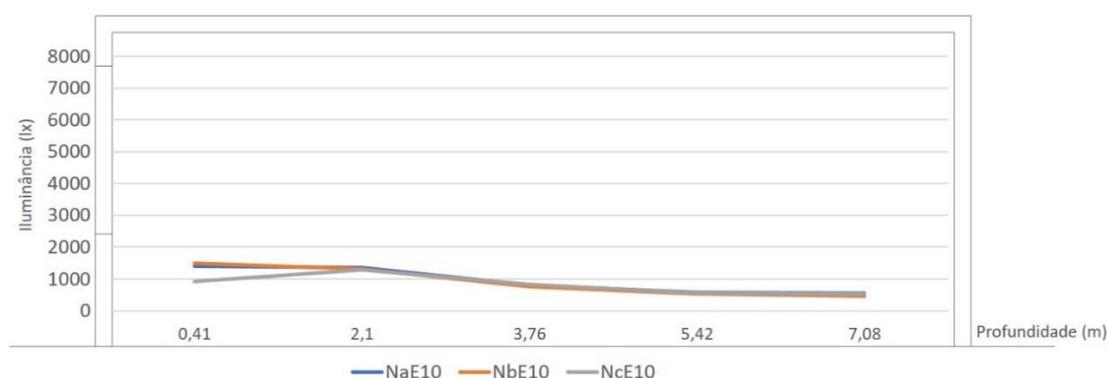
Fonte: Elaborado pela autora

No caso de modelos especulares, o aumento do número de peças apenas resultou em ganhos para a uniformidade em dispositivos com refletância até 30%. Nos demais modelos estudados, podem ser observadas perdas que aumentam com o incremento da refletância. É

possível observar a partir da Figura 42 que a variação da U_{ma} apresenta comportamento inverso em relação à variação de η_{sr} e de E_{ma} . Enquanto que o número de peças representou redução de eficiência da luz solar refletida e de iluminância média anual no caso de dispositivos com refletâncias menores, para a uniformidade média anual as menores refletâncias resultaram em benefício para a distribuição da iluminação no plano de trabalho.

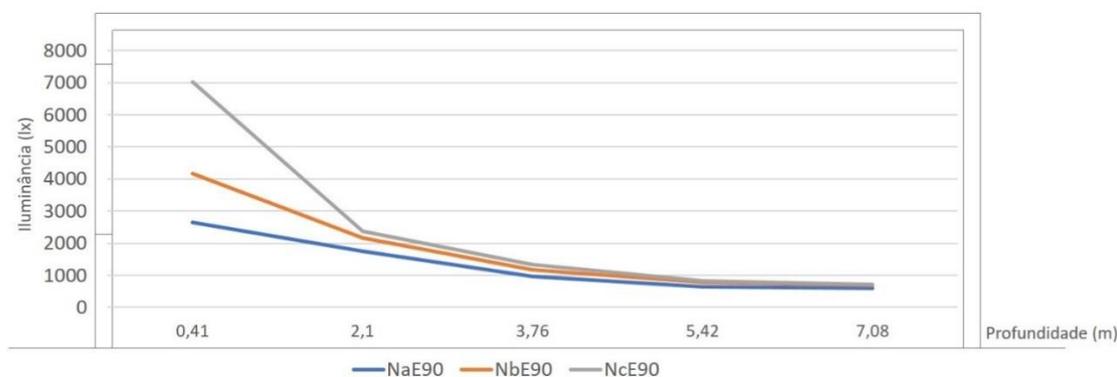
Portanto, pode-se afirmar que sistemas com menores refletâncias são capazes de incrementar a uniformidade no ambiente com o aumento do número de peças, enquanto que maiores refletâncias resultaram em redução do índice. Analisando um corte longitudinal passando próximo ao centro do ambiente, com a indicação da iluminância média anual de cinco pontos localizados ao longo da profundidade do ambiente, é possível observar a variação da iluminação quando a distância da abertura aumenta. A Figura 43 e a Figura 44 comparam a variação da iluminância média de três modelos de dispositivos com reflexão especular e refletância de 10%, com a mesma variação entre três modelos de dispositivos com refletância de 90% para a orientação Norte.

Figura 43 - Variação da iluminância média anual (eixo vertical em lx) a partir da distância da abertura. Orientação Norte. Comparação entre os três sistemas de dispositivos de sombreamento. Refletância 10%



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 44 - Variação da iluminância média anual (eixo vertical em lx) a partir da distância da abertura. Orientação Norte. Comparação entre os três sistemas de dispositivos de sombreamento. Refletância 90%



Fonte: Elaborado pela autora

No caso dos modelos com refletância de 10% percebe-se que há maior uniformidade entre os valores de iluminância ao longo do ambiente, mesmo levando em consideração os pontos mais próximos da abertura, e que o aumento no número de peças resulta em pequena variação nos níveis de iluminação.

Já no caso dos modelos com refletância de 90%, são observados altos valores de iluminância no ponto mais próximo da abertura, que são ampliados com o aumento do número de peças, enquanto os valores de iluminância dos pontos mais distantes apresentam menor variação, resultando em menor uniformidade na distribuição da iluminação no plano de trabalho. A variação da iluminância média entre os pontos localizados a 0,41m e 7,08m da abertura no modelo NcE90 corresponde a uma fração de 10:1, enquanto que no modelo NaE90 corresponde a aproximadamente 4:1. Entre os modelos com refletância de 10% e de 90%, uma maior uniformidade no desempenho dos modelos é observada a partir de uma distância média de dois metros da abertura.

Além da uniformidade, a manutenção de iluminância adequada também deve ser observada, a fim de que seja preservado o adequado desenvolvimento das atividades no ambiente. Neste sentido, a próxima seção analisa a autonomia de luz natural espacial (ALNe) e sua distribuição no plano de trabalho diante da variação do número de peças dos modelos estudados.

5.1.2.3 Autonomia de luz natural espacial (ALNe_{500lx/50%})- Orientação Norte

No caso da observação do parâmetro número de peças, foram considerados modelos com

refletâncias de 10%, 50% e 90%, com características de reflexão difusa, mista e especular. A Tabela 8 apresenta as porcentagens referentes à $ALNe_{500/50\%}$ para a orientação Norte, referentes aos modelos do sistema *a* e *c*, difusos e especulares.

Tabela 8 - Autonomia de luz natural espacial referentes aos modelos difusos e especulares do sistema *a* e *c*. Orientação Norte.

Refletância (%)	ALNe (%)			
	Sistema a		Sistema c	
	Difusos	Especulares	Difusos	Especulares
10	94	96	90	90
50	98	100	100	100
90	100	100	100	100

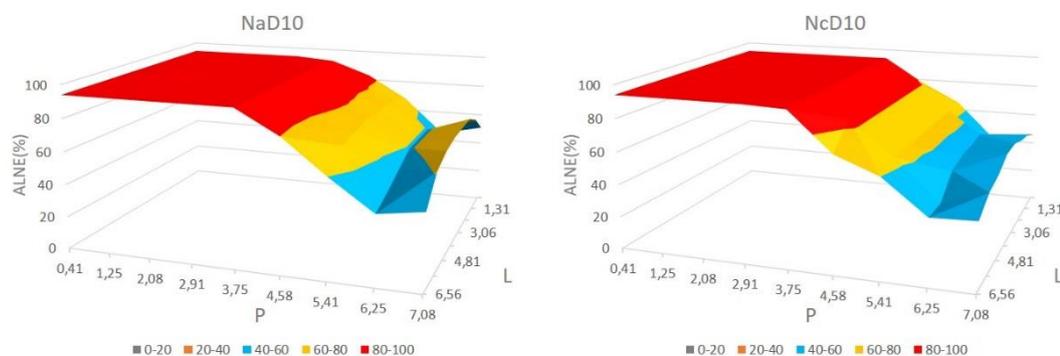
Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se que os modelos com refletância de 10% apresentaram redução de $ALNe_{500/50\%}$ diante do aumento do número de peças, da mesma forma que foi observado com a η_{sr} e E_{ma} . A redução da contribuição da luz solar refletida e da iluminância média anual influenciou a manutenção da autonomia no caso dos modelos com refletância de 10%. Já nos modelos com refletâncias maiores, os valores de $ALNe_{500/50\%}$ variaram entre 98% e 100% e o aumento do número de peças não representou variação.

A Figura 45 compara graficamente as porcentagens de $ALNe_{500/50\%}$ distribuídas no ambiente em estudo, referentes aos modelos NaD10 e NcD10, onde foram observadas reduções, com o objetivo de observar o efeito da variação do número de peças. Pode-se notar que um maior número de peças contribuiu para a redução da porcentagem nas áreas de maior profundidade do ambiente. Mesmo com essa redução identificada nas áreas mais distantes da abertura, em todos os modelos dessa orientação, a $ALNe$ pode ser classificada como preferível, ficando acima de 75%.

A importância da inserção de dispositivos de sombreamento em aberturas laterais já foi afirmada no referencial teórico, com objetivo principal de prevenir ganhos de calor e ofuscamento para o ambiente interno. Porém, torna-se relevante analisar ainda, no momento de se prever determinado tipo de proteção, a influência de parâmetros físicos dos dispositivos de sombreamento a fim de garantir aproveitamento da luz solar refletida, de forma que não haja perdas significativas para o desempenho da iluminação natural no ambiente.

Figura 45 - Gráficos de variação de $ALNE_{500/50\%}$ ao longo dos ambientes referentes aos modelos NaD10 e NcD10. Orientação Norte. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

No caso da eficiência da luz solar refletida, proposta para esta pesquisa, e considerando-se a orientação Norte, pode-se dizer que a influência do aumento do número de peças para um maior aproveitamento da luz solar refletida está relacionada a outra característica física dos dispositivos: a refletância das suas superfícies. Observou-se que, na maior parte dos casos analisados, menores refletâncias atuaram na redução da eficiência enquanto que maiores refletâncias resultaram em maior aproveitamento da luz solar, em todos os diferentes grupos de reflexão.

Analisando os indicadores de desempenho, percebe-se que comportamento semelhante pôde ser visto em relação à variação da iluminância média anual: mais uma vez a refletância dos dispositivos foi determinante para a garantia de ampliação da iluminação no interior do ambiente por meio do aumento do número de peças. Em relação à manutenção da iluminância adequada ao desempenho das atividades, também se observou que a refletância de 10% atuou na sua redução, e que um maior número de peças, neste caso, reduziu a porcentagem de ALNe na parte posterior do ambiente. A uniformidade, por sua vez, apresentou comportamento inverso dos demais indicadores avaliados.

É possível estender tais observações ao desenvolvimento de diretrizes para aplicação de dispositivos de sombreamento com diferentes números de peças em ambientes voltados para o Norte na cidade de Maceió, uma vez que o comportamento da luz solar refletida e de indicadores de desempenho foram explorados nesta seção. Porém, é relevante que sejam analisadas as demais orientações propostas para este estudo, com a finalidade de ampliar a aplicação de estratégias para otimizar o uso de dispositivos de sombreamento.

5.2 Todas as orientações analisadas

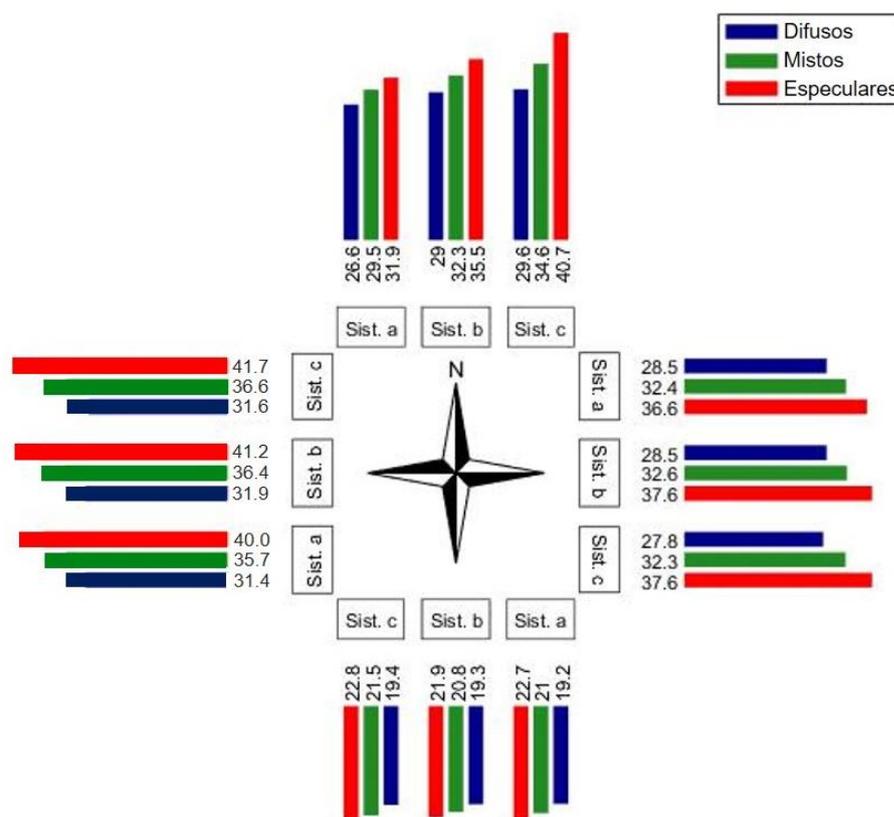
Para análise das demais orientações definidas neste estudo, foram analisados a presença da luz solar no ambiente por meio da eficiência da luz solar refletida, bem como os indicadores de desempenho já avaliados na seção anterior para a orientação Norte. Também nesta etapa o efeito do aumento do número de peças foi considerado como parâmetro dos dispositivos de sombreamento.

5.2.1 Eficiência da luz solar refletida (η_{sr})- Todas as orientações

Na orientação Leste, o aumento no número de peças não resultou em variação significativa da eficiência da luz solar refletida em nenhum dos grupos de dispositivos analisados, com refletância de 90%. Tal comportamento também foi observado na orientação Oeste.

Na orientação Sul a variação no desempenho dos três grupos de reflexão analisados também foi bem reduzida, o que pode ser melhor observado no gráfico da Figura 46, indicando que nesta orientação o desempenho de dispositivos difusos, mistos e especulares se aproxima. A orientação Oeste, por sua vez, apresentou maior variação entre os grupos e menor variação entre os sistemas, em comparação com a orientação Norte.

Figura 46 - Gráfico de variação da eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento do número de peças. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

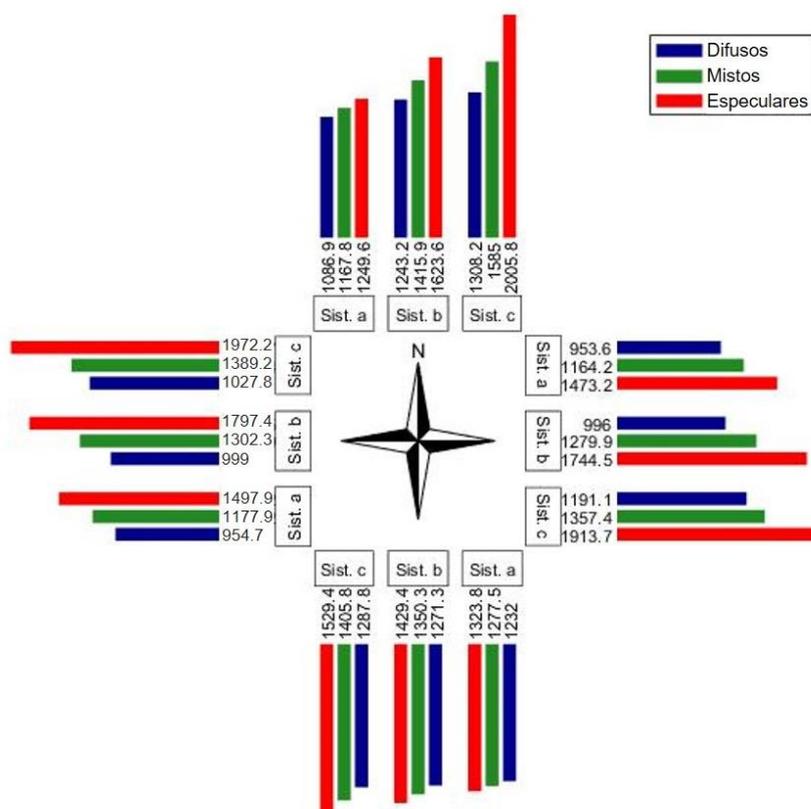
5.2.2 Indicadores de desempenho- Todas as orientações

Para as orientações Leste, Oeste e Sul, os mesmos indicadores avaliados na seção anterior foram retomados, a fim de que sejam observadas suas variações diante do aumento do número de peças.

5.2.2.1 Variação da Iluminância Média Anual (ΔE_{ma})- Todas as orientações

Em modelos com refletância de 90%, a orientação Leste apresentou menores ganhos na iluminância média diante do aumento do número de peças em comparação à Norte. O grupo dos dispositivos especulares proporcionou maiores ganhos entre os grupos analisados, com aumento de quase 30%, comparando-se o sistema *a* e o *c*. O desempenho da orientação Oeste em ampliar a iluminância média também foi mais expressivo no caso de modelos especulares, com ganho de 31%.

Figura 47 - Gráfico de variação da iluminância média anual em relação ao aumento do número de peças. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças

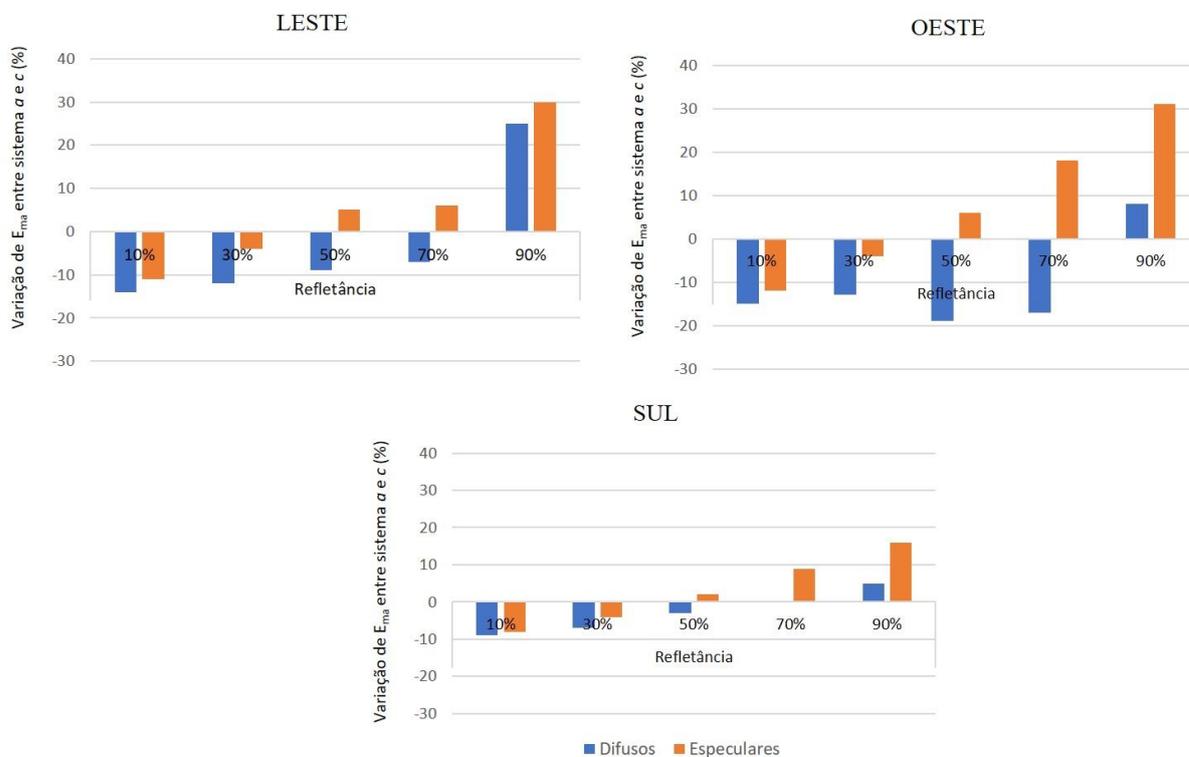


Fonte: Elaborado pela autora

A orientação Sul apresentou as menores variações entre as orientações, com ganhos entre 4,5% e 15,5%. Figura 47 mostra a variação da iluminância média nos modelos analisados, por meio de gráficos referentes às quatro orientações, diante do aumento do número de peças. Assim como foi observado em relação à eficiência da luz solar refletida, a orientação Sul proporcionou pequena variação entre os grupos com diferentes tipos de reflexão.

Analisando os modelos com refletâncias menores que 90% na orientação Leste, percebe-se que os dispositivos difusos de até 70% e especulares até 30% de refletância proporcionam redução da iluminância média com o aumento do número de peças. Os gráficos da Figura 48 mostram que a influência do aumento do número de peças também depende da refletância dos dispositivos na orientação Sul. Nota-se que a variação resultante para Sul é menor em relação às demais orientações, sendo esta a situação menos sensível ao aumento do número de peças. Neste caso, os desempenhos das orientações Leste e Oeste foram aproximados.

Figura 48 - Gráficos de variação de E_{ma} comparando-se modelos referentes ao sistema a e c . Orientações Leste, Oeste e Sul

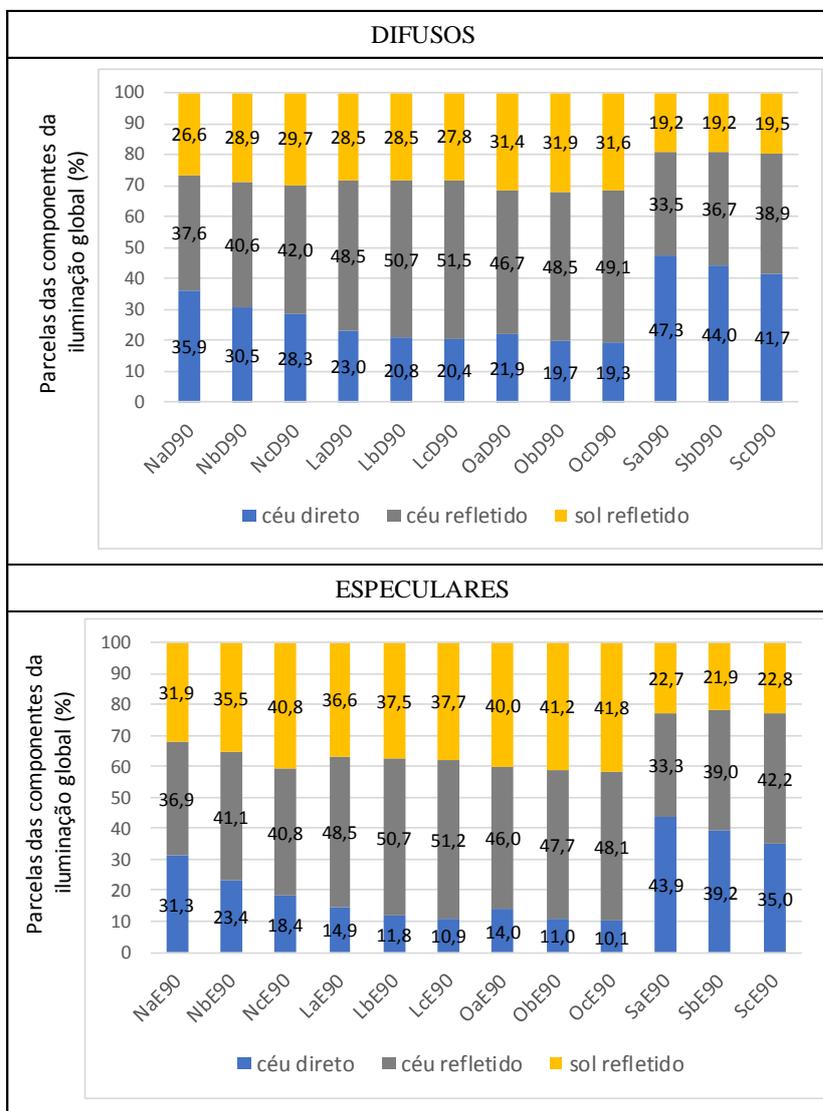


Fonte: Elaborado pela autora

Entre as quatro orientações estudadas é possível afirmar que a Norte representa o maior potencial de aproveitamento da luz solar refletida (ver Figura 38) e de incremento da iluminância média anual diante do aumento do número de peças, uma vez que proporcionou maiores ampliações no caso de modelos de dispositivos com refletâncias acima de 70%.

A Figura 49 apresenta a variação percentual das componentes da iluminação natural diante do aumento do número de peças, para os modelos difusos e totalmente especulares com refletância de 90% referentes às orientações estudadas. Analisando essa variação é possível notar que as diferentes orientações resultam em diferentes contribuições da componente de céu direto. A orientação Sul, com menor ângulo de proteção solar, apresentou os maiores percentuais de contribuição desta componente. As orientações Leste e Oeste, por sua vez, com maiores ângulos de proteção solar, apresentaram os menores percentuais.

Figura 49 - Gráficos de variação percentual das componentes da iluminação natural diante do aumento do número de peças. Refletância de 90%, modelos difusos e especulares



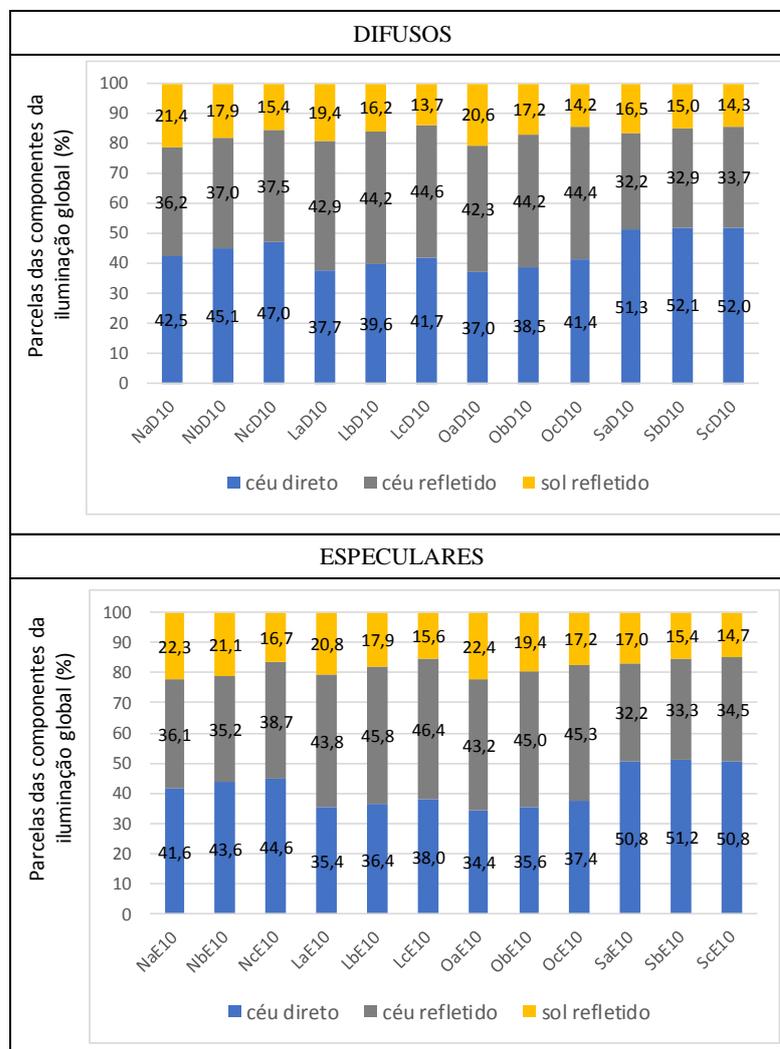
Fonte: Elaborado pela autora

A orientação Norte, que se destaca por proporcionar os maiores ganhos de iluminância, também apresenta os maiores incrementos da componente de luz solar refletida diante do aumento do número de peças. No caso de dispositivos especulares, onde as variações foram superiores, a componente de sol refletido chega a ser ampliada em mais de 8%. Tal variação resultou em ganho de 60,5% na iluminância média.

A orientação Leste apresentou os maiores percentuais de contribuição de céu refletido, porém com pequenas variações diante do aumento do número de peças. Esse aumento incrementou em quase 30% a iluminância média no caso dos modelos especulares. Tal característica também pode ser notada em relação à orientação Oeste. A orientação Sul, com

menores ganhos de iluminação, também apresentou os menores percentuais de sol refletido.

Figura 50 - Gráficos de variação percentual das componentes da iluminação natural diante do aumento do número de peças. Refletância de 10%, modelos difusos e especulares



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 50 mostra a variação das componentes da iluminação diante do aumento do número de peças dos dispositivos em modelos especulares com refletância de 10%, situação em que foi observada redução da iluminância média. Nesse caso, percebe-se que a baixa refletância resulta em redução da porcentagem referente à componente de sol refletido e ampliação da componente de céu refletido em todos os casos de aumento do número de peças analisados. Com refletância de 90% os modelos apresentam ampliação das duas componentes refletidas.

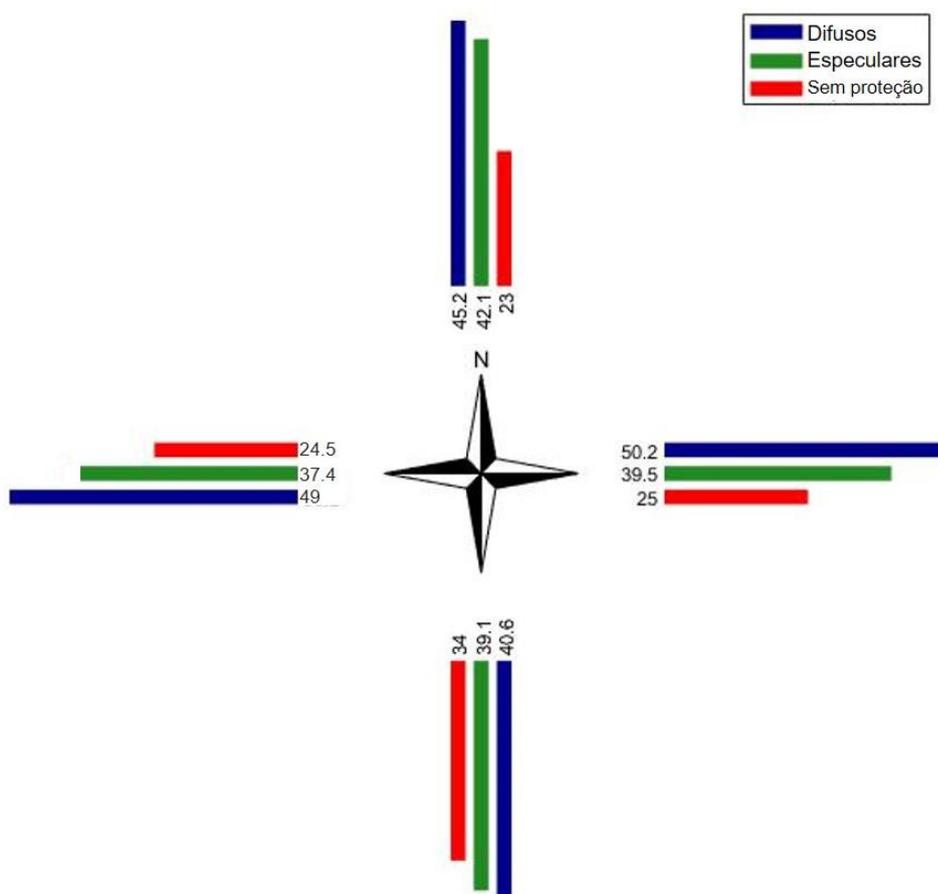
5.2.2.2 Variação da Uniformidade média anual (ΔU_{ma})- Todas as orientações

Foi visto que, no caso da orientação Norte, dispositivos com maiores refletâncias reduziram o índice de uniformidade do ambiente diante do aumento do número de peças. Porém, comparando-se o desempenho de ambientes com sistemas de dispositivos tipo *a* com refletância de 90% e ambientes desprovidos de proteção, percebe-se, através da Figura 51 que os valores do índice de uniformidade dos segundos ficam bem abaixo dos modelos difusos e especulares. Isso acontece porque os modelos sem proteção apresentam altos níveis de iluminação nas áreas mais próximas da abertura.

No caso da orientação Leste, em modelos com refletância de 90%, o efeito do aumento de peças no grupo dos dispositivos difusos não proporciona ganhos na uniformidade média do ambiente entre o primeiro e o segundo sistema. Este ganho é reduzido entre o segundo e o terceiro sistema. Entre os demais grupos de reflexão pode ser observada redução da uniformidade a partir do aumento no número de peças. Vale destacar que a orientação Leste, que possui os menores fatores de visão de céu, proporciona os maiores índices de uniformidade.

A orientação Sul, apesar de também proporcionar redução da uniformidade, corresponde à situação de sua menor variação diante do aumento do número de peças. Nesta orientação, que possui os maiores fatores de visão de céu, é possível observar os menores índices de uniformidade de iluminação natural no ambiente em comparação com as demais orientações.

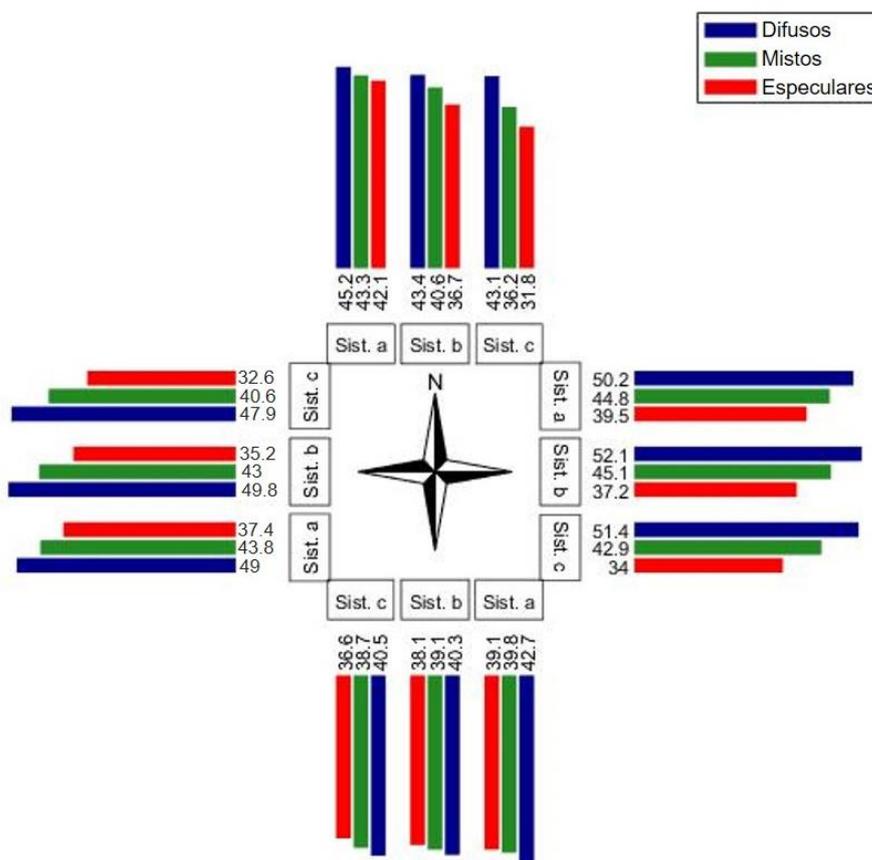
Figura 51 - Uniformidade média anual de modelos difusos e especulares, referentes ao sistema a, e sem proteção. Refletância 90%. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste e Oeste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

O comportamento da uniformidade média anual diante do aumento no número de peças dos dispositivos pode ser visto graficamente na Figura 52. É possível observar que a orientação Norte proporcionou as maiores reduções do índice: no caso dos modelos especulares essa redução chegou a 24%. A orientação Sul destacou-se, mais uma vez, como a situação de menor variação também quando são comparados os três grupos com diferentes características de reflexão. Na orientação Leste percebe-se que, no caso dos modelos sem especularidade e mistos, a perda no índice ocorre a partir do segundo sistema estudado, e que os três grupos analisados apresentam maiores diferenças de desempenho em relação à distribuição de iluminação no plano de trabalho.

Figura 52 - Gráfico de variação da uniformidade média anual em relação ao aumento do número de peças. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

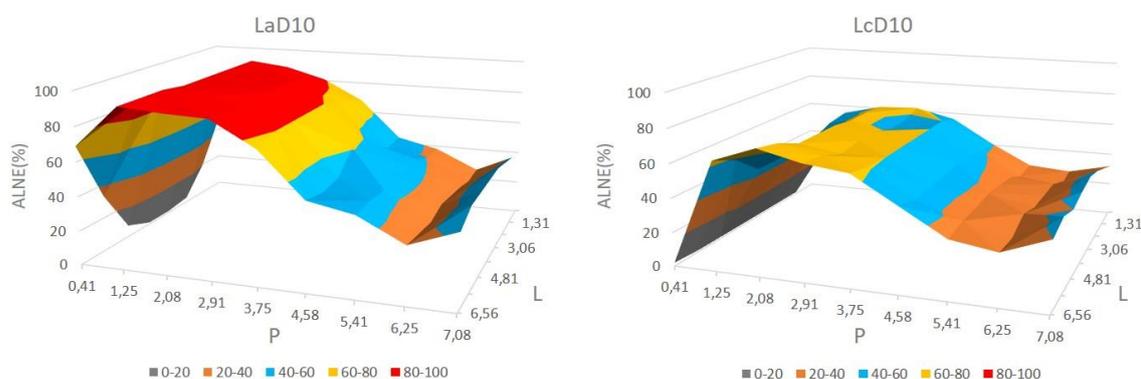
Foi visto na seção anterior que investigou o comportamento da iluminância média, que a variável “número de peças” foi responsável pelo incremento da iluminação natural do ambiente nos modelos com refletância de 90%, em todas as orientações analisadas. O fato de que o aumento no número de peças proporcionou redução da uniformidade média anual indica que os ganhos observados na iluminação não favoreceram a distribuição das iluminâncias no ambiente, sobretudo na orientação Norte, onde as reduções foram maiores. Nesta orientação, de acordo com a Figura 43 e com a Figura 44, a redução da uniformidade se dá sobretudo pela ampliação da iluminância média nas áreas mais próximas à abertura, o que influencia toda a distribuição de iluminância no plano de trabalho.

5.2.2.3 Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe_{500lx/50%}) - Todas as orientações

No caso da orientação Leste, observou-se que o aumento do número de peças influenciou

a ALNe, sobretudo nos modelos com menores refletâncias. Nesses modelos, com refletância de 10% o aumento do número de peças reduziu os valores de ALNe, e através da Figura 53 é possível perceber que essa redução se deu principalmente nos pontos mais centrais do ambiente. O ambiente com modelo LaD10 possui ALNe de 51%, enquanto o modelo LcD10 resultou em 38%. Nota-se ainda que nesta orientação, modelos com baixa refletância ocasionam redução dos níveis de iluminação nas áreas mais próximas à abertura. Na orientação Leste, os dispositivos com refletância de 10% proporcionaram $ALNe_{500-50\%}$ abaixo de 60%. No caso de refletâncias de 90%, o impacto do aumento no número de peças foi menor, sobretudo no caso de modelos especulares, que mantiveram autonomia de 100%.

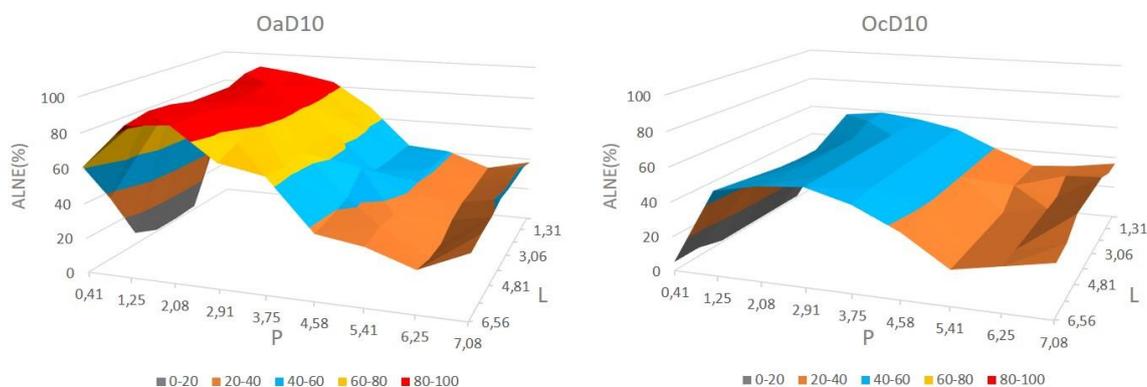
Figura 53 - Comparação entre a ALNe dos modelos LaD10 e LcD10, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

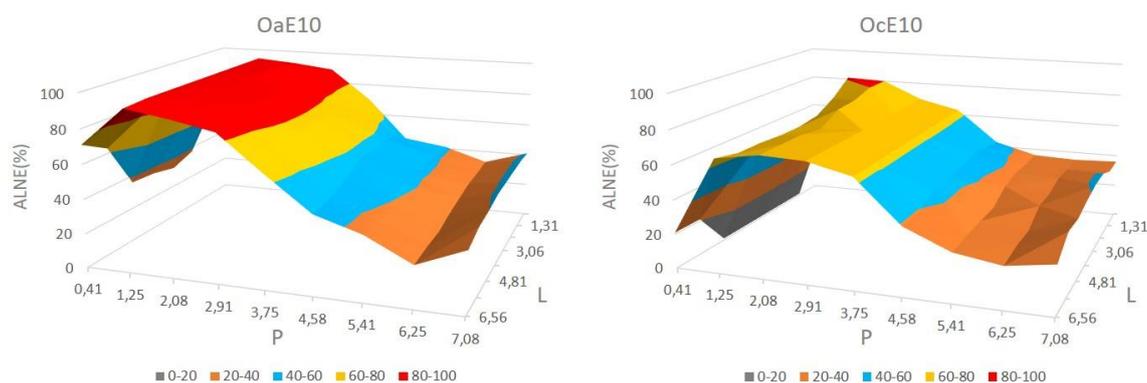
A orientação Oeste também apresentou redução da autonomia no caso da comparação entre ambientes com modelos de refletância de 10%, referentes à reflexão difusa, dos sistemas *a* e *c*. O modelo OaD10 proporcionou autonomia de 47%, enquanto que o modelo OcD10, com maior quantidade de peças, garantiu apenas 33% (ver Figura 54). Observa-se que a maior redução ocorreu na área central do ambiente, assim como na orientação Leste. Esta mesma característica de redução entre modelos com menor e maior quantidade de peças também está presente no caso de dispositivos especulares: o modelo OaE10 resultou em $ALNe_{500-50\%}$ de 54% enquanto que o modelo OcE10 proporcionou autonomia de 44% (Figura 55).

Figura 54 - Comparação entre a ALNe dos modelos OaD10 e OcD10, orientação Oeste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

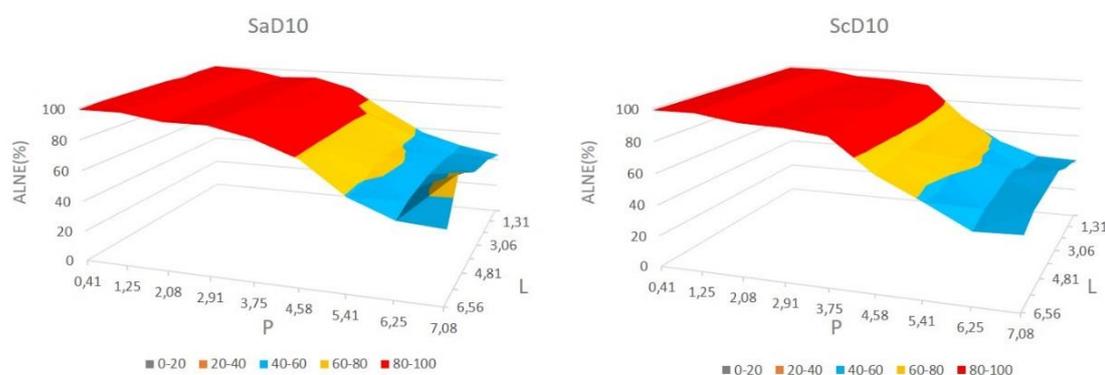
Figura 55 - Comparação entre a ALNe dos modelos OaE10 e OcE10, orientação Oeste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora.

Mesmo comportamento foi observado na orientação Sul: enquanto os modelos com menores refletâncias resultaram em redução da ALNe diante do aumento do número de peças, modelos com refletância de 90% apresentaram ganhos, porém em maior proporção. A Figura 56 apresenta a comparação entre a distribuição da ALNe_{500-50%} no modelo SaD10 e do modelo ScD10. Percebe-se que, mesmo em se tratando de modelos com baixa refletância, os ambientes referentes à orientação Sul proporcionam altos níveis de iluminação nas áreas próximas à abertura, e que a redução da ALNe resultante do aumento do número de peças acontece sobretudo nas áreas mais distantes da abertura, assim como foi observado com a orientação Norte, e diferentemente do observado nos ambientes voltados para Leste e Oeste.

Figura 56 - Comparação entre a ALNE dos modelos SaD10 e ScD10, orientação Sul. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

Em relação ao aproveitamento da luz solar na forma refletida, observou-se que as três últimas orientações não apresentaram maiores variações da eficiência diante do aumento do número de peças. No caso de dispositivos com menores refletâncias, foram observadas ainda reduções na eficiência. Para a orientação Sul, até mesmo o desempenho dos três grupos de reflexão (difusos, mistos e especulares) foi semelhante.

A orientação Norte destacou-se ainda na ampliação da iluminância média anual diante do aumento do número de peças, e a Sul apresentou as menores variações. Durante a análise das componentes da iluminação de cada situação, foi possível notar que a orientação Norte apresentou os maiores ganhos percentuais na componente de luz solar refletida a partir do aumento do número de peças, no caso de maiores refletâncias dos dispositivos.

O aumento do número de peças nos modelos com menores refletâncias também resultou em redução da ALNe em todas as orientações: nas orientações Leste e Oeste, as porcentagens foram reduzidas nas áreas mais centrais do ambiente, enquanto que nas orientações Norte e Sul, essa redução se deu nas áreas mais distantes das aberturas. Os modelos com maiores refletâncias proporcionaram porcentagens altas de ALNe e pouca variação diante de uma maior quantidade de peças.

Durante o desenvolvimento das análises foi possível observar que o aumento do número de peças foi influenciado por duas outras características físicas de dispositivos de sombreamento: as propriedades de reflexão – difusa, mista e especular – e, principalmente, a refletância das superfícies dos dispositivos. Diante da importância identificada desses dois parâmetros, torna-se relevante analisar cada um deles separadamente e em conjunto com os

demais, a fim de estender as possibilidades de aplicação de dispositivos de sombreamento para cada uma das orientações definidas nesta pesquisa.

5.3 Especularidade e refletância

Nesta etapa foi analisada a influência das características de reflexão e da refletância das superfícies dos dispositivos para os aspectos até aqui pontuados.

5.3.1 Eficiência da luz solar refletida (η_{sr})- Especularidade e refletância

5.3.1.1 Efeitos da variação da especularidade dos dispositivos para η_{sr}

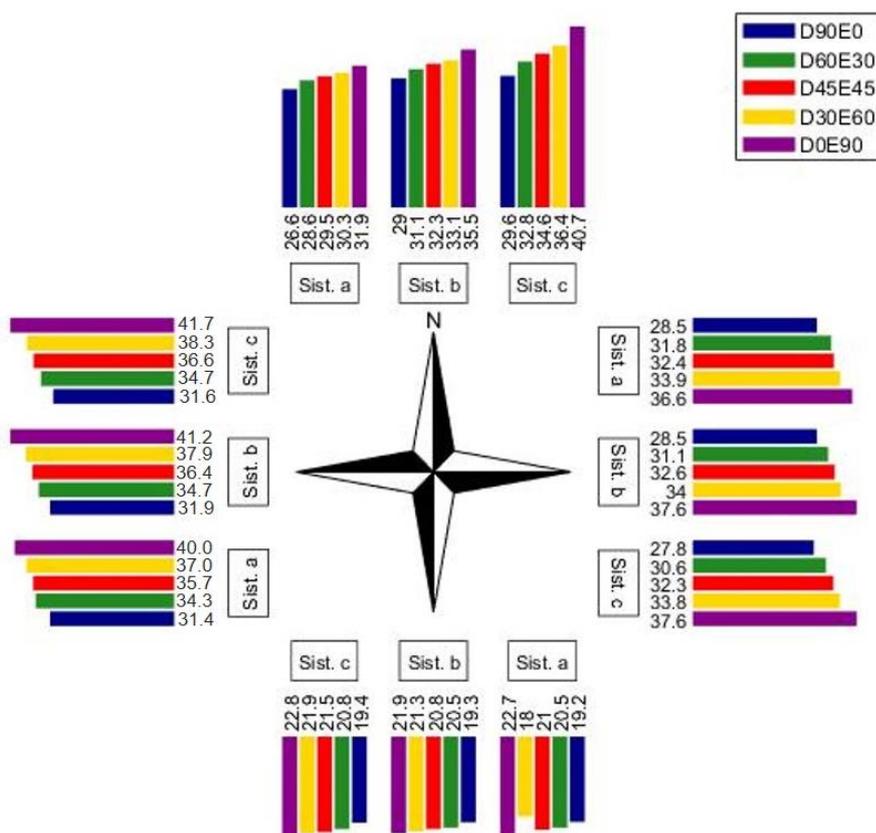
Esta seção apresenta os efeitos da variação da especularidade na reflexão dos dispositivos para o índice de eficiência da luz solar refletida. Para este fim, foram analisados modelos de dispositivos com mesma refletância, mas com diferente especularidade, dando origem a modelos difusos, mistos e totalmente especulares. Para cada sistema e orientação, esse conjunto de modelos foi avaliado.

Percebe-se a partir da Figura 57, que, embora todos os modelos possuíssem a mesma refletância (90%), houve aumento dos índices de eficiência em todos os sistemas e orientações estudadas conforme a especularidade aumentava. Porém, em cada orientação e sistema de dispositivos foram observadas diferentes porcentagens de aumento da eficiência diante do incremento da especularidade.

Na orientação Norte observou-se que os aumentos decorrentes da variação da reflexão totalmente difusa para totalmente especular foram mais expressivos no sistema com maior número de peças, onde tal variação resultou em incremento de 38%. O sistema com menor número de peças proporciona aumento de 20%.

Na orientação Leste, os ganhos obtidos a partir da variação de reflexão difusa para especular seguem o mesmo comportamento que na orientação Norte, sendo de até 35% no terceiro sistema. No caso da orientação Oeste, os ganhos máximos chegam a 32%. Porém, diferentemente dos resultados da orientação Norte, os ganhos observados para Leste e Oeste apresentaram valores aproximados entre os três sistemas estudados, salientando, também no estudo deste parâmetro, uma menor influência da variação do número de peças. Comparando-se o gráfico da orientação Norte com o gráfico da orientação Leste, percebe-se que no caso do último, houve menor variação entre os três sistemas, confirmando esse comportamento.

Figura 57 - Gráfico de variação da eficiência da luz solar refletida em relação à specularidade dos dispositivos. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

No caso da orientação Sul percebe-se que os ganhos decorrentes da variação das características de reflexão são menores em comparação com a orientação Norte, chegando ao máximo de 18% no caso do sistema c. É possível perceber a tendência de comportamento dos três sistemas: possuem desempenho aproximado. Pode-se concluir que a orientação Sul é a menos sensível às mudanças das características de reflexão dos dispositivos, bem como foi observado em relação ao aumento no número de peças.

Vale salientar que embora o aumento no número de peças não tenha resultado em maiores ganhos na maior parte das situações estudadas, quando se compara os ganhos obtidos a partir do incremento da specularidade nos modelos com mais peças é possível garantir maior eficiência, demonstrando que uma parametrização conjunta pode ser mais interessante para o aproveitamento da luz solar refletida.

5.3.1.2 Efeitos da variação da refletância dos dispositivos para η_{sr}

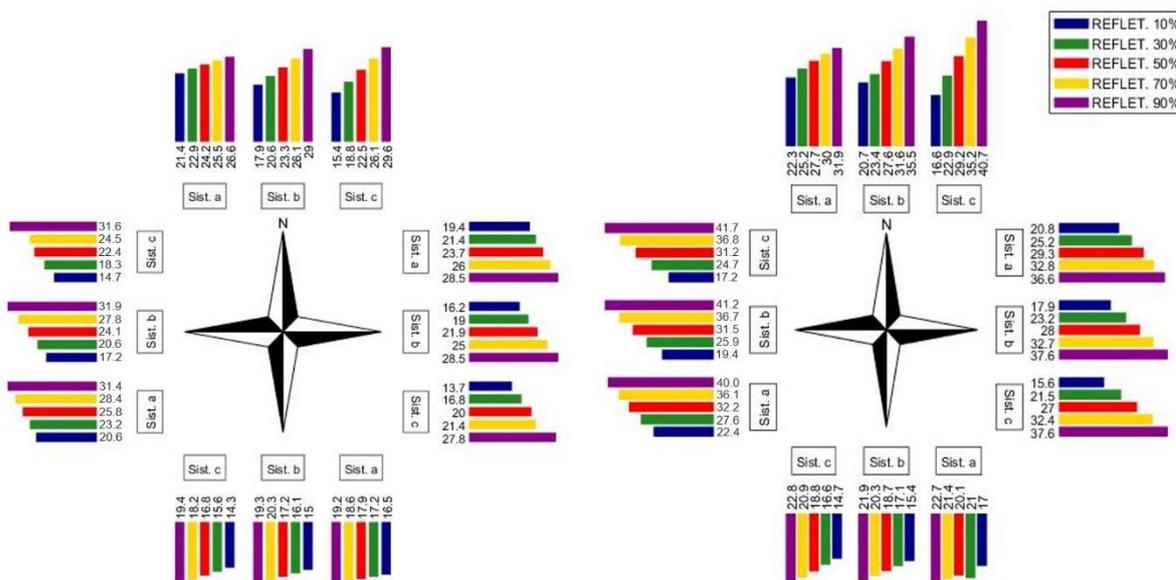
Nos modelos de cada um dos três sistemas da orientação Norte é possível observar que o incremento da refletância dos dispositivos proporciona ganhos no aproveitamento da luz solar. Esses ganhos são maiores entre os modelos de dispositivos com reflexão especular. Entre os parâmetros analisados, o aumento da refletância dos dispositivos resultou em maiores ganhos para a eficiência da luz solar refletida, conforme mostra a Figura 58.

No primeiro sistema a variação de refletância entre os modelos com difusividade proporcionou ganhos de 24% na eficiência. Os modelos especulares, com maiores ganhos, chegaram a incrementar até 43% o índice. Apesar de o aumento no número de peças entre os três sistemas não resultar em aumento da área exposta dos dispositivos, percebe-se que a variação da refletância é capaz de proporcionar maior aproveitamento da luz solar refletida. O terceiro sistema, com o maior número de peças, também manteve o aumento no índice, apresentando maiores valores percentuais em relação aos sistemas com menor número de peças.

No caso dos modelos difusos, a orientação Oeste mostrou-se mais sensível à variação da refletância da superfície dos dispositivos de sombreamento. O primeiro sistema, com menor número de peças, proporcionou aumento de 52% na eficiência da luz solar refletida a partir da variação de refletância de 10% para 90%. No terceiro sistema esta tendência de aumento na eficiência da luz solar refletida permanece e os ganhos em percentual ficam em 115%. No caso dos modelos especulares, o desempenho da orientação Leste e Oeste foi aproximado em relação ao aumento da refletância.

A orientação Sul apresentou os menores ganhos na eficiência da luz solar refletida a partir do incremento da refletância dos dispositivos. O sistema com maior número de peças proporcionou um aumento de 55% na eficiência da luz solar refletida entre os modelos especulares de menor e maior refletância, e de 36% entre os modelos difusos. Os demais sistemas também garantiram ganhos no índice, porém em menores proporções. Observou-se que o incremento da refletância dos dispositivos, juntamente com os outros dois parâmetros, número de peças e especularidade, foram responsáveis por maiores ganhos na eficiência da luz solar refletida. É possível observar que em todas as orientações analisadas, os modelos especulares apresentaram maior aumento da eficiência.

Figura 58 - Gráficos de variação da eficiência da luz solar refletida em relação à refletância dos dispositivos. Modelos sem especularidade (à esquerda) e especulares (à direita). Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletâncias de 10% a 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

5.3.2 Indicadores de desempenho- Especularidade e refletância

Em relação à eficiência da luz solar refletida, foi visto que determinadas estratégias são mais indicadas para algumas orientações, enquanto que para outras não garantem maior aproveitamento da luz solar. Porém, é importante que os efeitos da presença desta fonte de luz para o desempenho da iluminação natural sejam conhecidos.

5.3.2.1 Variação da iluminância média anual (ΔE_{ma})- Especularidade e refletância

5.3.2.2 Efeitos da variação da especularidade dos dispositivos para ΔE_{ma}

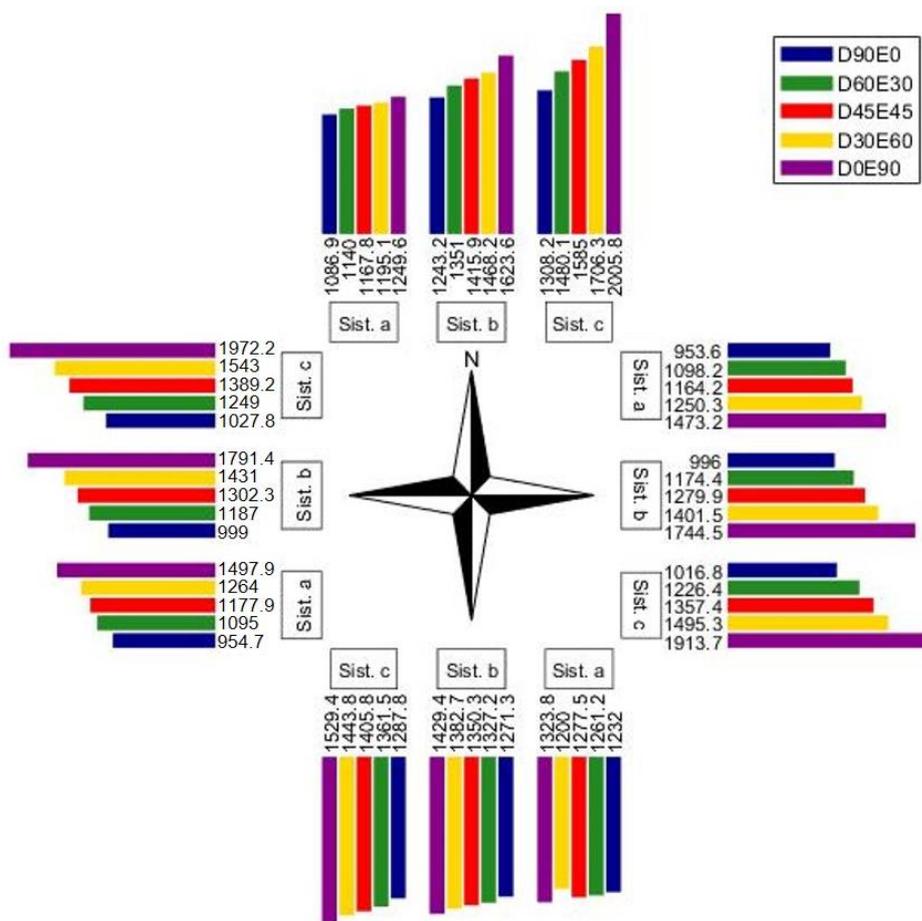
Os dados presentes na Figura 59 mostram que todas as orientações analisadas apresentaram ganhos na iluminância média a partir do incremento da especularidade, apesar de a refletância ter sido mantida. O sistema com maior número de peças também ampliou os ganhos em relação aos demais, indicando que a interação entre número de peças e especularidade favorece o aumento da iluminância média anual.

A orientação Oeste mostrou-se mais sensível à especularidade, sendo capaz de ampliar em até 92% os valores de iluminância média, seguida da orientação Leste, que manteve os

ganhos em 88%. Já a orientação Norte apresentou aumento de 53% na iluminância média no caso do sistema *c*. A orientação Sul, com menor variação entre as demais, garantiu ganhos de 19% no sistema com maior número de peças.

Percebe-se que cada orientação apresentou padrões diferentes dessa variação. No Norte, o desempenho dos três sistemas foi menos uniforme, sobretudo no caso do sistema *c*. Leste e Oeste, como já foi observado, apresentaram maiores variações da iluminância média a partir do aumento da specularidade, e o Sul proporcionou menor variação, com maior uniformidade no desempenho dos três sistemas estudados.

Figura 59 - Gráfico de variação da iluminância média anual em relação à specularidade dos dispositivos. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

5.3.2.3 Efeitos da variação da refletância dos dispositivos para ΔE_{ma}

Em todas as orientações estudadas, são observados ganhos na iluminância média anual

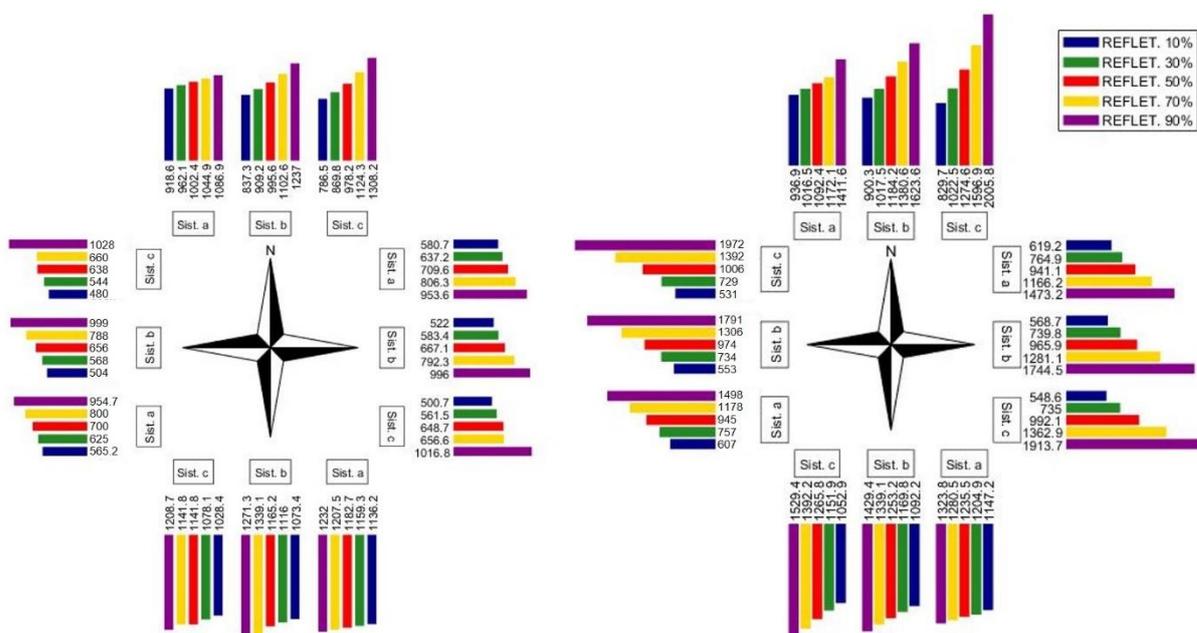
diante do aumento da refletância dos dispositivos, que são ampliados à medida que o número de peças do sistema aumenta, conforme mostra a Figura 60. Na orientação Norte, as maiores variações também são observadas no caso de dispositivos especulares, chegando a 142%. Os modelos difusos referentes ao terceiro sistema proporcionam ganhos de até 66%.

A orientação Oeste, da mesma maneira que foi observado no capítulo anterior, destaca-se como a mais sensível em relação ao incremento da refletância dos dispositivos, sobretudo entre os modelos especulares, proporcionando incremento de 271% na iluminância média, no caso do terceiro sistema, a partir do aumento da refletância dos dispositivos. A orientação Leste, ampliou a iluminância em 249% sob as mesmas condições.

A orientação Sul, embora tenha sido a que proporcionou menores variações na iluminância média, apresentou ganhos entre 25% e 45% entre o modelo com refletância de 10% e o modelo com refletância de 90%, também com destaque para o terceiro sistema.

Através da análise dos gráficos é possível perceber que o grupo dos dispositivos sem especularidade apresentou menor variação da iluminância média. Essas características são mais acentuadas na orientação Sul. Os modelos especulares mostraram-se mais sensíveis ao aumento da refletância, principalmente no caso da orientação Oeste, garantindo ganhos superiores para a iluminância média. Observa-se que esses ganhos passam a ser maiores quando são comparadas as refletâncias de 70% e de 90%, e que no caso de refletâncias menores, o desempenho dos três sistemas apresenta menor variação.

Figura 60 - Gráficos de variação iluminância média anual em relação à refletância dos dispositivos. Modelos sem specularidade (à esquerda) e especulares (à direita). Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletâncias de 10% a 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças.



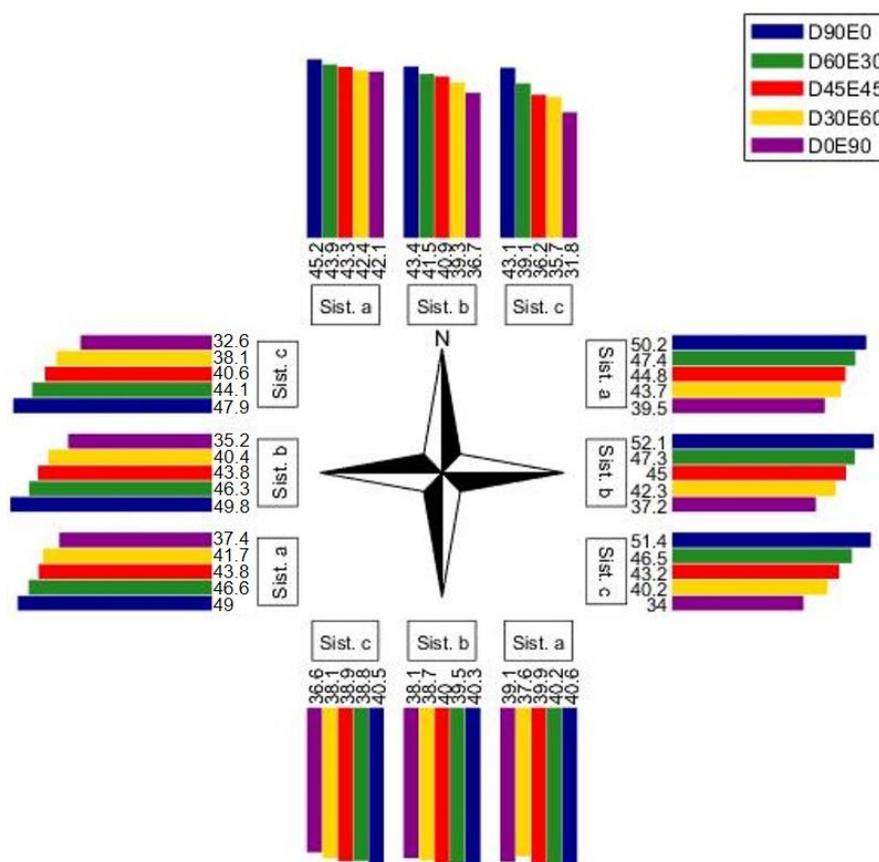
Fonte: Elaborado pela autora

5.3.2.4 Variação da uniformidade média anual (ΔU_{ma})- Especularidade e refletância

5.3.2.5 Efeitos da variação da especularidade dos dispositivos para ΔU_{ma}

Pode-se afirmar que o aumento da especularidade dos dispositivos, e conseqüentemente, o incremento da iluminância média no ambiente, também afetou a uniformidade da iluminação no plano de trabalho. Apesar de a refletância dos dispositivos ter sido mantida em 90%, o aumento da especularidade foi responsável pela redução do índice de uniformidade no ambiente em todas as orientações (ver Figura 61).

Figura 61 - Gráfico de variação da uniformidade média anual em relação à especularidade dos dispositivos. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletância 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se que à medida que o número de peças aumenta, o efeito negativo da especularidade para o índice de uniformidade fica mais acentuado. As orientações Leste e Oeste mostraram-se mais sensíveis à variação desse parâmetro, apresentando redução de até 34% e de 32%, respectivamente, no índice. A orientação Sul, que apresentou os menores índices de uniformidade, também proporcionou as menores variações, e a Norte proporcionou redução de 26% no sistema c.

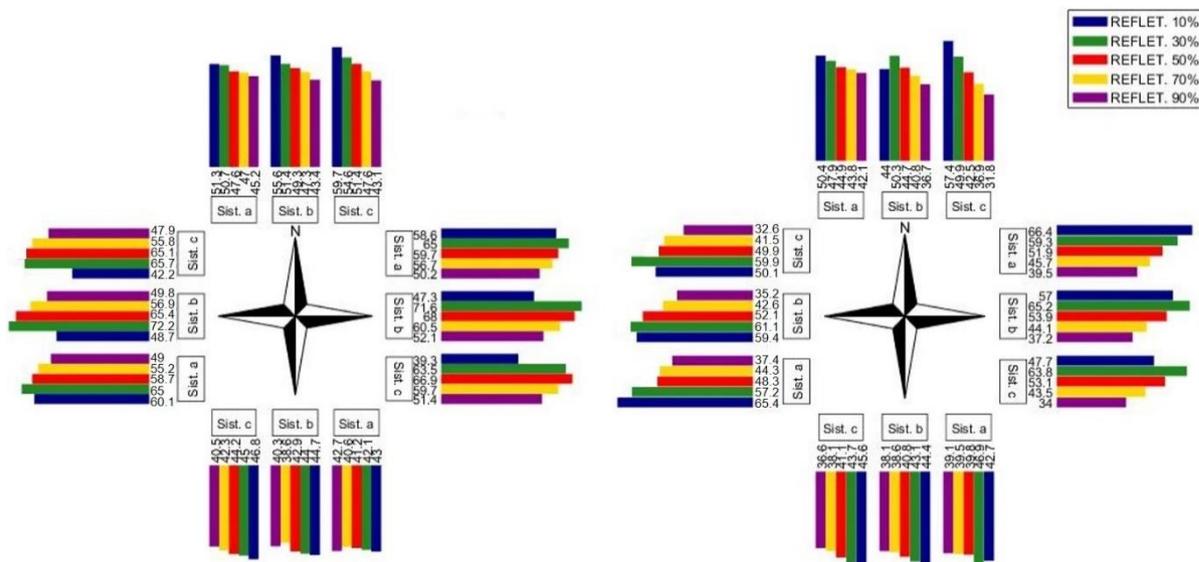
Além das características observadas acima, percebe-se que o desempenho dos três sistemas na situação de especularidade zero é praticamente a mesma, variando de forma progressiva sobretudo após a situação em que a especularidade corresponde a 30%. Com exceção da orientação Sul, que mantém maior semelhança de desempenho entre os sistemas, o aumento da especularidade resulta em maior diferenciação na distribuição de iluminâncias no ambiente.

5.3.2.6 Efeitos da variação da refletância dos dispositivos para ΔU_{ma}

Do mesmo modo que o parâmetro anterior, o aumento da refletância não favoreceu a distribuição das iluminâncias no ambiente, atuando na redução do índice de maneira mais acentuada do que foi observado no caso da análise da especularidade (ver Figura 62). Na orientação Norte percebe-se que a redução da uniformidade é menor no caso dos dispositivos com reflexão difusa. Com o aumento no número de peças dos sistemas, essa redução é acentuada. Apesar da redução proporcionada pelo aumento da refletância, observa-se que os maiores índices de uniformidade são vistos nos sistemas com maior número de peças e com menores refletâncias difusas. Dispositivos com refletância até 50% proporcionam ganhos na uniformidade diante do aumento do número de peças. A partir de refletâncias maiores, são observadas reduções no índice, conforme visto em seção anterior que investiga a variável “número de peças”.

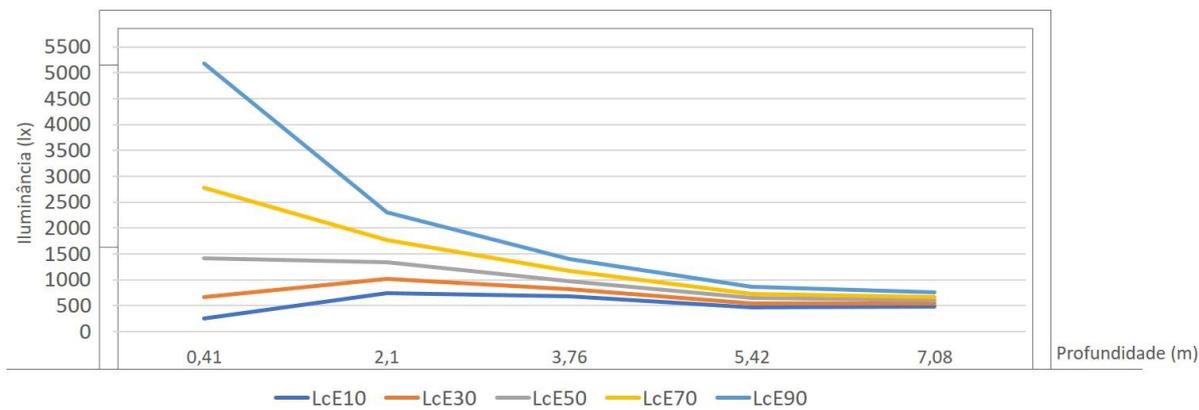
Nas orientações Leste e Oeste, diferentemente do que foi observado na orientação Norte, percebe-se que sob determinadas condições é possível obter ganhos na uniformidade da iluminação do ambiente: o aumento da refletância dos dispositivos referentes ao sistema *b* e ao sistema *c*, de 10% para 30% proporcionou incremento da uniformidade, como mostra a Figura 62. O aumento da refletância para 50%, por sua vez, resultou em redução da uniformidade. No caso da orientação Leste, analisando um corte longitudinal com a iluminância média anual de cinco pontos localizados na área central do ambiente (Figura 63), referentes a modelos com refletâncias especulares de 10% a 90% do sistema *c*, observa-se que, na menor refletância, o ponto mais próximo à abertura apresenta iluminância reduzida em relação aos demais pontos. Tal redução de iluminância interfere na distribuição da iluminação no ambiente, e, conseqüentemente, na uniformidade média anual. No modelo com refletância de 30%, esta redução é menor. No caso de refletâncias mais altas, observa-se aumento excessivo da iluminância na área mais próxima à abertura, o que também resulta em menores índices de uniformidade.

Figura 62 - Gráficos de variação da uniformidade média anual em relação à refletância dos dispositivos. Modelos sem especularidade (à esquerda) e especulares (à direita). Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul. Refletâncias de 10% a 90%. Norte e Sul= Sistema a- 01 peça, Sistema b- 02 peças, Sistema c- 04 peças. Leste= Sistema a- 02 peças, Sistema b- 04 peças, Sistema c- 08 peças



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 63 - Variação da iluminância média anual (eixo vertical em lx) a partir da distância da abertura. Orientação Leste, modelos especulares. Refletância de 10% a 90%



Fonte: Elaborado pela autora

No caso da orientação Sul, assim como foi observado nos demais indicadores analisados, ocorreu a menor variação diante do aumento da refletância dos dispositivos. Também se nota uma pequena variação entre os índices de uniformidade dos três sistemas, demonstrando que, nessa orientação, tanto o aumento de refletância quanto o aumento do número de peças do sistema proporcionam menores variações.

A variação observada, no caso do parâmetro refletância dos dispositivos, destaca-se por

apresentar padrões de comportamento bem diferenciados, levando em consideração os diferentes sistemas e orientações analisadas: apesar do aumento observado na maioria dos casos estudados, percebe-se que, em algumas situações, a variação da refletância não seguiu um padrão decrescente de redução de uniformidade.

5.3.2.7 Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNe)- Especularidade e refletância

Para análise da ALNe diante da variação de especularidade e refletância foram utilizados os modelos definidos para a análise estatística, assim como na análise do número de peças.

5.3.2.8 Efeitos da variação da especularidade dos dispositivos para ALNe

Na maioria dos modelos analisados, o aumento da especularidade atuou no incremento da ALNe, principalmente no caso de modelos com refletância de 10% e 50%. Tal comportamento é mais acentuado na orientação Oeste, conforme mostra a Tabela 9. Nesta orientação os valores da autonomia ficaram abaixo de 60% para as refletâncias de 10%. No caso do sistema *c*, o modelo totalmente difuso OcD10 apresentou ALNe de 33%, enquanto o modelo totalmente especular OcE10 garantiu a porcentagem de 44%, resultando em ganho de mais de 30%.

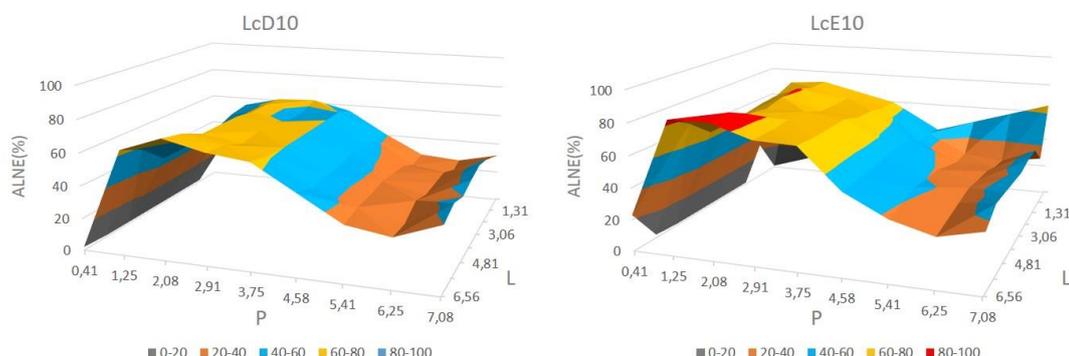
Tabela 9 - Autonomia de luz natural espacial em modelos difusos e especulares. Orientação Oeste.

	ALNe (%)					
	Sistema a		Sistema b		Sistema c	
	Difusos	Especulares	Difusos	Especulares	Difusos	Especulares
Refletância (%)						
10	47	54	36	50	33	44
50	71	83	65	91	61	97
90	94	100	95	100	97	100

Fonte: Elaborado pela autora

Na orientação Leste também é possível observar incremento da autonomia diante do aumento da especularidade. A Figura 64 compara a distribuição da ALNe no plano de trabalho dos dois ambientes com dispositivos difusos e especulares. Percebe-se que a especularidade dos dispositivos atua principalmente na manutenção da ALNe na parte central e posterior do ambiente.

Figura 64 - Comparação entre a ALNe dos modelos LcD10 e LcE10, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



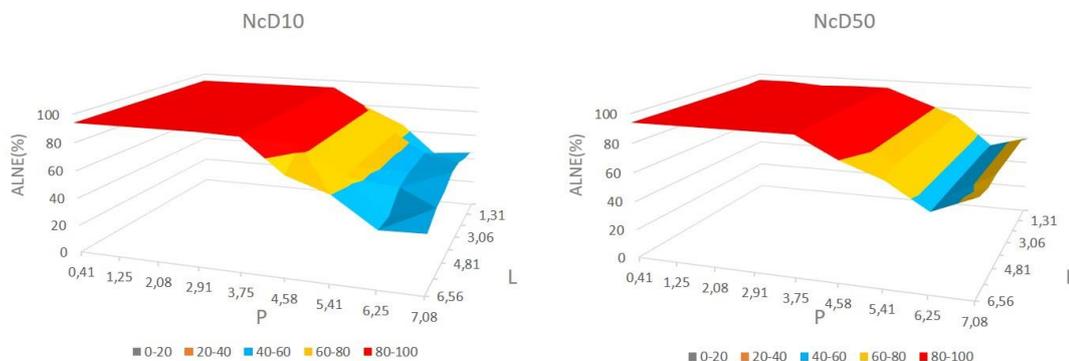
Fonte: Elaborado pela autora

Nas demais orientações, bem como entre os modelos com maiores refletâncias, a variação da ALNe foi menor, e as porcentagens finais alcançaram valores satisfatórios de manutenção da iluminância de 500lx no plano de trabalho dos ambientes. A orientação Sul apresentou as menores variações da autonomia diante deste parâmetro.

5.3.2.9 Efeitos da variação da refletância dos dispositivos para ALNe

Em todas as orientações e sistemas estudados, o incremento da iluminância média devido ao aumento da refletância dos dispositivos, resultou na ampliação da ALNe. Mesmo na orientação Norte, onde foram observadas as menores variações de ALNe, percebe-se, como no exemplo da Figura 65, que a variação na refletância dos dispositivos de 10% para 50%, referentes ao sistema c também resulta em maiores percentuais na parte posterior do ambiente.

Figura 65 - Comparação entre a ALNe dos modelos NcD10 e NcD50, orientação Norte. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros

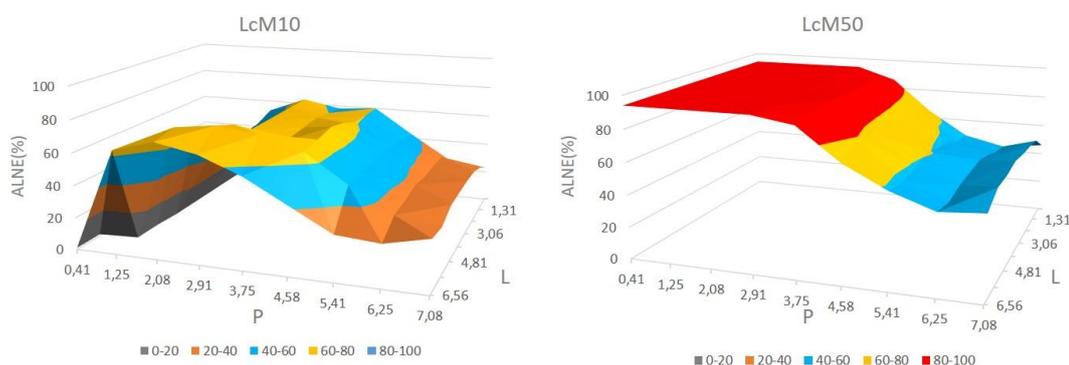


Fonte: Elaborado pela autora

Também sob esse aspecto de análise, a orientação Leste apresentou variações positivas

da ALNe diante do aumento da refletância dos dispositivos. Comparando-se modelos mistos referentes ao sistema *c*, a porcentagem passa de 41% a 90%, a partir do aumento da refletância de 10% para 50%, conforme mostra a Figura 66. No caso da orientação Leste, percebe-se que essa variação se deu em todo o ambiente, sobretudo nas áreas centrais e mais próximas da abertura.

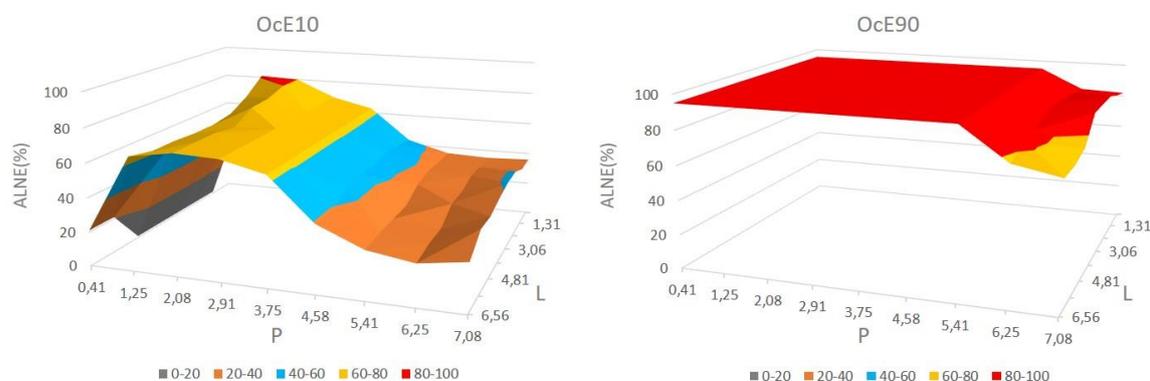
Figura 66 - Comparação entre a ALNe dos modelos LcM10 e LcM50, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

A orientação Oeste apresentou os maiores ganhos na autonomia diante do aumento da refletância dos dispositivos. A Figura 67 mostra a comparação de dois ambientes referentes a dispositivos espaciais com refletância de 10% e de 90%: percebe-se que, neste caso, a ampliação da autonomia se dá em toda a extensão do plano de trabalho.

Figura 67 - Comparação entre a ALNe dos modelos OcE10 e OcE90, orientação Leste. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



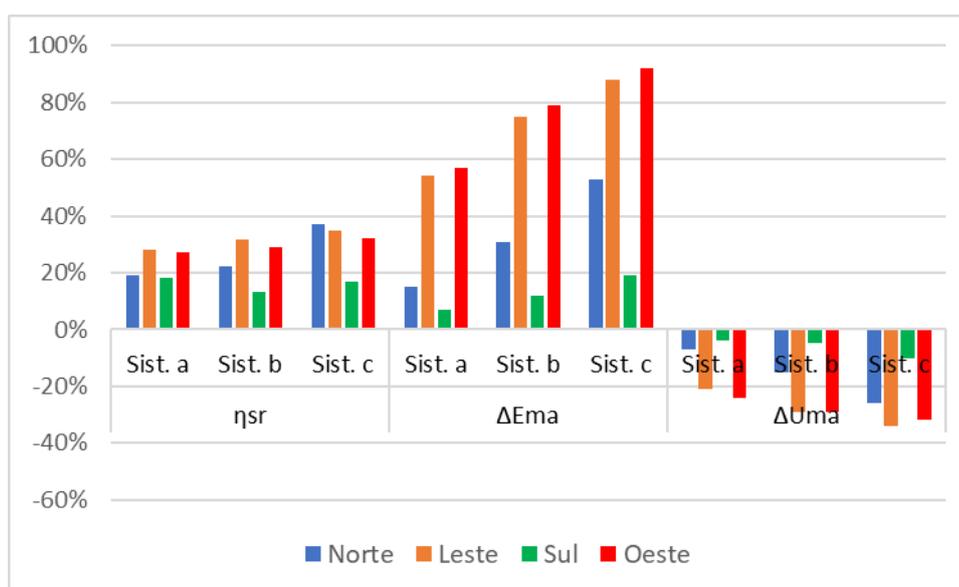
Fonte: Elaborado pela autora

Assim como foi observado para o parâmetro número de peças, o conhecimento das

características de reflexão e a refletância dos dispositivos correspondem a uma importante ferramenta para o projeto de dispositivos de sombreamento, uma vez que são capazes de influenciar a iluminação natural nos ambientes internos.

O gráfico da Figura 68 mostra as variações identificadas por orientação, na η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} , diante do aumento da especularidade, levando em consideração a comparação entre modelos difusos e totalmente especulares referentes aos três sistemas estudados. Conforme destacado, as orientações Leste e Oeste apresentaram as maiores variações. É possível perceber que a iluminância média anual apresentou maiores variações, configurando possibilidades reais de incremento apenas diante da mudança de características referentes à especularidade das superfícies dos dispositivos, sem que haja mudança de refletância.

Figura 68 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} a partir do aumento da especularidade



Fonte: Elaborado pela autora

Os ganhos na iluminância média, e também no aproveitamento da luz solar refletida, proporcionados pelo aumento da especularidade são devidos a essa característica de reflexão, que permite que a superfície refletora funcione como um espelho, sem que haja dispersão da luz, como acontece com as superfícies difusas. A Figura 69 apresenta, de modo simplificado, a propriedade de reflexão de superfícies especulares (a) e difusas (b) de dispositivos com brises.

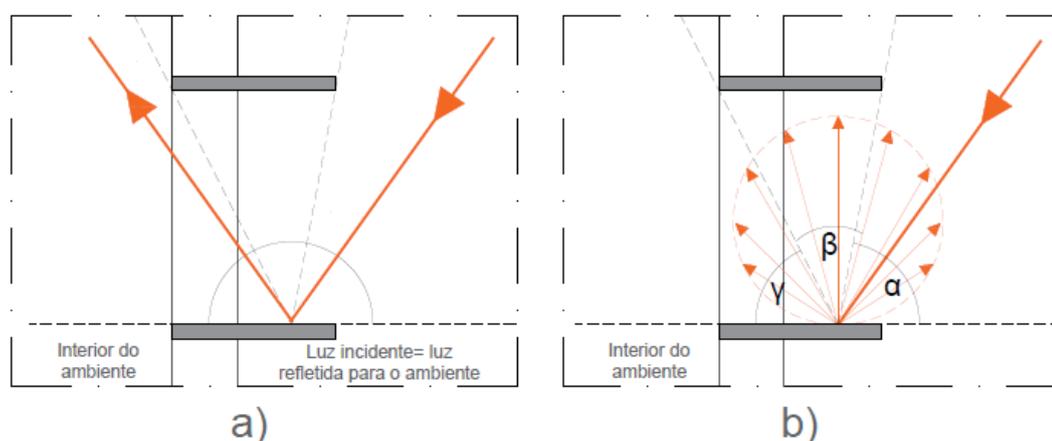
No item *a* da figura pode-se observar que a luz incidente sobre um brise com superfície especular chega ao interior do ambiente e pode ser aproveitada na forma refletida. Já no item *b*, que corresponde a um sistema de brises com superfície difusa, todo o fluxo de luz incidente

é refletido para todas as direções. Neste caso, percebe-se que a luz refletida em cada trecho de ângulo α , β e γ assume comportamento diferente após a reflexão.

A luz refletida no trecho de ângulo α , corresponde à parcela que retornará ao ambiente externo, sem aproveitamento para a iluminação interior. No trecho de ângulo β ocorrerá a interreflexão da luz entre as peças de brises, gerando novos processos de reflexão, cujas parcelas poderão retornar para o exterior ou ainda serem direcionadas ao interior do ambiente. O trecho de ângulo γ corresponde à situação em que há a reflexão da luz diretamente para o interior do ambiente.

Comparando-se, portanto, dois sistemas de brises com características de reflexão especular e difusa, nota-se que no caso dos primeiros, o aproveitamento da luz refletida é superior e os resultados apresentados nesta seção comprovam tal comportamento através do incremento da eficiência da luz solar refletida e da iluminância média anual. Porém, o aumento da especularidade atuou na redução da uniformidade média anual.

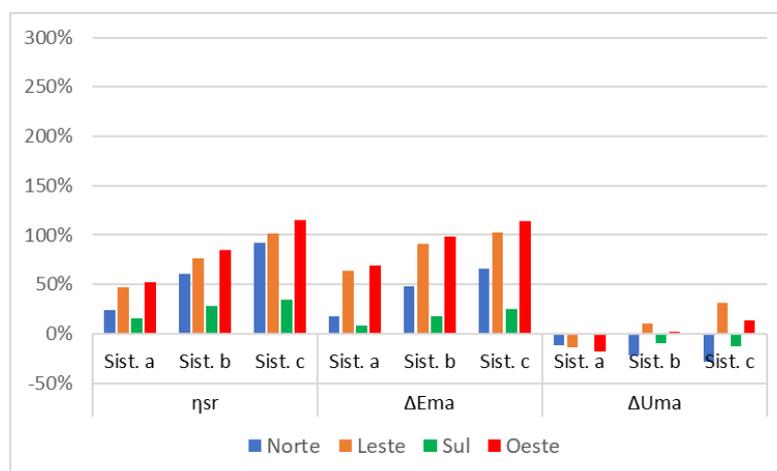
Figura 69 - Propriedades de reflexão de superfície especular (a) e difusa (b) de dispositivos tipo brises



Fonte: Elaborado pela autora

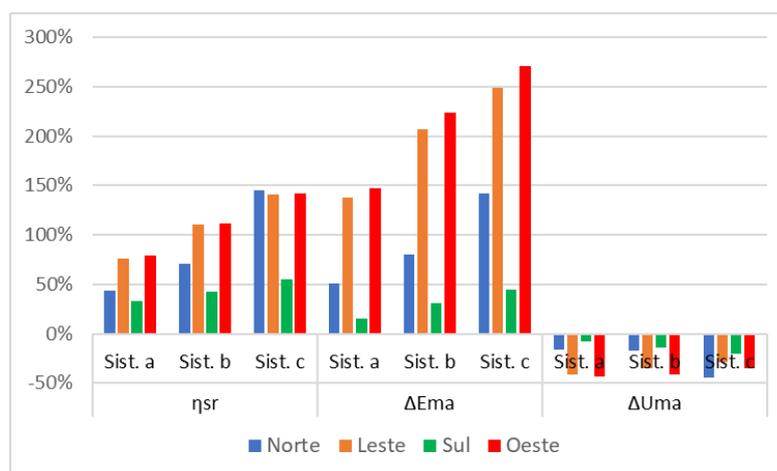
Da mesma forma, o aumento da refletância das superfícies dos dispositivos também favoreceu o maior aproveitamento da luz solar refletida e da iluminância média anual em todas as orientações analisadas. Os gráficos da Figura 70 e 71 mostram, respectivamente as variações decorrentes do aumento da refletância em modelos difusos e especulares, com destaque para os últimos, com maiores variações dos parâmetros analisados.

Figura 70 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} a partir do aumento da refletância. Modelos difusos



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 71 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} e U_{ma} a partir do aumento da refletância. Modelos especulares



Fonte: Elaborado pela autora

Também sob este parâmetro, a orientação Oeste apresenta as maiores possibilidades de aproveitamento da luz solar refletida e de incremento da iluminância média anual. O aumento da refletância também atuou na redução da uniformidade média anual, assim como o aumento da especularidade.

A partir dos dados apresentados percebe-se que todos os parâmetros investigados apresentam influência sobre a iluminação natural no ambiente, tanto em relação à manutenção de disponibilidade quanto de uniformidade. É possível notar que as características físicas atuam de maneira diferente sobre esses aspectos de acordo com a variação da orientação, e ainda, de acordo com a sua interação entre si. Em relação ao aproveitamento da luz solar também é

possível perceber variações importantes. Diante das variações de desempenho relacionadas a cada orientação estudada, deve-se destacar o número de horas/ano de insolação referente à cada fachada, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10: Insolação das Fachadas Norte, Leste, Oeste e Sul

Insolação (horas/ ano)	
Norte	2.554
Leste	2.188
Oeste	2.188
Sul	1.823

Fonte: TropFac 3 (CABÚS, 2015)

A próxima seção apresenta a análise desenvolvida com o objetivo de identificar estatisticamente a influência de cada parâmetro para a eficiência da luz solar refletida, a fim de embasar as recomendações de projeto de dispositivos de sombreamento buscando maior aproveitamento desta fonte de luz. A segunda parte da análise estatística dedica-se a buscar a relação entre a presença da luz solar refletida no ambiente e o desempenho da iluminação, utilizando os dados trabalhados na análise exploratória desenvolvida até aqui.

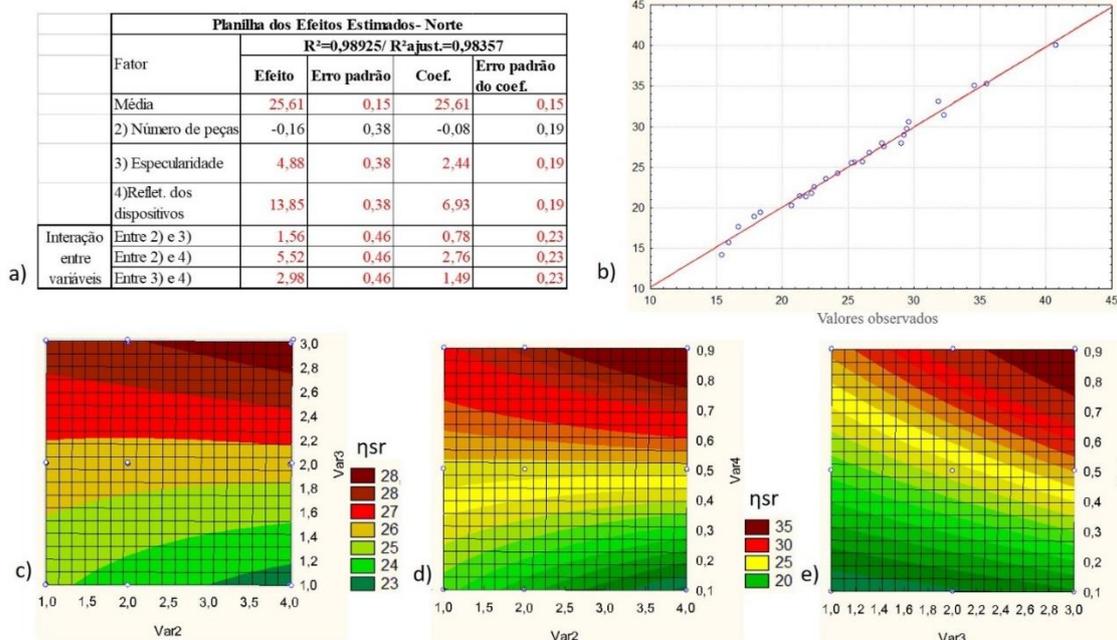
5.4 Análise estatística dos dados

Nesta seção os dados obtidos por meio de simulação e utilizados na análise exploratória nas seções anteriores deste capítulo foram analisados utilizando regressão múltipla, por meio do método dos mínimos quadrados. A seção 4.7 define as categorias e variáveis utilizadas na análise estatística. O software utilizado para as análises estatísticas foi o Statistica, versão 7. Todas as orientações foram analisadas.

5.4.1 Influência dos parâmetros para a eficiência da luz solar refletida

A Figura 72 apresenta a análise estatística referente à orientação Norte. Analisando a planilha dos efeitos estimados (Figura 72, item a), observa-se que os valores do coeficiente de correlação (R^2) e do coeficiente de correlação ajustado (R^2 ajustado) correspondem, respectivamente, a 0,99 e 0,98, indicando que o modelo estatístico é capaz de explicar muito bem as variações dos valores observados na simulação. O gráfico de valores previstos pelo modelo em relação aos valores observados nos dados ilustra esta afirmação (Figura 72, item b).

Figura 72 - Análise estatística para Orientação Norte: a) Planilha de efeitos estimados; b) gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos)



Fonte: Elaborado pela autora

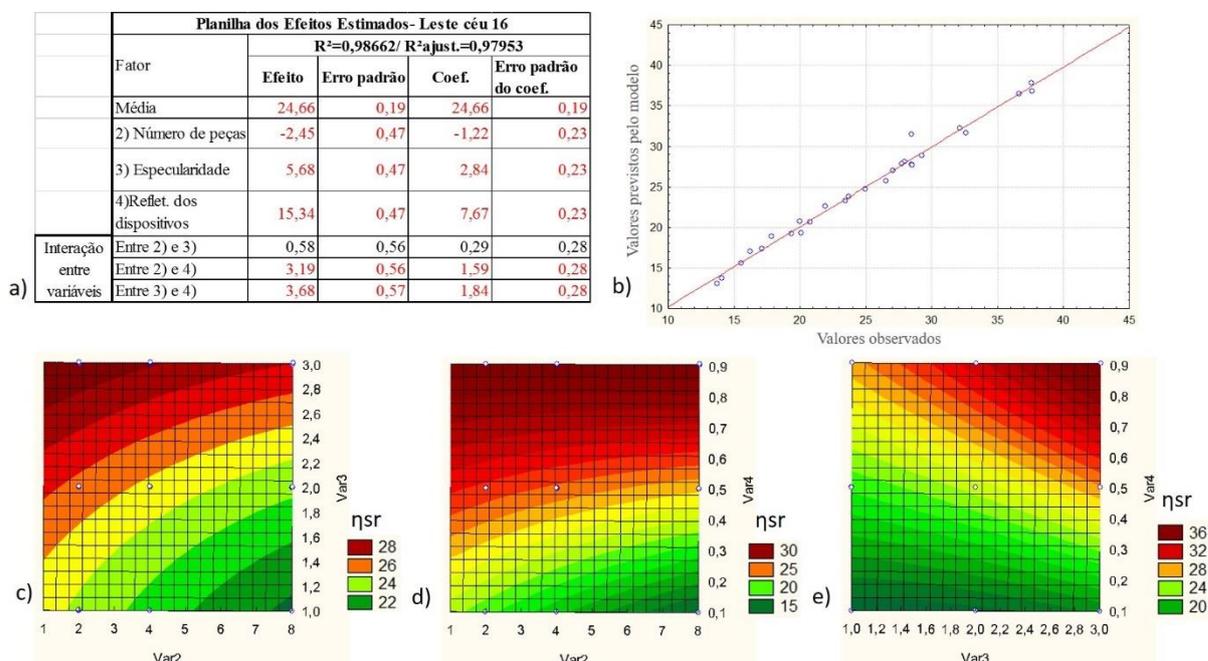
Em relação aos efeitos dos parâmetros analisados para a variação do índice de eficiência da luz solar refletida, observa-se que, entre as características dos dispositivos, apenas o número de peças apresentou efeito negativo. Conforme demonstrado na análise exploratória, o aumento do número de peças resultou em redução do índice de eficiência na maioria dos modelos avaliados, principalmente aqueles com menores refletâncias. As demais características apresentaram efeitos positivos, com destaque para a refletância que corresponde à variável com maior influência para a variação do índice.

Quando são analisadas as interações entre duas variáveis independentes, apresentadas na planilha de efeitos estimados, percebe-se que o maior efeito é resultante da interação entre número de peças e refletância dos dispositivos. Durante a análise exploratória foi possível observar que a variação da eficiência da luz solar refletida era ampliada entre modelos pertencentes aos sistemas com maior número de peças. O item “d” da Figura 72 ilustra graficamente o comportamento do índice de eficiência diante da interação das duas variáveis: os maiores valores de eficiência se concentram nas áreas de maior número de peças e maiores refletâncias. As demais interações estão representadas graficamente nos itens “d” e “e” da

Figura 72.

Os resultados da análise estatística referente à orientação Leste estão apresentados na Figura 73. Os valores superiores do coeficiente de correlação e do coeficiente de correlação ajustado, respectivamente 0,98 e 0,97, indicam, também para esta orientação, que o modelo estatístico é capaz de explicar muito bem as variações dos valores observados na simulação.

Figura 73 - Análise estatística para Orientação Leste: a) Planilha de efeitos estimados; b) Gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos)



Fonte: Elaborado pela autora

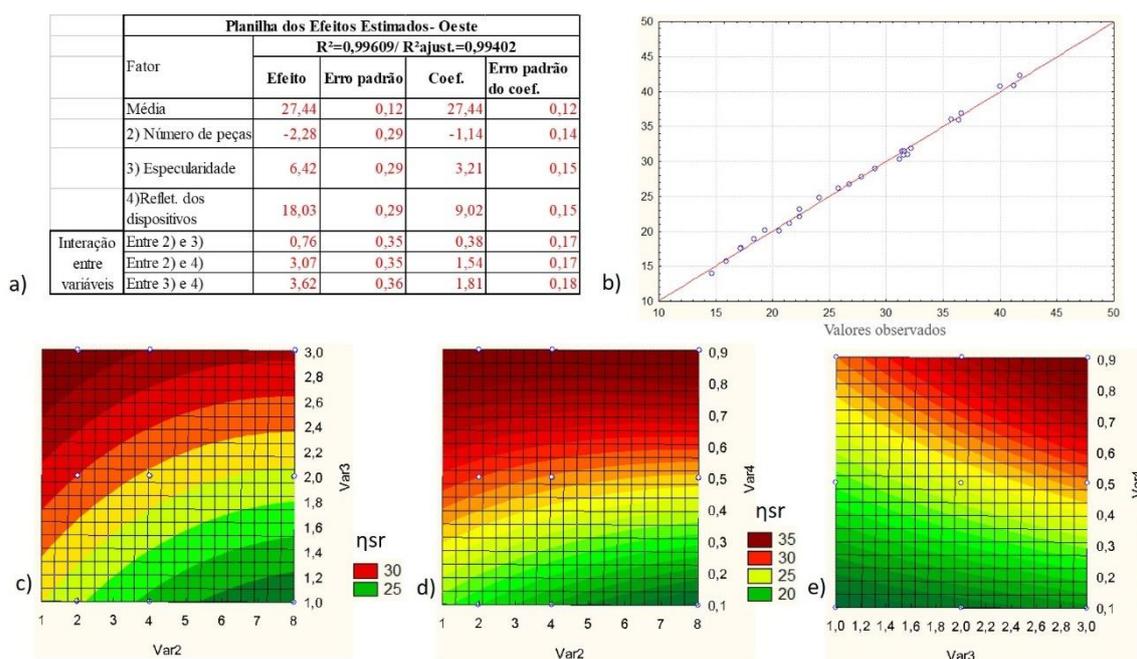
A planilha dos efeitos estimados mostra que mais uma vez a variável número de peças representou impacto negativo para o índice de eficiência da luz solar refletida. A análise exploratória indicou que o aumento do número de peças resultou em redução do índice de eficiência sobretudo no caso de modelos com menores refletâncias, conforme foi observado em relação à orientação Norte. As demais variáveis apresentaram efeitos positivos com valores altos, indicando que sua variação é capaz de resultar em maiores valores de eficiência. A variável “refletância” corresponde à característica de maior impacto dos dispositivos de sombreamento, também na orientação Leste.

Todas as interações analisadas resultaram em efeitos positivos, porém inferiores àqueles observados individualmente por cada variável. Nota-se que a variável “número de peças”

analisada em conjunto com a especularidade, é capaz de proporcionar ganhos na eficiência, embora o efeito seja baixo. Os gráficos dos itens “c” a “e” ilustram o comportamento do índice diante dessas interações.

Em relação à orientação Oeste, cujo resultado está ilustrado na Figura 74, percebe-se que todas as variáveis analisadas apresentaram maior impacto para a eficiência da luz solar refletida em comparação com as demais orientações. Conforme observado nos demais casos, a variável “número de peças” apenas é capaz de resultar em ganhos para o índice quando interage com a especularidade e refletância.

Figura 74 - Análise estatística para Orientação Oeste: a) Planilha de efeitos estimados; b) Gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos)



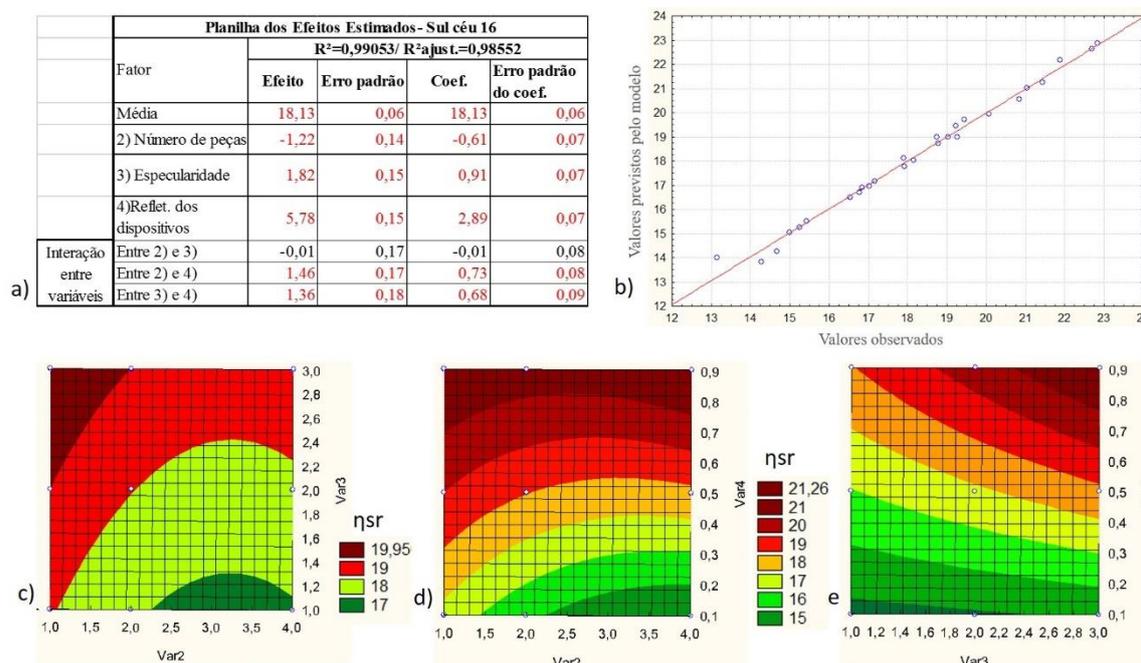
Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 75 apresenta os resultados da análise estatística referente à orientação Sul. De maneira geral, os efeitos de cada parâmetro seguiram o mesmo padrão de comportamento na orientação Leste, porém com valores mais baixos. Os coeficientes de correlação e de correlação ajustado também correspondem a valores acima de 0,99.

Na planilha dos efeitos estimados é possível observar que a variável “número de peças” apresentou efeito negativo para o índice de eficiência da luz solar refletida, como pode ser

notado nas análises referentes às orientações Leste e Norte. Também nesta orientação a variável “refletância dos dispositivos” resultou em maior impacto para o índice de eficiência e, conseqüentemente, para o aproveitamento da luz solar refletida.

Figura 75 - Análise estatística para Orientação Sul: a) Planilha de efeitos estimados; b) Gráfico de valores previstos pelo modelo x valores observados; c) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 3 (especularidade); d) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 2 (número de peças) e 4 (refletância dos dispositivos) e e) Gráfico de eficiência da luz solar refletida em relação à variável 3 (especularidade) e 4 (refletância dos dispositivos)



Fonte: Elaborado pela autora

Os gráficos dos itens “c” a “e” mostram a interação entre as variáveis. Assim como foi visto nas demais orientações, cada gráfico apresenta um padrão diferente de variação, com destaque para o item “c” que representa um efeito negativo baixo de interação entre variáveis.

Diante do conhecimento do comportamento da luz solar refletida a partir da variação das características físicas dos dispositivos de sombreamento é importante que o desempenho da iluminação natural no ambiente em estudo, dotado dos mais variados tipos de sistemas de proteção, também seja conhecido. A próxima seção dedica-se a relacionar a presença de luz solar, representada pelo índice de luz solar refletida, aos indicadores de desempenho definidos nesta pesquisa, com a finalidade de entender o papel desta componente para a disponibilidade, manutenção e distribuição de iluminâncias no plano de trabalho.

5.4.2 Correlação entre eficiência da luz solar refletida e indicadores de desempenho

Para esta análise foram utilizados os dados oriundos de simulações referentes aos valores de iluminância média global, uniformidade, autonomia de luz natural espacial de 81 modelos de dispositivos de sombreamento referentes às quatro orientações. As análises foram divididas por orientação. Os modelos foram definidos a partir da variação de suas características físicas e correspondem aos mesmos utilizados nas análises da eficiência da luz solar refletida, na seção anterior. Os valores dos indicadores foram relacionados ao índice de eficiência da luz solar refletida dos modelos através de matrizes de correlação.

Todos os valores que representam as relações entre a eficiência da luz solar refletida e os indicadores analisados estão apresentados na Tabela 11. Observa-se que a correlação entre a eficiência e a iluminância média anual (E_{ma}) foi positiva e alta para as quatro orientações analisadas, o que já era esperado, devido ao fato de que o primeiro está relacionado à contribuição da componente de sol refletido para a iluminância global. Durante a análise exploratória, foi visto que diante da variação dos parâmetros, houve aumento da iluminância média e da componente de luz solar refletida. Já em relação à componente de céu refletido, apenas o número de peças proporcionou seu incremento.

Tabela 11 - Matrizes de correlação. Orientações Norte, Leste, Oeste e Sul

	NORTE				LESTE				OESTE				SUL			
	η_{sr}	E_{ma}	U_{ma}	ALNe												
η_{sr}	1,00	0,76	-0,74	0,46	1,00	0,94	-0,42	0,9	1,00	0,94	-0,59	0,96	1,00	0,95	-0,97	0,88
E_{ma}	0,76	1,00	-0,92	0,53	0,94	1,00	-0,62	0,76	0,94	1,00	-0,74	0,84	0,95	1,00	-0,96	0,86
U_{ma}	-0,74	-0,92	1,00	-0,45	-0,42	-0,62	1,00	-0,18	-0,59	-0,74	1,00	-0,51	-0,97	-0,96	1,00	-0,89
ALNE	0,46	0,53	-0,45	1,00	0,9	0,76	-0,18	1,00	0,96	0,84	-0,51	1,00	0,88	0,86	-0,89	1,00

Fonte: Elaborado pela autora

A correlação identificada entre a eficiência da luz solar refletida e a uniformidade média anual (U_{ma}) foi negativa para as quatro situações analisadas. A partir da análise exploratória, é possível notar que a variação do número de peças foi responsável pelo incremento da iluminância, sobretudo nas áreas mais próximas à abertura dos ambientes, o que resultou, na maioria das situações, em redução da uniformidade. Percebe-se que o incremento da componente de sol refletido, que contribuiu para ampliação da iluminância, resultou em menor uniformidade.

Analisando o efeito da luz solar refletida para a autonomia de luz natural espacial, percebe-se que para todas as orientações a correlação foi alta, sobretudo para Leste e Oeste. A presença de luz solar refletida nos ambientes analisados contribuiu para a manutenção da

iluminância requerida na maior parte da sua área.

A partir das análises de todos os parâmetros avaliados nas seções anteriores, é possível concluir que cada orientação possui um potencial diferente para aproveitamento da luz solar refletida e seu consequente direcionamento para o interior do ambiente. Em comparação com a situação encontrada no ambiente-modelo sem dispositivos de sombreamento, pode-se notar que a presença de elementos capazes de redirecionar a luz solar, bem como a variação de características físicas como a refletância, por exemplo, foi capaz de aumentar o valor da componente de luz solar refletida na iluminância global do ambiente.

Algumas orientações mostram-se menos sensíveis às variáveis estudadas, sugerindo a utilização de outras estratégias para incrementar a eficiência da luz solar refletida. Neste sentido, a partir da análise exploratória foi possível observar o comportamento do índice de eficiência da luz solar refletida diante da variação das características físicas dos dispositivos de sombreamento, através da identificação dos ganhos percentuais resultantes do aumento do número de peças, especularidade e refletância da superfície das peças.

A fim de investigar a influência de cada variável ou parâmetro analisado na etapa exploratória dos dados, bem como de conhecer os efeitos da interação entre essas variáveis, a análise estatística foi definida entre os procedimentos metodológicos. A partir deste estudo foi possível confirmar os resultados encontrados por meio dos dados simulados e compreender o comportamento da variável dependente, a eficiência da luz solar refletida, frente à parametrização definida.

Em relação à influência dos parâmetros, representada pelos valores que constam nas tabelas de efeitos estimados, é possível notar que a refletância da superfície é a característica dos dispositivos que mais afeta positivamente o índice de eficiência da luz solar refletida, confirmando o resultado da análise exploratória dos dados. Desta maneira, em todas as orientações estudadas, aumentar a refletância dos dispositivos tem como resultado o incremento da eficiência, em relação aos demais parâmetros analisados nesta pesquisa. A Tabela 12 resume todos os valores de efeitos encontrados na análise estatística, separando-os por orientação e parâmetro: quanto maior o valor, maior a influência do parâmetro para a eficiência da luz solar refletida.

Tabela 12 - Efeitos de cada característica em relação à variação da eficiência da luz solar refletida

Orientação	Número de peças	Especularidade	Refletância dos dispositivos
Norte	-0,16	4,88	13,85
Leste	-2,45	5,68	15,34
Oeste	-2,28	6,42	18,03
Sul	-1,22	1,82	5,78

Fonte: Elaborado pela autora

O aumento da especularidade também resultou em incremento da eficiência, conforme foi visto na etapa anterior de análise dos dados. Na análise estatística e a partir dos valores apresentados na tabela, nota-se que esta variável também é capaz de influenciar positivamente o índice, contribuindo para o aproveitamento da luz solar. Após o aumento da refletância, o incremento da especularidade proporcionou os maiores efeitos em todas as situações analisadas.

A variável número de peças também apresentou o mesmo tipo de influência para o índice de eficiência, resultando em efeito negativo em todas as orientações. Foi visto na análise exploratória que esta característica apenas proporcionou ganhos no caso de modelos com alta refletância, diferentemente do que foi observado com a refletância e a especularidade, que garantiram variações positivas importantes no aproveitamento da luz solar para todas as refletâncias.

Entre as quatro orientações, os maiores valores dos efeitos são referentes à orientação Oeste, o que indica que a parametrização é capaz de resultar em maiores variações do índice de eficiência da luz solar refletida sob essas condições. A orientação Sul, como foi observado na análise anterior, proporcionou menor influência da variação das características estudadas.

Por meio dos valores fornecidos pela regressão múltipla, método estatístico utilizado, é possível prever, através de uma função (Equação 5), os valores do índice de eficiência da luz solar refletida (η_{sr}), levando em consideração o erro padrão previsto em cada caso. Para tanto, são utilizados os valores das médias e coeficientes (ver item *a* das Figuras 72 a 75) que constam das planilhas de efeitos estimados e os valores das categorias estatísticas de cada variável, conforme Tabela 4 (seção 4.7), com validade confirmada para as faixas das variáveis usadas no ajuste dos parâmetros do modelo.

$$\eta_{sr} = \text{Média} + (\text{Var02} \times \text{coef. 2}) + (\text{Var03} \times \text{coef. 3}) + (\text{Var04} \times \text{coef. 4}) \text{ [Eq. 5]}$$

Diante do conhecimento a respeito da influência dos parâmetros de dispositivos de sombreamento para o aproveitamento da luz solar na forma refletida, torna-se importante buscar a relação entre a presença desta componente no plano de trabalho e o desempenho da iluminação natural. Essa relação foi estabelecida por meio dos indicadores trabalhados na análise exploratória dos dados, e posteriormente relacionados à eficiência da luz solar refletida estatisticamente através de matrizes de correlação.

A análise estatística comprovou que existe forte correlação positiva entre luz solar refletida e iluminância média anual, bem como para a manutenção da autonomia de luz natural espacial. Por outro lado, os ganhos provenientes da presença de luz solar no plano de trabalho foram relacionados de forma negativa à uniformidade média anual, indicando que, a presença desta componente não favorece a distribuição de iluminâncias.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo geral estudar o desempenho de brises em salas de aula com relação à eficiência luminosa na captação da luz solar refletida na cidade de Maceió. A primeira parte do referencial teórico abordou a importância de se considerar essa fonte de luz na iluminação global de ambientes, ao mesmo tempo que indicou uma lacuna no estudo desta fonte de luz. O estudo bibliográfico possibilitou ainda a identificação dos parâmetros dos dispositivos a serem utilizados neste estudo.

A fim de se atender ao objetivo geral foram definidos quatro objetivos específicos trabalhados nas diversas seções desta tese. O primeiro objetivo foi propor um índice para avaliação de dispositivos de sombreamento em relação à luz solar refletida, capaz de identificar a contribuição de tais elementos para o aproveitamento dessa componente da iluminação.

Neste sentido, o índice de eficiência da luz solar refletida (η_{sr}) proposto para esta pesquisa, mostrou-se adequado para o objetivo de quantificar e comparar o desempenho de diversos tipos de dispositivos em relação ao aproveitamento da luz solar e corresponde à principal contribuição deste trabalho. A partir da sua utilização, torna-se possível classificar quaisquer elementos de acordo com seu potencial de redirecionamento da luz solar na forma refletida, para o interior do ambiente.

O segundo objetivo específico foi identificar sistemas de dispositivos de sombreamento dotados de brises com maior potencial para refletir a luz solar para o interior do ambiente diante da influência de três características: número de peças, especularidade e refletância. Para tanto, foi desenvolvido na seção 5 um estudo paramétrico possibilitado a partir de simulações computacionais, criando-se assim, modelos de sistemas de dispositivos com diferentes números de peças, características de reflexão e refletâncias de suas superfícies.

Foram desenvolvidas análises exploratória, tendo como resultado planilhas e gráficos, onde foram analisadas as variações do índice proposto, e estatística, onde foi identificada numericamente a influência de cada característica para a eficiência da luz solar refletida.

Quanto às variáveis dos dispositivos de sombreamento, tais análises mostraram que a refletância corresponde à característica de maior influência para a eficiência, e que o aumento da especularidade também é capaz de incrementar o índice proposto. O aumento do número de peças, por sua vez, representou poucas possibilidades para ampliar o aproveitamento da luz solar refletida. Observou-se ainda, que a interação entre duas características também foi capaz

de influenciar o índice.

O terceiro objetivo específico propôs a análise da relação existente entre a luz solar refletida no plano de trabalho e o desempenho da iluminação natural. A importância de se estabelecer tal relação encontra-se na possibilidade de auxílio à tomada de decisão quanto a escolha de soluções projetuais que ampliem a parcela da luz solar na iluminação do ambiente. A segunda parte do referencial teórico, seção 3, trouxe a discussão sobre indicadores de avaliação do desempenho da iluminação natural utilizados em pesquisas de iluminação natural.

Foram definidos na seção 4, que expõe o método de trabalho, três indicadores de desempenho da iluminação natural: Iluminância média anual (E_{ma}), uniformidade média anual (U_{ma}) e autonomia de luz solar espacial ($ALNe_{500lx/50\%}$). A partir de análise estatística, o índice de eficiência da luz solar refletida foi relacionado a cada um dos indicadores, e foi visto que sua relação com a iluminância média anual e com a autonomia de luz solar refletida foi definida como forte e positiva. A presença da luz solar refletida no plano de trabalho, por sua vez, foi relacionada de forma negativa para a distribuição das iluminâncias, já que contribuiu para a redução da uniformidade no ambiente.

O quarto objetivo específico propôs a definição de recomendações de projeto para dispositivos de sombreamento relacionadas à contribuição da luz solar refletida para o ambiente. A partir das análises desenvolvidas, exploratória e estatística, com a finalidade de atendimento aos objetivos específicos, foi possível identificar quais características desses elementos são capazes de promover maior aproveitamento da luz solar levando em consideração suas consequências para o desempenho da iluminação, conforme apontado a seguir.

6.1 Recomendações para o projeto de dispositivos de sombreamento

A luz solar refletida pelos dispositivos de sombreamento proporciona importante contribuição para a disponibilidade e manutenção da iluminação natural e a configuração dos sistemas de proteção, bem como suas propriedades de reflexão – refletância e especularidade – afetam esse redirecionamento da luz.

A definição do número de peças, acabamento e cor da superfície dos dispositivos, tão relevantes para o desempenho da iluminação, é papel do arquiteto. Diante da variedade de soluções disponíveis, esta pesquisa destaca algumas recomendações para o projeto de

dispositivos de sombreamento. Quanto à variação do **número de peças**, mantendo-se o mesmo ângulo de sombreamento, pode-se afirmar que:

- Aumentar o número de peças em sistemas de dispositivos inseridos em aberturas laterais apenas corresponde a uma solução válida para o incremento da iluminação quando tais elementos possuem alta refletância, sobretudo especular;
- A inserção de mais peças em um sistema existente representa uma estratégia mais eficiente no caso da fachada Norte, por possibilitar maiores ganhos na iluminância média em comparação com as demais orientações;
- No caso de dispositivos com baixa refletância, tal medida pode representar investimento desnecessário, se o objetivo for promover maior aproveitamento da luz natural.

A influência do número de peças para o aproveitamento da luz solar depende, portanto, de duas outras características: acabamento e cor das superfícies dos dispositivos. Em relação ao **acabamento**, vale destacar que:

- Entre os modelos analisados, os sistemas com maior número de peças, cujo acabamento das superfícies proporciona reflexão especular, são capazes de promover maior aproveitamento da luz solar na forma refletida. Materiais com superfícies espelhadas ou altamente polidas como o alumínio, por exemplo, podem ser empregados com esta finalidade;
- No caso de dispositivos existentes, suas peças podem ser revestidas com pintura que proporcione acabamento brilhante, como o esmalte, sobre superfícies originalmente foscas, sem que haja necessidade de substituição de material;
- Dispositivos com acabamento fosco, como o resultante de pintura do tipo PVA, por exemplo, que proporcionam reflexão difusa, são menos eficientes em refletir a luz, no entanto proporcionam melhor distribuição da iluminação no ambiente;
- Vale destacar que em ambientes com aberturas voltadas para Leste e Oeste a variação das características de reflexão representaram as maiores possibilidades de aproveitamento da luz solar.

Como foi visto, entre as características analisadas, a refletância, que depende da **cor dos dispositivos**, corresponde ao parâmetro de maior influência para os indicadores analisados:

- O uso de cores claras, como branco, creme e amarelo, favorece o aproveitamento

da luz solar, sobretudo se forem empregadas em materiais com reflexão especular. Por outro lado, altas refletâncias resultaram em redução da uniformidade da iluminação no ambiente;

- O aumento do número de peças em sistemas com cores mais claras representa incremento da iluminância no ambiente;
- Ambientes com aberturas voltadas para Oeste são capazes de proporcionar maiores ganhos de iluminação a partir do emprego de superfícies especulares com alta refletância.

No Apêndice A encontram-se tabelas com as variações percentuais da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida para cada orientação, com o intuito de auxiliar a escolha de soluções que favoreçam o aproveitamento da luz solar.

Levando em consideração os cenários analisados, tais soluções caracterizam-se, de modo geral, como medidas simples, como a inserção de peças, substituição de material empregado ou, simplesmente, a escolha de uma nova cor para os elementos de proteção, e são passíveis de aplicação tanto durante a fase de projeto, quanto posteriormente, na busca pela otimização de um sistema existente.

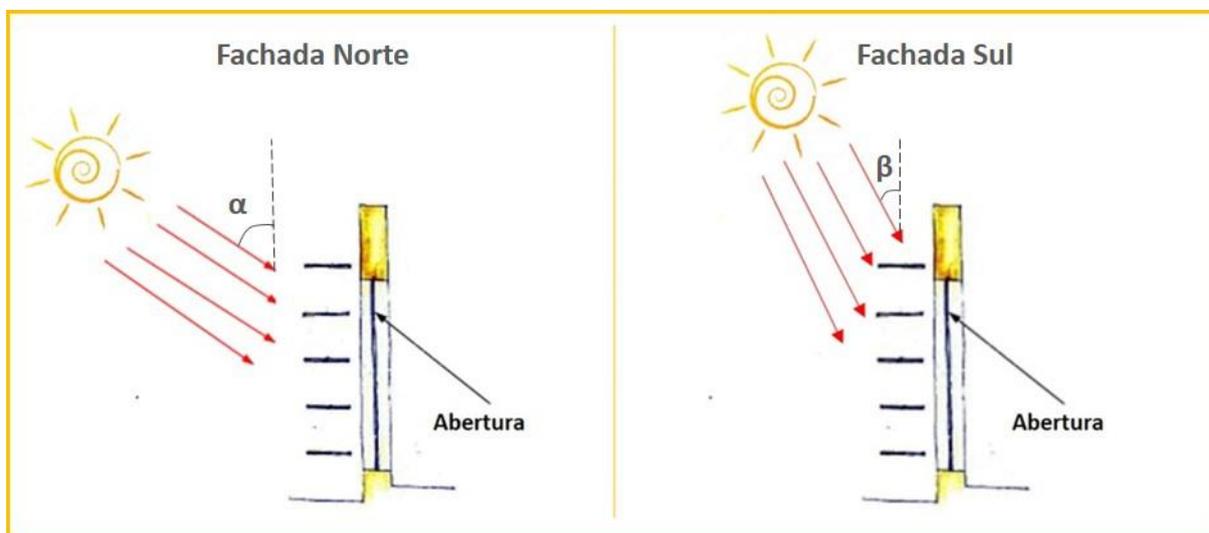
6.2 Luz solar refletida e geometria da insolação

Alguns aspectos destacados durante o desenvolvimento desta pesquisa parecem estar relacionados à geometria da insolação característica de cada orientação. No caso da orientação Norte, o aumento do número de peças resultou em ganhos para a eficiência da luz solar refletida não observados nas orientações Leste e Oeste, e até mesmo na orientação Sul, onde a trajetória solar também se aproxima do plano da fachada.

Em comparação com o Sul, a trajetória solar na orientação Norte se afasta mais do plano da fachada, como mostra a Figura 76: o ângulo α formado entre o sol e o plano da fachada no caso da fachada Norte é maior que o ângulo β referente à fachada Sul. A incidência solar na orientação Norte parece favorecer os ganhos provenientes do aumento do número de peças no caso de altas refletâncias. Pode-se afirmar que o maior número de horas de insolação referente à fachada Norte influenciou tais ganhos, conforme mostra a Tabela 10 (seção 5.3.3). O aproveitamento da luz solar também parece estar relacionado à sua disponibilidade no caso de ambientes voltados para a fachada Sul, com menor número de horas de insolação, onde a

parametrização proporcionou as menores variações dos indicadores analisados.

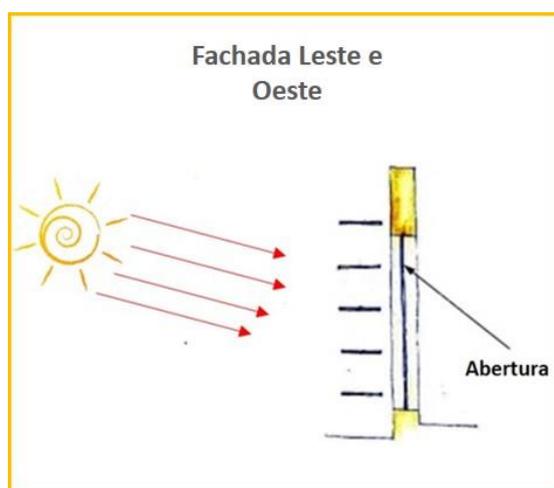
Figura 76 - Esquema comparativo da incidência solar nas fachadas Norte e Sul: a primeira possibilita maiores ganhos de eficiência da luz solar refletida a partir do aumento do número de peças com alta refletância



Fonte: Elaborado pela autora

As orientações Leste e Oeste, que apresentam incidência solar que se aproxima da perpendicular em relação à fachada, possibilitaram maiores ganhos a partir da variação das características de reflexão e da refletância das superfícies dos dispositivos, em comparação com as demais orientações (ver Figura 77).

Figura 77 - Esquema da incidência solar nas fachadas Leste e Oeste: maiores ganhos a partir da variação das características de reflexão e refletância



Fonte: Elaborado pela autora

Tais possibilidades de relação entre os resultados encontrados e a geometria da insolação

permitiria uma maior extensão da aplicação de recomendações projetuais indicadas nesta pesquisa a outras localidades. Conclui-se, portanto, que é possível a identificação de soluções que otimizem o desempenho de sistemas de dispositivos quanto à eficiência da luz solar refletida. A pesquisa realizada fornece dados a respeito desse desempenho, além de apontar diretrizes para suporte a decisões de projetos de tais elementos.

6.3 Limitações da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros

Devem ser destacados alguns aspectos que são considerados limitações para a aplicabilidade dos resultados desta pesquisa:

- O estudo desenvolvido limita-se a aplicação no ambiente modelo com apenas uma configuração de abertura;
- O ambiente modelo não foi analisado em relação ao conforto e luminoso do usuário, sendo desconsiderados os efeitos da parametrização para o ofuscamento;
- Foram analisados apenas sistemas de dispositivos de sombreamento com brises planos horizontais, restringindo a aplicabilidade dos resultados a esta tipologia e este formato das peças.

Algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser indicadas:

- Utilização da forma dos brises como parâmetro e sua influência para a eficiência da luz solar refletida e desempenho da iluminação. O Apêndice B traz um estudo complementar sobre a influência de brises em formato côncavo e pode ser desenvolvido de maneira a trazer resultados mais amplos e conclusivos sobre esse parâmetro;
- A investigação sobre a influência da luz solar refletida por dispositivos de sombreamento para o consumo de energia elétrica;
- A análise dos índices de eficiência de luz solar direta (η_{sd}), eficiência de luz do céu refletida (η_{cr}), eficiência de luz do céu direta (η_{cd}) e sua influência para o desempenho da iluminação natural.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 8995-1**: Iluminação de ambientes internos de trabalho. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 15215-1**: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos- Conceitos e definições. Rio de Janeiro, 1999.

ANDERSEN, M.; MARDALJEVIC, J.; SW LOCKLEY, A. A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part I: photobiology based model. **Lighting, Research and Technology**, n. 44, p. 37-53, 2012.

BAKER, N., STEEMERS, K. **Daylight Design of Buildings**. London: James & James, 2002.

BARRETT, P.; DAVIES, F.; ZHANG, Y.; BARRETT, L. The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. **Building and Environment**, n. 89, p.118-133, 2015.

BELTRÁN, L. O.; PAPAMICHAEL, K. M.; SELKOWITZ, S. E. The design evaluation of three advanced daylighting systems: Light shelves, light pipes and skylights. **Lawrence Berkeley Laboratory**, University of California, 1994.

BITTENCOURT, L; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2008.

BITTENCOURT, L. S. Clima e repertório arquitetônico. In: II Seminário sobre Ensino e Pesquisa em Projeto de Arquitetura. **Anais...** Rio de Janeiro, 2005.

BITTENCOURT, L. S. **Uso das cartas solares**: diretrizes para arquitetos. 3. ed. rev. Maceió: EDUFAL, 2000.

BOYCE, P. R. The impact of light in buildings on human health. In: 2nd International Conference on Sustainable Healthy Buildings. **Proceedings...** Seoul, Korea, 2009.

BRASIL. Instrução Normativa nº 01. Dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dá outras providências. Brasília, DF, 19 set. 2010. Disponível em: <http://www.comprasnet.gov.br/legislacao/legislacaoDetalhe.asp?ctdCod=295>. Acesso em: 18 jan. 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **REUNI – Reestruturação e expansão das universidades federais. Diretrizes Gerais**. Brasília: MEC, 2007.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**, BEN, ano 2015.

CABÚS, R. C. **Tropical Daylighting: Predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil**. 2002. 288f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - University of Sheffield, Sheffield, 2002.

_____. Influência da luz refletida no solo na iluminação natural nos trópicos: comparando o desempenho de protetores solares. In: X Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. **Anais...**São Paulo, 2004.

_____. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: VI Encontro Latino Americano e VIII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Maceió, 2005.

_____. **TropFac**, versão 3. Guia do Usuário, Maceió: Grilu, 2015.

_____. **TropLux**, versão 7. Guia do Usuário, Maceió: Grilu, 2016.

CARTANA, R. P.; PEREIRA, F. O. R.; BERTÉ, E. J. Avaliação de desempenho térmico e lumínico de elementos de controle solar projetados através de modelagem paramétrica. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**São Paulo, 2016.

CAVALCANTI, L. P. **Moderno e brasileiro: a história de uma nova linguagem na arquitetura**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2006.

CHAN, Y; TZEMPELIKOS, A. A hybrid ray-tracing and radiosity method for calculating radiation transport and illuminance distribution in spaces with venetian blinds. **Solar Energy**, v. 86, p. 3109-3124, 2012.

CHAVES, P. W. **Iluminação Natural em Escritórios: O Uso de Pannel Prismático em Aberturas Laterais**. 2012. 182p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2012.

CHUA, K., J.; CHOU, S. Evaluating the performance of shading devices and glazing types to promote energy efficiency of residential buildings. **Building Simulation**, v.3, p.181–194, 2010.

CIE – COMMISSION INTERNATIONALE L'ACLAIRAGE. **Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky**. Publication CIE S 011/E:n2003. Viena, Áustria, 2003.

CURTIS, W. J. **Arquitetura Moderna desde 1900**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

DAMASCENO, B. **Formatos de brises com mesmo efeito**. Disponível em: <<http://brasiliaconcreta.com.br/o-que-e-brise/>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

DATTA, G. E. Effect of fixed horizontal louver shading devices on thermal performance of building by TRNSYS simulation. **Renewable Energy**, n. 23, p. 497–507, 2001.

DU, J.; SHARPLES, S. The variation of daylight levels across atrium walls: reflectance distribution and well geometry effects under overcast sky conditions. **Solar Energy**, n. 85, p. 2085–2100, 2011.

DUBOIS, M. Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators. **Lighting, Research and Technology**, n. 35, p. 61-76, 2003.

EDMONDS, I.R. Performing of Laser Cut Light Deflecting Panels in Daylighting Applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, n. 29, p. 1-26, 1993.

EDWARDS, B. W. **Environmental Design and Educational Performance, with Particular Referenceto "Green" Schools in Hampshire and Essex.** *Research in Education*, v.76 p.14-32, 2006.

ELETROBRAS. **PROCEL On-line.** Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Procel.aspx>>. Acesso em: 20 jun. de 2017.

ETHERINGTON, R. **Lake Shore Drive.** Disponível em: <https://www.dezeen.com/2010/03/02/860-880-lake-shore-drive-refurbishment-by-krueck-sexton/>. Acesso em: 20 jan. 2017.

FELIPPE, A. R. **Desempenho luminoso e energético de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

FIUZA, J. M. **Influência de elementos de proteção solar horizontais aplicados a aberturas laterais na admissão e distribuição da luz natural.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

FONSECA, R. W.; DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F.O.R. Modelos de predição da redução do consumo energético em edifícios que utilizam a iluminação natural através de regressão linear multivariada e redes neurais artificiais. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 163-175, 2012.

FRANCO, I. M. **Efficacy of Light Shelves: Passive, Dynamic, and Automatic Devices Related to Light and Thermal Behavior.** ASHRAE, 2007.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico.** São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. **Revista Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 51-81, 2006.

GRAZIANO, S. F. **Estudo de redirecionamento da luz natural utilizando equipamento tipo "lightshelf".** 112p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

GRUBERGER, I. **Sistema de iluminação zenital.** 2011. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/168/artigo286811-1.aspx>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

GUTIERREZ, Cristina R. G.; LABAKI, Lucila C. Considerações sobre o brise-soleil na Arquitetura Moderna Brasileira. In: IV Encontro Latino Americano e VIII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Maceió, 2005.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados.** Trad. Adonai Schlup Sant' Anna e Anselmo Chaves Neto. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAREDY, A. **Simulation of photovoltaic airflow windows for indoor thermal and visual comfort and electricity generation**. 2016. 295 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Clima Urbano) – Departamento de Arquitetura e Clima Urbano, Universidade de Nottingham, 2016.

HESCCHONG MAHONE GROUP. **Windows and Classrooms: A Study of Student Performance and the Indoor Environment**. TECHNICAL REPORT. October 2003. 500-03-082-A-7.

HO, M.; CHIANG, C.; CHOU, P.; CHANG, K.; LEE, C. Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classrooms. **Energy and Buildings**, n. 40, 2008.

HOPKINSON, R. G.; PETHERBRIDGE, P.; LONGMORE, J. **Iluminação natural**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1975.

IEA, International Energy Agency. **Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components**. Solar Heating and Cooling Programme, Energy Conservation in Buildings & Community Systems. Washington: IEA, 2000.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Projeção da população do Brasil**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/uf.php?coduf=27&search=alagoas&lang=>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

ISOLDI, R. I. **Tradição e sustentabilidade: desafios e perspectivas do projeto sustentável em arquitetura e construção**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

KALOS, M. H.; WHITLOCK, P. A.. **Monte Carlo Methods**. New York: Wiley, 1986.

KAZANASMAZ, T.; ORS, P. F. **Comparison of Advanced Daylighting Systems to Improve Illuminance and Uniformity through**. Simulation Modelling, Light and Engineering, n.22, p. 56-66, 2013.

KONTADAKIS, A.; TSANGRASSOULIS, A.; DOULOS, L.; TOPALIS, F. An active sunlight redirection system for daylight enhancement beyond the perimeter zone. **Building and Environment**, n. 113, p. 267-279, 2017.

KORSAVI, S.; ZOMORODIAN, Z.; TAHSILDOOST, M. Visual comfort assessment of daylit and sunlit areas: A longitudinal field survey in classrooms in Kashan, Iran. **Building and Environment**, n. 128, p. 305-318, 2016.

KIM, J. T.; KIM, G. Advanced external shading device to maximize visual and view performance. **Indoor and Built Environment**, v. 19, p. 65-72, 2010.

KRUGER, E. L., DORIGO, A. L. Daylighting analysis in a public school in Curitiba, Brazil. **Renovable Energy**, n. 33, p. 1695-1702, 2008.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia científica**. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

- LAM, W. M. C. **Sunlighting as formgiver for architecture**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
- LARANJA, A. C. **Parâmetros urbanos e a disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno**. 2010, 285f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- LEE, E. S.; TAVIL, A. Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs. **Building and Environment**, n. 42, p. 2439-2449, 2007.
- LESLIE, R. P.; RADETSKY, L. C.; SMITH, A. M. Conceptual design metrics for daylighting. **Lighting, Research and Technology**, n. 44, p. 277-290, 2012.
- LEUNG, T.; RAJAGOPALAN, P.; FULLER, R. Performance of a daylight guiding system in an office building. **Solar Energy**, n. 94, p. 253-265, 2013.
- LI, D.; CHEUNG, G.; CHEUNG, K.; LAM, J. Simple method for determining daylight illuminance in a heavily obstructed environment. **Building and Environment**, n. 44, p. 1074-1080, 2009.
- LIMA, K. M. **Avaliação de sistemas de janela para suporte a decisões de projeto quanto à iluminação e uso de energia**. Tese (Doutorado) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- LIMA, Kamila M.; BITTENCOURT, L. S. Efeito do espaçamento, inclinação e refletância de brises horizontais com mesma máscara de sombra na iluminação natural e ganhos térmicos em escritórios em Maceió-AL. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...** Juiz de Fora, 2012.
- LINS, D. M. S.; BATISTA, J. O. **Estudo de proteção solar e iluminação natural em edifício empresarial de Maceió – AL**. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...** São Paulo, 2016.
- LITTLEFAIR, P. J. **Solar Shading of Buildings**. Watford: Building Research Establishment (BRE), 1999.
- MACÊDO, C. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. Dissertação (Mestrado). Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- LO VERSO, V.; FREGONARA, E.; CAFFARO, F.; MORISANO, C.; PEIRETTI, G. Daylighting as the Driving Force of the Design Process: from the Results of a Survey to the Implementation into an Advanced Daylighting Project. **Journal of Daylighting**, n. 1, p. 36-55, 2014.
- MACÊDO, C. C. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.
- MAJOROS, A. **Daylighting**. Brisbane: PLEA- Passive and Low Energy Architecture International/ Department of Architecture - University Queensland, 1998.

MANHAS, M. P. G. **Difusa ou especular? Estudando o desempenho da prateleira de luz segundo a refletância da sua superfície.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

MARDALJEVIC, J.; HESCHONG, L. LEE, E. Daylight metrics and energy savings. **Lighting, Research and Technology**, n. 41, p. 1-23, 2009.

MARDALJEVIC, J., ANDERSEN, M., ROY, N., CHRISTOFFERSEN, J. **Daylighting metrics for residential buildings.** In: 27th Session of the CIE, Sun City, South Africa, 2011.

MARDALJEVIC, J.; ROY, N. The sunlight beam index. **Lighting, Research and Technology**, v. 48, p. 55-69, 2016.

MARTINS, T. L. **Dispositivos de proteção solar e eficiência energética em edifícios de escritório: uma avaliação para a cidade de Maceió/ AL.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

MARTINS, L. O. **O poço de luz como estratégia de iluminação natural na cidade de Maceió-AL.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2011.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MOORE, F. **Concepts and practice of architecture daylighting.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

NASCIMENTO, T. C. **Avaliação da NBR 15.575 quanto ao desempenho térmico e luminoso: estudo de caso em Maceió-AL.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

NAULT, E.; MOONEN, P.; REY, E.; ANDERSEN, M. Predictive models for assessing the passive solar and daylight potential of neighborhood designs: A comparative proof-of-concept study. **Building and Environment**, n. 116, p. 1-16, 2017.

NEIVA, S.; DEL RIO, V. Um sumo norte-americano no Japão: três projetos de um jovem escritório de Nova Iorque. Disponível em:
<<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/projetos/16.189/6213?page=4>> Acesso em: 10 jun. 2016.

NIKIFORIADIS, F.; PITTS, A. 3D digital geometric reconstruction of the urban environment for daylight simulations studies. In: International Building Simulation Conference, 8., Eindhoven, Netherlands, 2003. **Proceedings...**Eindhoven: IBPSA, 2003.

OLGYAY, A; OLGAY, V. **Solar control and shading devices.** Princeton: Princeton University Press, 1973.

_____. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism.** Princeton:

Princeton University Press, 1963.

PEREIRA, F. O. R. **Luminous and thermal performance of windows shading and sunlighting reflecting devices**. Tese (Doutorado em Arquitetura) - University of Sheffield, Sheffield, 1992.

PEREIRA, R. C.; PEREIRA, F. O. R.; CLARO, A. Caracterização da contribuição do entorno na avaliação da iluminação natural em edificações. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 103-115, 2008.

PHILLIPS, D. **Daylighting: Natural Light in Architecture**. Amsterdam: Elsevier, 2004.

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the Energy Plus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1948–1958, 2010.

REINHART, C. F.; FITZ, A. Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design. **Building and Environment**, n. 38, p. 824-835, 2006.

REINHART, C. F., WIENOLD, J. The daylighting dashboard - A simulation-based design analysis for daylit spaces. In: Fourth National Conference of IBPSA-USA. **Proceedings...** New York City, 2010.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. **Leukos**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.

RIBEIRO, Pedro V. S.; CABÚS, R. C. Estudo do ângulo de aplicação de painéis prismáticos tipo laser cut em ambiente nos trópicos. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Campinas, 2015.

RIBEIRO, Pedro V. S. **Sistemas avançados em iluminação natural: análise da influência da configuração urbana na aplicação do painel de corte a laser em Maceió**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

SANTOS, C. R. Revisitando a sede do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/13.147/4942>> Acesso em: 25 ago. 2015.

SILVA, J. S. Estratégias para luz natural: sistemas convencionais e brise-soleil como elemento de controle. **Paraná – Cadernos de Arquitetura e urbanismo, Universidade de Brasília**. Brasília, n. 3, p. 22-35, 2014.

SOUZA, Roberta V. G; SANTOS, Iara G. Proteções solares no Regulamento Brasileiro de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. **Revista Ambiente Construído**, v. 12, n. 1, p. 227-241, 2012.

SUPERINTENDÊNCIA DE INFRAESTRUTURA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS. **Projetos desenvolvidos entre os anos de 2008 e 2012 no Campus A. C. Simões**. Maceió, 2013.

TREGENZA, P.; LOE, D. **The design of lighting**. London: Spon Press, 2004.

TREGENZA, P. The Monte Carlo method in lighting calculations. **Lighting Research & Technology**, n. 15, p. 163-170, 1983.

TREGENZA, P.; WATERS, I. Daylight coefficients. **Lighting Research & Technology**, v.15, n.2, p.65-71, 1993.

WAGDY, A.; SHERIF, A.; SABRY, H.; ARAFA, R.; MASHALY, I. Daylighting simulation for the configuration of external sun-breakers on south oriented windows of hospital patient rooms under a clear desert sky. **Solar Energy**, n. 149, p. 164-175, 2017.

WEBB, A. R. Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light. **Energy and Buildings**, n. 38, p. 721-727, 2006.

APÊNDICE A – Percentuais de variação de η_{sr}

Este apêndice apresenta os resultados da parametrização para a variação da eficiência da luz solar refletida através de tabelas (ver Tabelas de 13 a 16) referentes a cada orientação, com os percentuais de variação proporcionados por cada característica de dispositivos analisada. Foram considerados os modelos com refletâncias de 10%, 50% e 90%. Para auxiliar a visualização do potencial de variação de cada característica, as faixas percentuais são representadas por cores, conforme mostra a Figura 78. As cores utilizadas não representam intenção de classificação positiva ou negativa para quaisquer soluções projetuais.

Figura 78 - Faixas de porcentagem referentes à variação da eficiência da luz solar refletida

Faixas de variação η_{sr}	
$< 0\%$	
$0\% \leq \eta_{sr} \leq 24\%$	
$25\% \leq \eta_{sr} \leq 49\%$	
$50\% \leq \eta_{sr} \leq 74\%$	
$75\% \leq \eta_{sr} \leq 100\%$	
$> 100\%$	

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 13 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida. Orientação Norte

Número de peças (entre sistemas <i>a</i> e <i>c</i>)			Especularidade (entre modelos totalmente difusos e totalmente especulares)				Refletância (entre modelos com refletância de 10% e 90%)			
Refletância	Difusos	Especulares	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>
10%	-28%	-25%	10%	4%	15%	8%	Refletância			
50%	-7%	-5%	50%	15%	18%	30%	Difusa	52%	62%	92%
90%	11%	28%	90%	8%	22%	38%	Especular	79%	71%	144%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 14 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida. Orientação Leste

Número de peças (entre sistemas <i>a</i> e <i>c</i>)			Especularidade (entre modelos totalmente difusos e totalmente especulares)				Refletância (entre modelos com refletância de 10% e 90%)			
Refletância	Difusos	Especulares	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>
10%	-29%	-25%	10%	7%	10%	14%	Refletância			
50%	-15%	-8%	50%	24%	28%	25%	Difusa	47%	76%	102%
90%	-2%	3%	90%	28%	32%	35%	Especular	76%	110%	102%

Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 15 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida.
Orientação Oeste**

Número de peças (entre sistemas <i>a</i> e <i>c</i>)			Especularidade (entre modelos totalmente difusos e totalmente especulares)				Refletância (entre modelos com refletância de 10% e 90%)			
Refletância	Difusos	Especulares	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>
10%	-29%	-23%	10%	9%	13%	17%	Difusa	52%	85%	115%
50%	-13%	-3%	50%	25%	31%	39%	Especular	79%	112%	142%
90%	1%	4%	90%	27%	29%	32%				

Fonte: Elaborado pela autora

**Tabela 16 - Variação da eficiência da luz solar refletida diante da parametrização definida.
Orientação Sul**

Número de peças (entre sistemas <i>a</i> e <i>c</i>)			Especularidade (entre modelos totalmente difusos e totalmente especulares)				Refletância (entre modelos com refletância de 10% e 90%)			
Refletância	Difusos	Especulares	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>	Refletância	sistema <i>a</i>	sistema <i>b</i>	sistema <i>c</i>
10%	-13%	-14%	10%	1%	1%	2%	Difusa	16%	28%	35%
50%	-6%	-6%	50%	12%	9%	12%	Especular	33%	42%	55%
90%	1%	1%	90%	18%	13%	18%				

Fonte: Elaborado pela autora

APÊNDICE B – Influência da forma de dispositivos de sombreamento para a eficiência da luz solar refletida

A análise da forma dos brises tem a finalidade de complementar a pesquisa desenvolvida para esta tese, que levou em consideração três outras variáveis dos dispositivos: número de peças, especularidade e refletância.

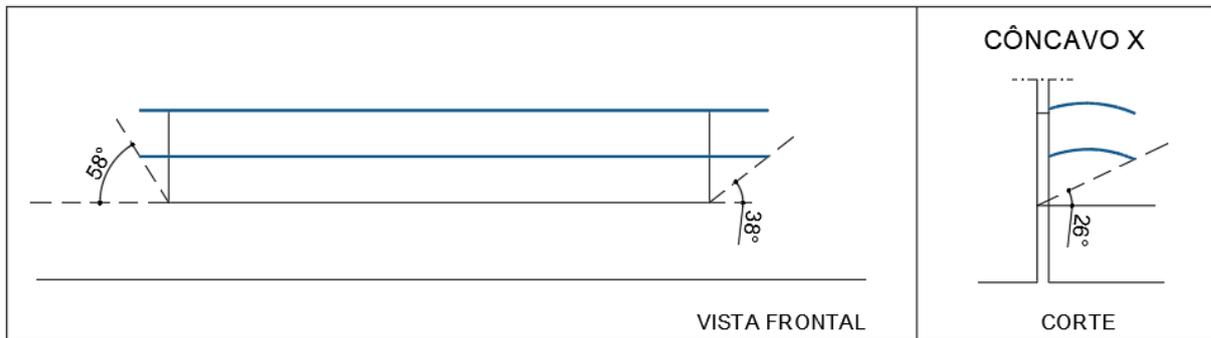
O objetivo deste estudo é analisar a influência de sistemas de dispositivos de sombreamento com brises côncavos para a variação:

- Do índice de eficiência da luz solar refletida (η_{sr});
- Dos indicadores de desempenho da iluminação natural: iluminância média anual (E_{ma}), uniformidade média anual (U_{ma}) e autonomia de luz natural espacial (ALNe).

Método:

- Foi utilizado o mesmo ambiente modelo adotado para esta pesquisa, que corresponde a uma sala de aula;
- A orientação Leste foi selecionada por representar, em grande parte das análises realizadas, maiores possibilidades de variação dos indicadores;
- Foi definido um tipo de sistema de dispositivos com duas peças caracterizado pela forma côncava;
- Entre as variáveis analisadas na pesquisa, a refletância apresentou maiores possibilidades de variação dos indicadores e, portanto, foi utilizada neste estudo. Foram desenvolvidos modelos com refletâncias difusa e especular, variando de 10% a 90%, totalizando 10 modelos;
- Foi utilizada uma nomenclatura específica para os modelos côncavos que serão representados pela letra “x”. A Figura 79 mostra o sistema utilizado;
- O Quadro 17 mostra as nomenclaturas dos modelos definidos para este estudo;
- Foram analisadas as variações de cada indicador diante do aumento da refletância e os resultados também foram comparados aos resultados referentes ao sistema *a* de brises planos, orientação Leste;
- As tabelas com os dados da simulação se encontram no final deste Apêndice (Ver Tabelas de 17 a 20).

Figura 79 - Modelo de dispositivo de sombreamento utilizado no estudo



Fonte: Elaborado pela autora

Quadro 17 - Nomenclatura e características dos modelos de dispositivos de sombreamento

ORIENTAÇÃO	LESTE	
SISTEMAS	Sistema x	
MODELOS	LxD10	LxE10
	LxD30	LxE30
	LxD50	LxE50
	LxD70	LxE70
	LxD90	LxE90
REFLETÂNCIA SUPERFÍCIES	PISO- 0,3/ PAREDE- 0,6/ TETO- 0,7	

Fonte: Elaborado pela autora

Resultados:

Eficiência da luz solar refletida (η_{sr}):

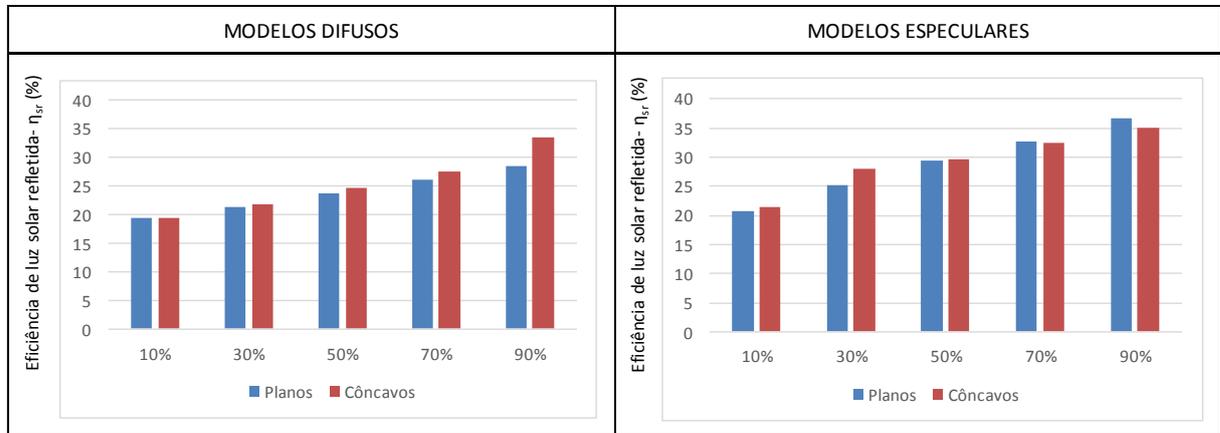
O aumento da refletância no caso dos dispositivos planos, como foi visto, resultou em ganhos para a eficiência da luz solar refletida: no caso dos modelos difusos esse ganho foi de 47%, entre o modelo com refletância de 10% e o modelo de 90%, e no caso dos modelos especulares o ganho foi superior, chegando a 76%.

É possível perceber através do gráfico da Figura 80 que os modelos difusos de forma côncava proporcionaram maior aproveitamento da luz solar refletida em comparação com os modelos planos, em todas as refletâncias analisadas, sobretudo no caso do modelo com 90% (Tabela 17). Os ganhos resultantes do aumento da refletância difusa de 10% para 90% também foram superiores: os sistemas com brises côncavos ampliaram em 72% a eficiência.

No caso dos modelos especulares a variação da forma não representou ampliação dos ganhos diante do aumento da refletância, em comparação com os modelos planos: os brises côncavos proporcionaram aumento de 64%. Diante de altas refletâncias, 70% e 90%, os brises

planos especulares promoveram maior aproveitamento da luz solar refletida.

Figura 80 - Variação da eficiência da luz solar refletida (η_{sr}) diante do aumento da refletância difusa e especular. Modelos planos e côncavos



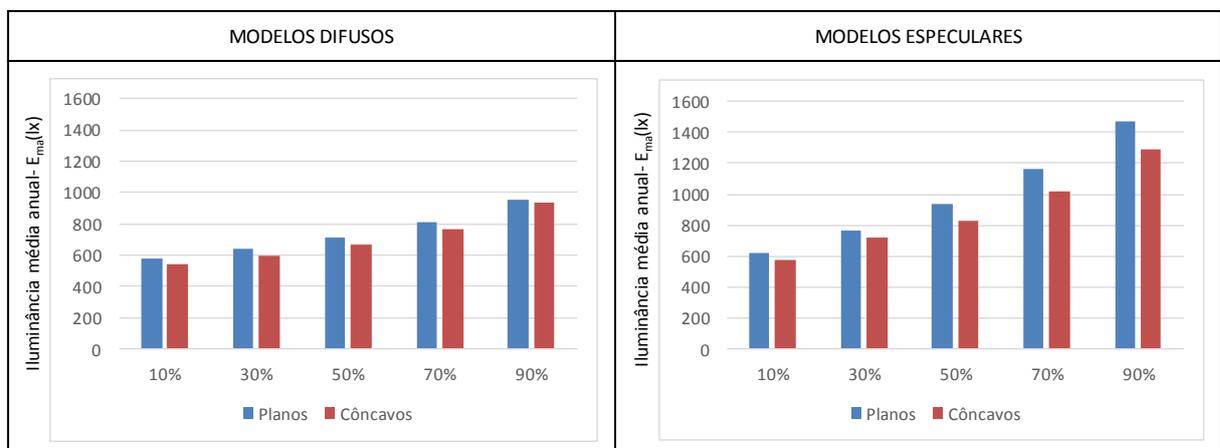
Fonte: Elaborado pela autora

Iluminância média anual (E_{ma}):

Apesar de o aproveitamento da luz solar refletida pelos modelos de dispositivos côncavos ter sido ampliado em comparação com os modelos planos, a variação da forma resultou em redução da iluminância média, conforme mostra o gráfico da Figura 81.

Em relação aos ganhos de E_{ma} com aumento da refletância de 10% para 90%, observou-se que os modelos planos difusos e especulares proporcionaram ganhos de 64% e 138%, respectivamente. Os modelos difusos côncavos apresentaram ganhos superiores, chegando a 72%, conforme mostra a Tabela 18.

Figura 81 - Variação da iluminância média anual (E_{ma}) diante do aumento da refletância difusa e especular. Modelos planos e côncavos



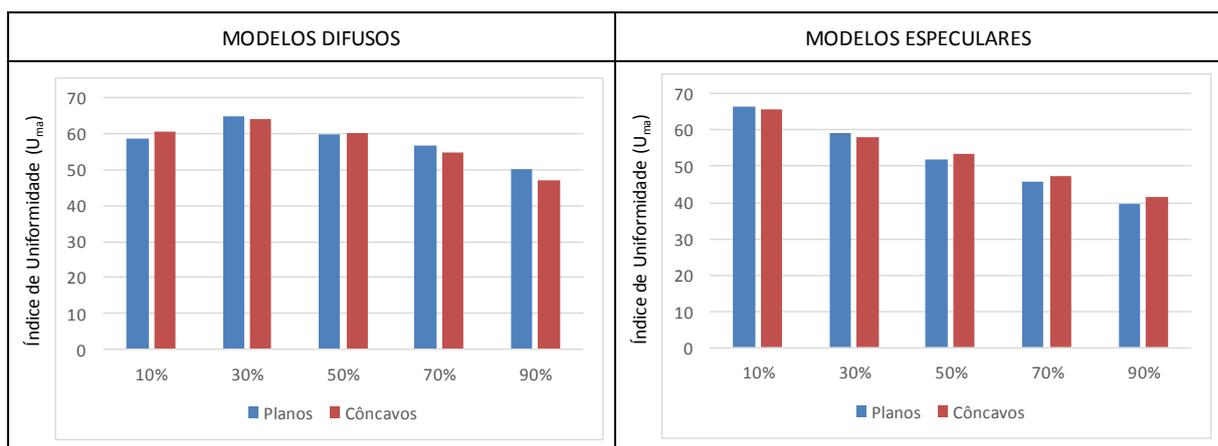
Fonte: Elaborado pela autora

Uniformidade média anual (U_{ma}):

Em relação à uniformidade, percebe-se que o comportamento do índice também segue o mesmo padrão observado no caso dos modelos planos: redução diante do aumento da refletância, conforme mostra o gráfico da Figura 82. Entre os modelos difusos, o desempenho dos dispositivos planos é superior em modelos com refletância acima de 30%, com maiores valores do índice. No caso dos modelos especulares, a variação da forma resultou em melhor distribuição da iluminância em modelos com refletância maior que 50% (ver Tabela 19).

O incremento de eficiência da luz solar refletida e iluminância média anual resultou em maior redução do índice de uniformidade em comparação com os modelos planos diante do aumento da refletância: os modelos difusos côncavos proporcionaram redução de 23% enquanto os planos reduziram a uniformidade em 14%.

Figura 82 - Variação da uniformidade (U_{ma}) diante do aumento da refletância difusa e especular. Modelos planos e côncavos



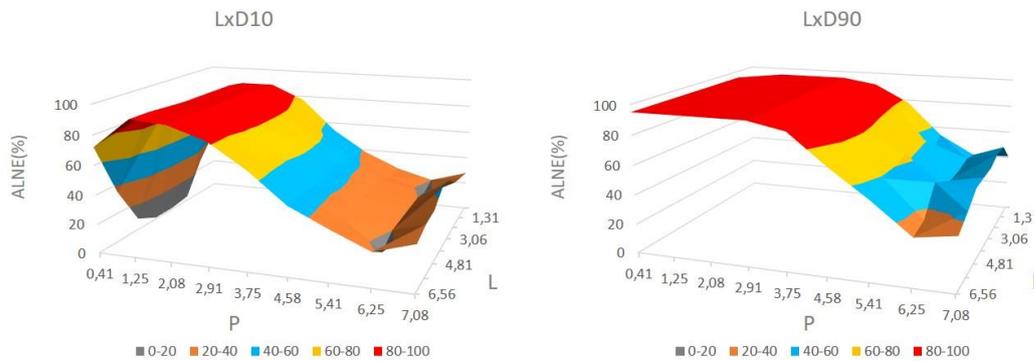
Fonte: Elaborado pela autora.

Autonomia de luz natural espacial ($ALNe_{500lx/50\%}$):

A variação da forma dos dispositivos de sombreamento resultou em redução da porcentagem de autonomia em todos os modelos analisados, consequência da redução da iluminância média dos ambientes, em comparação com os modelos planos.

Da mesma forma que foi observado na pesquisa, o aumento da refletância também resultou em ampliação da autonomia dos modelos côncavos. De modo geral, pode-se afirmar que o aumento da refletância entre os modelos difusos resultou em ampliação da autonomia em toda a área do ambiente, sobretudo na área mais próxima da abertura. Este mesmo comportamento foi observado no caso dos modelos planos. A Figura 83 compara a autonomia de ambientes com dispositivos difusos côncavos, com refletância de 10% e de 90%.

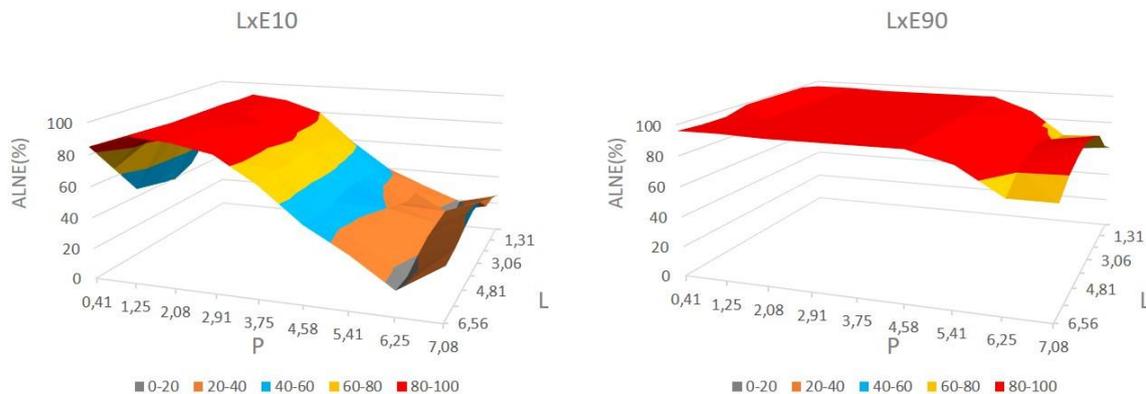
Figura 83 - Comparação entre a ALNe dos modelos LxD10 e LxD90. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

Entre os modelos especulares observa-se que o aumento da refletância resultou em maiores ganhos para a autonomia em toda a área do ambiente. A Figura 84 mostra a comparação entre modelos com brises côncavos especulares, com 10% e 90% de refletância.

Figura 84 - Comparação entre a ALNe dos modelos LxE10 e LxE90. P- profundidade do ambiente, L- largura do ambiente, em metros



Fonte: Elaborado pela autora

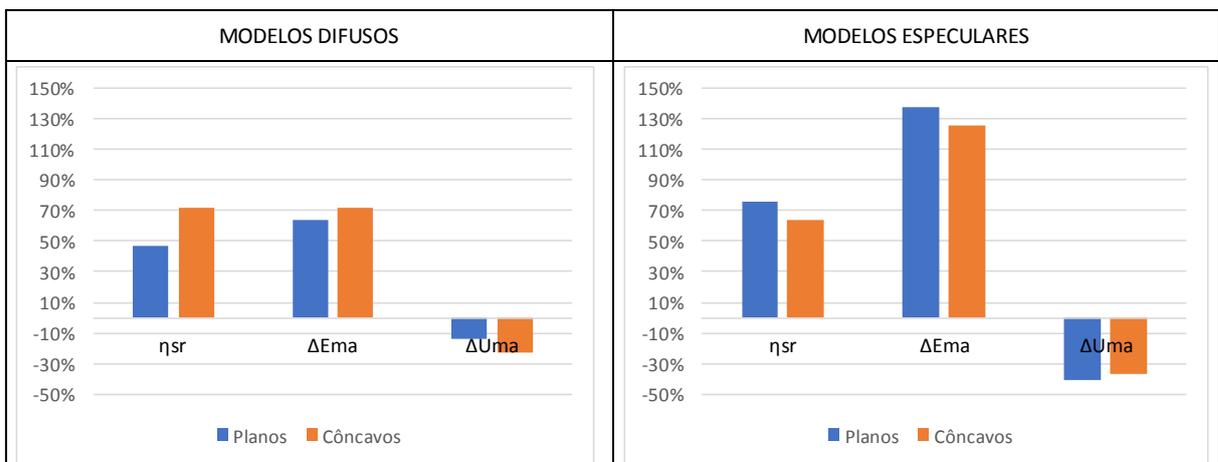
Conclusão:

Diante dos resultados analisados, pode-se afirmar que:

- Na maioria dos casos, a variação da forma dos brises resultou em maior aproveitamento da luz solar refletida, com maiores valores de eficiência. Em relação a este índice, os modelos com difusividade destacam-se por apresentarem maiores possibilidades de ampliação do índice diante do aumento da refletância, em comparação com os modelos planos;
- Os modelos côncavos difusos também se destacam por possibilitarem maiores variações de iluminância e uniformidade média anual;

- Os modelos côncavos especulares, por sua vez, apresentaram menores porcentagens de variação em comparação com aquelas observadas nos modelos planos, indicando uma possível relação entre a forma adotada e especularidade da superfície para o desempenho do sistema. O gráfico Figura 85 mostra as variações dos indicadores analisados proporcionadas pelo aumento da refletância de dispositivos planos e côncavos;

Figura 85 - Variações percentuais de η_{sr} , E_{ma} , e U_{ma} a partir do aumento da refletância. Modelos difusos e especulares



Fonte: Elaborado pela autora

- Levando em consideração os cenários analisados, a variação da forma dos brises contribui para um maior aproveitamento da luz solar no caso dos modelos difusos, sendo capaz de proporcionar maiores ganhos na eficiência da luz solar refletida em comparação com os brises planos.

Este estudo deve ser desenvolvido, uma vez que considerou apenas o parâmetro “refletância”, definindo uma única configuração de dispositivos e uma orientação, limitando os resultados encontrados. Sugere-se que a análise da forma seja complementada, levando em consideração outros formatos de brises, parâmetros de sistemas de dispositivos e orientações, já que o estudo aqui apresentado apontou sua influência para a variação dos indicadores utilizados na pesquisa.

Dados de simulação

Eficiência da luz solar refletida:

Tabela 17 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância. Forma côncava. Orientação Leste

LESTE CONVEXO										
MODELOS	LxD10	LxD30	LxD50	LxD70	LxD90	LxE10	LxE30	LxE50	LxE70	LxE90
Eficiência de luz solar refletida (%) - η_{sr}	19,5	21,9	24,6	27,5	33,6	21,4	28,1	29,7	32,5	35,1

Fonte: Elaborado pela autora

Iluminância média anual:

Tabela 18 – Iluminância média anual em relação ao aumento da refletância. Forma côncava. Orientação Leste

LESTE CÔNCAVO												
MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
	LxD10	LxD30	LxD50	LxD70	LxD90		LxE10	LxE30	LxE50	LxE70	LxE90	
$E_{ma (lx)}$	544,5	594,9	666,7	768,9	934,7	72%	572,6	715,6	828,9	1019	1292	126%

Fonte: Elaborado pela autora

Uniformidade média anual:

Tabela 19 – Uniformidade média anual em relação ao aumento da refletância. Forma côncava. Orientação Leste

LESTE CÔNCAVO												
MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
	LxD10	LxD30	LxD50	LxD70	LxD90		LxE10	LxE30	LxE50	LxE70	LxE90	
Uniformidade - U_{ma}	60,8	64,2	46,1	54,8	47,1	-23%	65,6	58	53,5	47,3	41,6	-37%

Fonte: Elaborado pela autora

Autonomia de luz natural espacial (%):

Tabela 20 - Porcentagens de autonomia de luz natural espacial. Forma côncava. Orientação Leste

SISTEMA x	
Difusos	Especulares
LxD10	LxE10
46	50
LxD50	LxE50
64	75
LxD90	LxE90
84	100

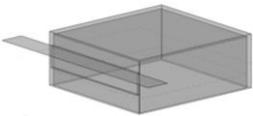
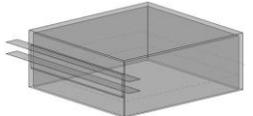
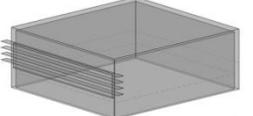
Fonte: Elaborado pela autora

APÊNDICE C – Dados de simulação

Dados de simulação do índice de eficiência da luz solar refletida para todos os modelos

Número de peças dos dispositivos

Tabela 21 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90% Orientação Norte

NORTE	SISTEMAS									
	MODELOS	NaD90	NaD45E45	NaE90	NbD90	NbD45E45	NbE90	NcD90	NcD45E45	NcE90
	η_{sr} (%)	26,6	29,5	31,9	29,0	32,3	35,5	29,6	34,6	40,7

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 22 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Norte

MODELOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
DIFUSOS	NaD10	NaD30	NaD50	NaD70	NbD10	NbD30	NbD50	NbD70	NcD10	NcD30	NcD50	NcD70
η_{sr} (%)	21,4	22,9	24,2	25,5	17,9	20,6	23,3	26,1	15,4	18,8	22,5	26,1

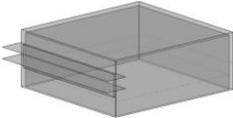
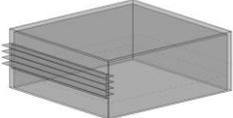
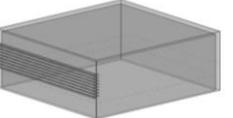
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 23 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Norte

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	NaE10	NaE30	NaE50	NaE70	NbE10	NbE30	NbE50	NbE70	NcE10	NcE30	NcE50	NcE70
η_{sr} (%)	22,3	25,2	27,7	30,0	20,7	23,4	27,6	31,6	16,6	22,9	29,2	35,2

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 24 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90% Orientação Leste

LESTE	SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
										
	MODELOS	LaD90	LaD45E45	LaE90	LbD90	LbD45E45	LbE90	LcD90	LcD45E45	LcE90
η_{sr} (%)		28,5	32,4	36,6	28,5	32,6	37,6	27,8	32,3	37,6

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 25- Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Leste

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	LaD10	LaD30	LaD50	LaD70	LbD10	LbD30	LbD50	LbD70	LcD10	LcD30	LcD50	LcD70
η_{sr} (%)	19,4	21,4	23,7	26,0	16,2	19,0	21,9	25,0	13,7	16,8	20,0	21,4

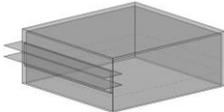
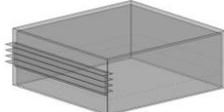
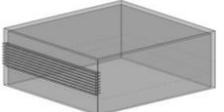
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 26 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Leste

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	LaE10	LaE30	LaE50	LaE70	LbE10	LbE30	LbE50	LbE70	LcE10	LcE30	LcE50	LcE70
η_{sr} (%)	20,8	25,2	29,3	32,8	17,9	23,2	28,0	32,7	15,6	21,5	27,0	32,4

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 27 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90% Orientação Oeste

OESTE	SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
										
	MODELOS	OaD90	OaD45E45	OaE90	ObD90	ObD45E45	ObE90	OcD90	OcD45E45	OcE90
	η_{sr} (%)	31,4	35,7	40,0	31,9	36,4	41,2	31,6	36,6	41,7

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 28 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Oeste

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	OaD10	OaD30	OaD50	OaD70	ObD10	ObD30	ObD50	ObD70	OcD10	OcD30	OcD50	OcD70
η_{sr} (%)	20,6	23,2	25,8	28,4	17,2	20,6	24,1	27,8	14,7	18,3	22,4	24,5

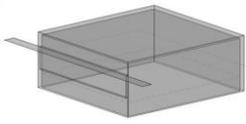
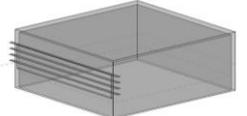
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 29 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Oeste

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	OaE10	OaE30	OaE50	OaE70	ObE10	ObE30	ObE50	ObE70	OcE10	OcE30	OcE50	OcE70
$\eta_{sr}(\%)$	22,4	27,6	32,2	36,1	19,4	25,9	31,5	36,7	17,2	24,7	31,2	36,8

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 30 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90% Orientação Sul

SUL	SISTEMAS	Sistema a			Sistema b			Sistema c		
										
	MODELOS	SaD90	SaD45E45	SaE90	SbD90	SbD45E45	SbE90	ScD90	ScD45E45	ScE90
$\eta_{sr}(\%)$		19,2	21,0	22,7	19,3	20,8	21,9	19,4	21,5	22,8

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 31 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Sul

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	SaD10	SaD30	SaD50	SaD70	SbD10	SbD30	SbD50	SbD70	ScD10	ScD30	ScD50	ScD70
$\eta_{sr}(\%)$	16,5	17,2	17,9	18,6	15,0	16,1	17,2	20,3	14,3	15,6	16,8	18,2

Fonte: Elaborado pela autora

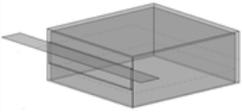
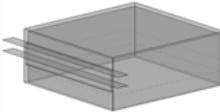
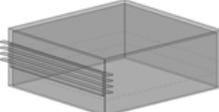
Tabela 32 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Sul

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c			
	SaE10	SaE30	SaE50	SaE70	SbE10	SbE30	SbE50	SbE70	ScE10	ScE30	ScE50	ScE70
η_{sr} (%)	17,0	21,0	20,1	21,4	15,4	17,1	18,7	20,3	14,7	16,6	18,8	20,9

Fonte: Elaborado pela autora

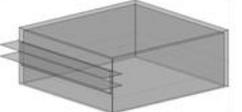
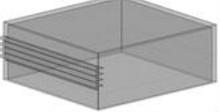
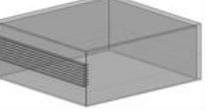
Especularidade dos dispositivos

Tabela 33 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade. Orientação Norte

NORTE	Sistema a					
						
	MODELOS	NaD90E0	NaD60E30	NaD45E45	NaD30E60	NaD0E90
	η_{sr} (%)	26,6	28,6	29,5	30,3	31,9
	Sistema b					
						
	MODELOS	NbD90E0	NbD60E30	NbD45E45	NbD30E60	NbD0E90
	η_{sr} (%)	29,0	31,1	32,3	33,1	35,5
	Sistema c					
						
	MODELOS	NcD90E0	NcD60E30	NcD45E45	NcD30E60	NcD0E90
	η_{sr} (%)	29,6	32,8	34,6	36,4	40,7

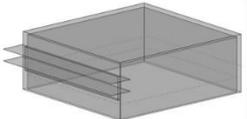
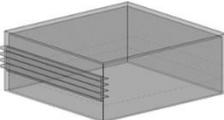
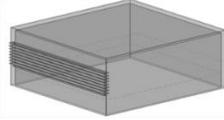
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 34- Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade. Orientação Leste

LESTE	Sistema a					
						
	MODELOS	LaD90E0	LaD60E30	LaD45E45	LaD30E60	LaD0E90
	η_{sr} (%)	28,5	31,8	32,4	33,9	36,6
	Sistema b					
						
	MODELOS	LbD90E0	LbD60E30	LbD45E45	LbD30E60	LbD0E90
	η_{sr} (%)	28,5	31,1	32,6	34,0	37,6
	Sistema c					
						
	MODELOS	LcD90E0	LcD60E30	LcD45E45	LcD30E60	LcD0E90
	η_{sr} (%)	27,8	30,6	32,3	33,8	37,6

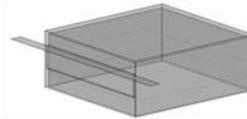
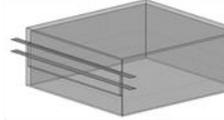
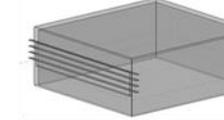
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 35 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade. Orientação Oeste

OESTE	Sistema a					
						
	MODELOS	OaD90E0	OaD60E30	OaD45E45	OaD30E60	OaD0E90
	η_{sr} (%)	31,4	34,3	35,7	37,0	40,0
	Sistema b					
						
	MODELOS	ObD90E0	ObD60E30	ObD45E45	ObD30E60	ObD0E90
	η_{sr} (%)	31,9	34,7	36,4	37,9	41,2
	Sistema c					
						
	MODELOS	OcD90E0	OcD60E30	OcD45E45	OcD30E60	OcD0E90
	η_{sr} (%)	31,6	34,7	36,6	38,3	41,7

Fonte: Elaborado pela autora.

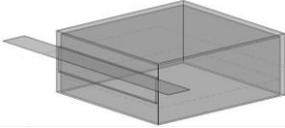
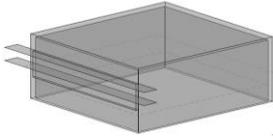
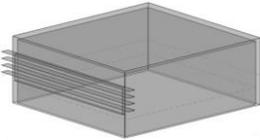
Tabela 36- Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da especularidade. Orientação Sul

SUL	Sistema a					
						
	MODELOS	SaD90E0	SaD60E30	SaD45E45	SaD30E60	SaD0E90
	η_{sr} (%)	19,2	20,5	21,0	15,1	22,7
	Sistema b					
						
	MODELOS	SbD90E0	SbD60E30	SbD45E45	SbD30E60	SbD0E90
	η_{sr} (%)	19,3	20,5	20,8	21,3	21,9
	Sistema c					
						
	MODELOS	ScD90E0	ScD60E30	ScD45E45	ScD30E60	ScD0E90
	η_{sr} (%)	19,4	20,8	21,5	21,9	22,8

Fonte: Elaborado pela autora.

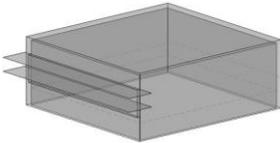
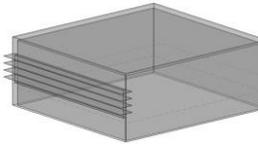
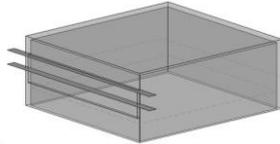
Refletância dos dispositivos

Tabela 37 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Norte

NORTE											
Sistema a											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		NaD10	NaD30	NaD50	NaD70	NaD90	NaE10	NaE30	NaE50	NaE70	NaE90
η_{sr} (%)	21,4	22,9	24,2	25,5	26,6	22,3	25,2	27,7	30,0	31,9	
Sistema b											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		NbD10	NbD30	NbD50	NbD70	NbD90	NbE10	NbE30	NbE50	NbE70	NbE90
η_{sr} (%)	17,9	20,6	23,3	26,1	28,9	20,7	23,4	27,6	31,6	35,5	
Sistema c											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		NcD10	NcD30	NcD50	NcD70	NcD90	NcE10	NcE30	NcE50	NcE70	NcE90
η_{sr} (%)	15,4	18,8	22,5	26,1	29,6	16,6	22,9	29,2	35,2	40,7	

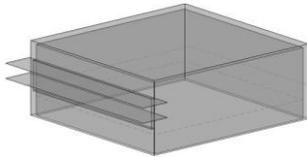
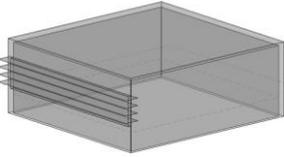
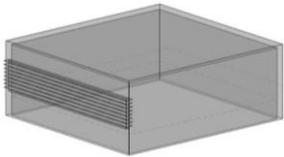
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 38 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Leste

LESTE											
Sistema a											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
	η_{sr} (%)	LaD10	LaD30	LaD50	LaD70	LaD90	LaE10	LaE30	LaE50	LaE70	LaE90
		19,4	21,4	23,7	26,0	28,5	20,8	25,2	29,3	32,8	
Sistema b											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
	η_{sr} (%)	LbD10	LbD30	LbD50	LbD70	LbD90	LbE10	LbE30	LbE50	LbE70	LbE90
		16,2	19,0	21,9	25,0	28,5	17,9	23,2	28,0	32,7	
Sistema c											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
	η_{sr} (%)	LcD10	LcD30	LcD50	LcD70	LcD90	LcE10	LcE30	LcE50	LcE70	LcE90
		13,7	16,8	20,0	21,4	27,8	15,6	21,5	27,0	32,4	

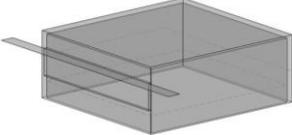
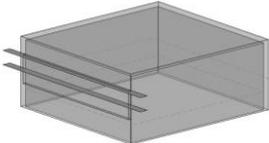
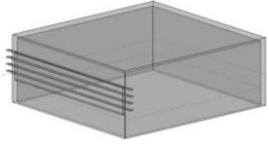
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 39 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste

OESTE											
Sistema a											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		OaD10	OaD30	OaD50	OaD70	OaD90	OaE10	OaE30	OaE50	OaE70	OaE90
η_{sr} (%)	20,6	23,2	25,8	28,4	31,4	22,4	27,6	32,2	36,1	40,0	
Sistema b											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		ObD10	ObD30	ObD50	ObD70	ObD90	ObE10	ObE30	ObE50	ObE70	ObE90
η_{sr} (%)	17,2	20,6	24,1	27,8	31,9	19,4	25,9	31,5	36,7	41,2	
Sistema c											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		OcD10	OcD30	OcD50	OcD70	OcD90	OcE10	OcE30	OcE50	OcE70	OcE90
η_{sr} (%)	14,7	18,3	22,4	24,5	31,6	17,2	24,7	31,2	36,8	41,7	

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 40 - Eficiência da luz solar refletida em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Sul

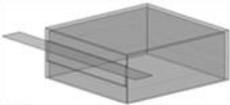
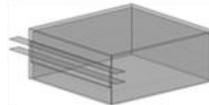
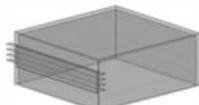
SUL											
Sistema a											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		SaD10	SaD30	SaD50	SaD70	SaD90	SaE10	SaE30	SaE50	SaE70	SaE90
η_{sr} (%)	16,5	17,2	17,9	18,6	19,2	17,0	21,0	20,1	21,4	22,7	
Sistema b											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		SbD10	SbD30	SbD50	SbD70	SbD90	SbE10	SbE30	SbE50	SbE70	SbE90
η_{sr} (%)	15,0	16,1	17,2	20,3	19,3	15,4	17,1	18,7	20,3	21,9	
Sistema c											
	MODELOS	DIFUSOS					ESPECULARES				
		ScD10	ScD30	ScD50	ScD70	ScD90	ScE10	ScE30	ScE50	ScE70	ScE90
η_{sr} (%)	14,3	15,6	16,8	18,2	19,4	14,7	16,6	18,8	20,9	22,8	

Fonte: Elaborado pela autora

Dados de simulação da iluminância média anual (E_{ma}) para todos os modelos

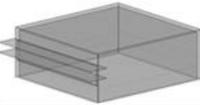
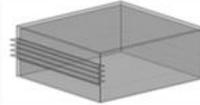
Número de peças dos dispositivos

Tabela 41- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Norte

NORTE	Sistema a				
		MODELOS	NaD90	NaD45E45	NaE90
		E_{ma} (lx)	1086,9	1167,8	1249,6
	Sistema b				
		MODELOS	NbD90	NbD45E45	NbE90
		E_{ma} (lx)	1243,2	1415,9	1623,6
	ΔE_{ma} (sistema a e b)		14,4%	21,2%	29,9%
	Sistema c				
		MODELOS	NcD90	NcD45E45	NcE90
		E_{ma} (lx)	1308,2	1585	2005,8
ΔE_{ma} (sistema a e c)		20,4%	35,7%	60,5%	

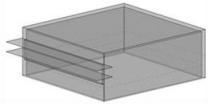
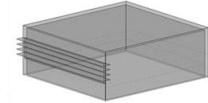
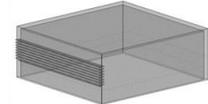
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 42 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Leste

LESTE	Sistema a				
		MODELOS	LaD90	LaD45E45	LaE90
		E_{ma} (lx)	953,6	1164,2	1473,2
	Sistema b				
		MODELOS	LbD90	LaD45E45	NaE90
		E_{ma} (lx)	996	1164,2	1249,6
	ΔE_{ma} (sistema a e b)		4,4%	9,9%	18,4%
	Sistema c				
		MODELOS	LcD90	LcD45E45	LcE90
		E_{ma} (lx)	1191,1	1357,4	1913,7
ΔE_{ma} (sistema a e c)		24,9%	16,6%	29,9%	

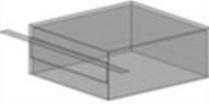
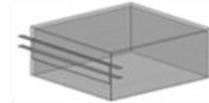
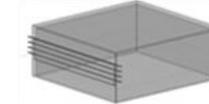
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 43- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Oeste

OESTE	Sistema a		MODELOS	OaD90	OaD45E45	OaE90
		E_{ma} (lx)	954,7	1177,9	1497,9	
		Sistema b		MODELOS	ObD90	ObD45E45
	E_{ma} (lx)		999	1302,3	1791,4	
	ΔE_{ma} (sistema a e b)		4,0%	10,5%	19,6%	
	Sistema c		MODELOS	OcD90	OcD45E45	OcE90
		E_{ma} (lx)	1027,8	1389,2	1972,2	
		ΔE_{ma} (sistema a e c)	7,6%	18,0%	31,0%	

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 44 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Sul

SUL	Sistema a		MODELOS	SaD90	SaD45E45	SaE90
		E_{ma} (lx)	1232	1277,5	1323,8	
		Sistema b		MODELOS	SbD90	SbD45E45
	E_{ma} (lx)		1271,3	1350,3	1429,4	
	ΔE_{ma} (sistema a e b)		3,2%	5,7%	8,0%	
	Sistema c		MODELOS	ScD90	ScD45E45	ScE90
		E_{ma} (lx)	1287,8	1405,8	1529,4	
		ΔE_{ma} (sistema a e c)	4,5%	10,0%	15,5%	

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 45 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Norte

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	NaD10	NaD30	NaD50	NaD70	NbD10	NbD30	NbD50	NbD70	NcD10	ΔE_{ma}	NcD30	ΔE_{ma}	NcD50	ΔE_{ma}	NcD70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	919	962	1002	1045	837	909	996	1103	787	-14%	870	-10%	978	-2%	1124	8%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 46 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Norte

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	NaE10	NaE30	NaE50	NaE70	NbE10	NbE30	NbE50	NbE70	NcE10	ΔE_{ma}	NcE30	ΔE_{ma}	NcE50	ΔE_{ma}	NcE70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	937	1017	1092	1172	900	1018	1184	1381	830	-11%	1023	1%	1275	17%	1597	36%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 47 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Leste

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	LaD10	LaD30	LaD50	LaD70	LbD10	LbD30	LbD50	LbD70	LcD10	ΔE_{ma}	LcD30	ΔE_{ma}	LcD50	ΔE_{ma}	LcD70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	581	637	710	806	522	583	667	792	501	-14%	562	-12%	649	-9%	748	-7%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 48 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Leste

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	LaE10	LaE30	LaE50	LaE70	LbE10	LbE30	LbE50	LbE70	LcE10	ΔE_{ma}	LcE30	ΔE_{ma}	LcE50	ΔE_{ma}	LcE70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	619	765	941	1166	569	740	966	1281	549	-11%	735	-4%	992	5%	1363	6%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 49 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Oeste

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	OaD10	OaD30	OaD50	OaD70	ObD10	ObD30	ObD50	ObD70	OcD10	ΔE_{ma}	OcD30	ΔE_{ma}	OcD50	ΔE_{ma}	OcD70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	565	625	700	800	504	568	656	788	480	-15%	544	-13%	638	-9%	660	-17%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 50 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Oeste

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	OaE10	OaE30	OaE50	OaE70	ObE10	ObE30	ObE50	ObE70	OcE10	ΔE_{ma}	OcE30	ΔE_{ma}	OcE50	ΔE_{ma}	OcE70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	607	757	945	1178	553	734	974	1306	531	-12%	729	-4%	1006	6%	1392	18%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 51 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Sul

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	SaD10	SaD30	SaD50	SaD70	SbD10	SbD30	SbD50	SbD70	ScD10	ΔE_{ma}	ScD30	ΔE_{ma}	ScD50	ΔE_{ma}	ScD70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	1136	1159	1183	1208	1073	1116	1165	1339	1028	-9%	1078	-7%	1142	-3%	1209	0%

Fonte: Elaborado pela autora

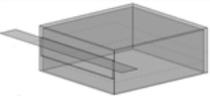
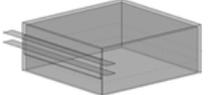
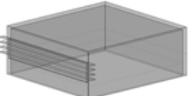
Tabela 52 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Sul

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	SaE10	SaE30	SaE50	SaE70	SbE10	SbE30	SbE50	SbE70	ScE10	ΔE_{ma}	ScE30	ΔE_{ma}	ScE50	ΔE_{ma}	ScE70	ΔE_{ma}
E_{ma} (lx)	1147	1205	1236	1281	1092	1170	1253	1339	1053	-8%	1152	-4%	1266	2%	1392	9%

Fonte: Elaborado pela autora

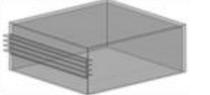
Especificidade dos dispositivos

Tabela 53- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especificidade dos dispositivos. Orientação Norte

NORTE	Sistema a	MODELOS						
			NaD90E0	NaD60E30	NaD45E45	NaD30E60	NaD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1086,9	1140	1167,8	1195,1	1249,6	15%
	Sistema b	MODELOS						
			NbD90E0	NbD60E30	NbD45E45	NbD30E60	NbD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1243,2	1351	1415,9	1468,2	1623,6	31%
	Sistema c	MODELOS						
			NcD90E0	NcD60E30	NcD45E45	NcD30E60	NcD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1308,2	1480,1	1585	1706,3	2005,8	53%

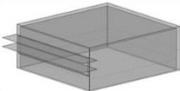
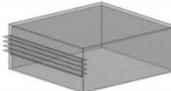
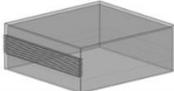
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 54 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especificidade dos dispositivos. Orientação Leste

LESTE	Sistema a	MODELOS						
			LaD90E0	LaD60E30	LaD45E45	LaD30E60	LaD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	953,6	1098,2	1164,2	1250,3	1473,2	54%
	Sistema b	MODELOS						
			LbD90E0	LbD60E30	LbD45E45	LbD30E60	LbD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	996	1174,4	1279,9	1401,5	1744,5	75%
	Sistema c	MODELOS						
			LcD90E0	LcD60E30	LcD45E45	LcD30E60	LcD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1016,8	1226,4	1357,4	1495,3	1913,7	88%

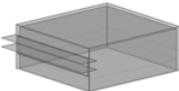
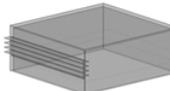
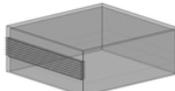
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 55- Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade dos dispositivos. Orientação Oeste.

OESTE	Sistema a	MODELOS						
			OaD90E0	OaD60E30	OaD45E45	OaD30E60	OaD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	954,7	1095	1177,9	1264	1497,9	57%
	Sistema b	MODELOS						
			ObD90E0	ObD60E30	ObD45E45	ObD30E60	ObD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	999	1187	1302,3	1431	1791,4	79%
	Sistema c	MODELOS						
			OcD90E0	OcD60E30	OcD45E45	OcD30E60	OcD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1027,8	1249	1389,2	1543	1972,2	92%

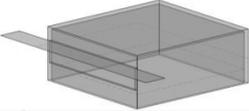
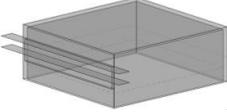
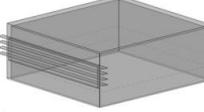
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 56 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade dos dispositivos. Orientação Sul.

SUL	Sistema a	MODELOS						
			SaD90E0	SaD60E30	SaD45E45	SaD30E60	SaD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1232	1261,2	1277,5	1052,7	1323,8	7%
	Sistema b	MODELOS						
			SbD90E0	SbD60E30	SbD45E45	SbD30E60	SbD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1271,3	1327,2	1350,3	1382,7	1429,4	12%
	Sistema c	MODELOS						
			ScD90E0	ScD60E30	ScD45E45	ScD30E60	ScD0E90	ΔE_{ma} (entre difuso e especular)
		E_{ma} (lx)	1287,8	1361,5	1405,8	1443,8	1529,4	19%

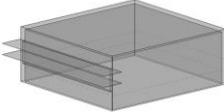
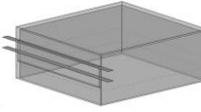
Refletância dos dispositivos

Tabela 57 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Norte

NORTE													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		NaD10	NaD30	NaD50	NaD70	NaD90		NaE10	NaE30	NaE50	NaE70	NaE90	
	E_{ma} (lx)	918,6	962,1	1002	1045	1087	18%	936,9	1017	1092	1172	1412	51%
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		NbD10	NbD30	NbD50	NbD70	NbD90		NbE10	NbE30	NbE50	NbE70	NbE90	
	E_{ma} (lx)	837,3	909,2	995,6	1103	1237	48%	900,3	1018	1184	1381	1624	80%
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		NcD10	NcD30	NcD50	NcD70	NcD90		NcE10	NcE30	NcE50	NcE70	NcE90	
	E_{ma} (lx)	786,5	869,8	978,2	1124	1308	66%	829,7	1023	1275	1597	2006	142%

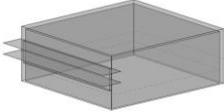
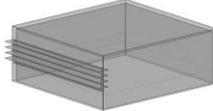
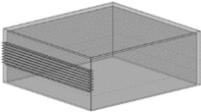
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 58 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Leste

LESTE													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		LaD10	LaD30	LaD50	LaD70	LaD90		LaE10	LaE30	LaE50	LaE70	LaE90	
	E_{ma} (lx)	580,7	637,2	709,6	806,3	953,6	64%	619,2	764,9	941,1	1166	1473	138%
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		LbD10	LbD30	LbD50	LbD70	LbD90		LbE10	LbE30	LbE50	LbE70	LbE90	
	E_{ma} (lx)	522	583,4	667,1	792,3	996	91%	568,7	739,8	965,9	1281,1	1744,5	207%
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		LcD10	LcD30	LcD50	LcD70	LcD90		LcE10	LcE30	LcE50	LcE70	LcE90	
	E_{ma} (lx)	500,7	561,5	648,7	656,6	1017	103%	548,6	735	992,1	1363	1914	249%

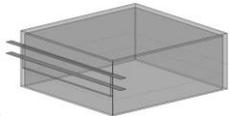
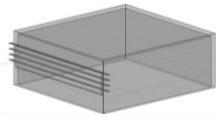
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 59 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste

OESTE													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		OaD10	OaD30	OaD50	OaD70	OaD90		OaE10	OaE30	OaE50	OaE70	OaE90	
$E_{ma (lx)}$	565,2	625	700	800	954,7	69%	607	757	945	1178	1498	147%	
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		ObD10	ObD30	ObD50	ObD70	ObD90		ObE10	ObE30	ObE50	ObE70	ObE90	
$E_{ma (lx)}$	504	568	656	788	999	98%	553	734	974	1306	1791	224%	
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		OcD10	OcD30	OcD50	OcD70	OcD90		OcE10	OcE30	OcE50	OcE70	OcE90	
$E_{ma (lx)}$	480	544	638	660	1028	114%	531	729	1006	1392	1972	271%	

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 60 - Iluminância média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Sul

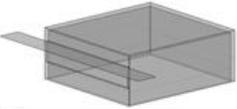
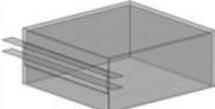
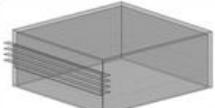
SUL													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		SaD10	SaD30	SaD50	SaD70	SaD90		SaE10	SaE30	SaE50	SaE70	SaE90	
	E_{ma} (lx)	1136	1159	1183	1208	1232	8%	1147	1205	1236	1281	1324	15%
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		SbD10	SbD30	SbD50	SbD70	SbD90		SbE10	SbE30	SbE50	SbE70	SbE90	
	E_{ma} (lx)	1073	1116	1165	1339	1271	18%	1092	1170	1253	1339	1429	31%
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔE_{ma} (entre 10% e 90%)
		ScD10	ScD30	ScD50	ScD70	ScD90		ScE10	ScE30	ScE50	ScE70	ScE90	
	E_{ma} (lx)	1028	1078	1142	1209	1288	25%	1053	1152	1266	1392	1529	45%

Fonte: Elaborado pela autora

Dados de simulação da uniformidade média anual (U_{ma}) para todos os modelos

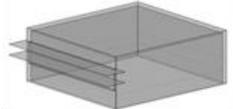
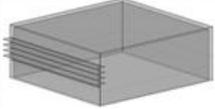
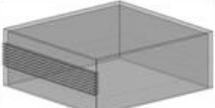
Número de peças dos dispositivos

Tabela 61 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Norte

NORTE	Sistema a		MODELOS	NaD90	NaD45E45	NaE90
		U_{ma} (lx)	45,2	43,3	42,1	
		Sistema b		MODELOS	NbD90	NbD45E45
	U_{ma} (lx)		43,4	40,6	36,7	
	ΔU_{ma} (sistema a e b)		-4,0%	-6,2%	-12,8%	
	Sistema c		MODELOS	NcD90	NcD45E45	NcE90
		U_{ma} (lx)	43,1	36,2	31,8	
		ΔU_{ma} (sistema a e c)	-4,6%	-16,4%	-24,5%	

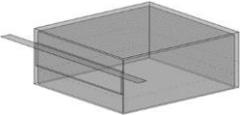
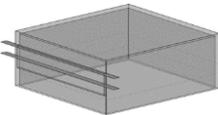
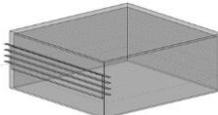
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 62- Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Leste

LESTE	Sistema a		MODELOS	LaD90	LaD45E45	LaE90
		U_{ma} (lx)	50,2	44,8	39,5	
		Sistema b		MODELOS	LbD90	LbD45E45
	U_{ma} (lx)		52,1	45,1	37,2	
	ΔU_{ma} (sistema a e b)		3,8%	0,7%	-5,8%	
	Sistema c		MODELOS	LcD90	LcD45E45	LcE90
		U_{ma} (lx)	51,4	42,9	34	
		ΔU_{ma} (sistema a e c)	2,4%	-4,2%	-13,9%	

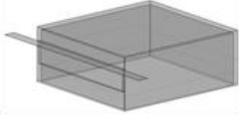
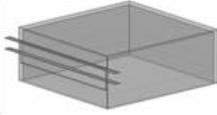
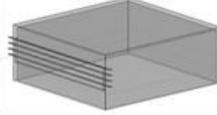
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 63 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Oeste

OESTE	Sistema a		MODELOS	OaD90	OaD45E45	OaE90
		U_{ma} (lx)	49	43,8	37,4	
	Sistema b		MODELOS	ObD90	ObD45E45	ObE90
		U_{ma} (lx)	49,8	43	35,2	
	ΔU_{ma} (sistema a e b)		2,0%	-2,0%	-6,0%	
	Sistema c		MODELOS	OcD90	OcD45E45	OcE90
		U_{ma} (lx)	47,9	40,6	32,6	
ΔU_{ma} (sistema a e c)		-2,0%	-7,0%	-13,0%		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 64- Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância 90%. Orientação Sul

SUL	Sistema a		MODELOS	SaD90	SaD45E45	SaE90
		U_{ma} (lx)	40,6	39,8	39,1	
	Sistema b		MODELOS	SbD90	SbD45E45	SbE90
		U_{ma} (lx)	40,3	39,1	38,1	
	ΔU_{ma} (sistema a e b)		-0,7%	-1,8%	-2,6%	
	Sistema c		MODELOS	ScD90	ScD45E45	ScE90
		U_{ma} (lx)	40,5	38,7	36,6	
ΔU_{ma} (sistema a e c)		-0,2%	-2,8%	-6,4%		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 65 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Norte

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	NaD10	NaD30	NaD50	NaD70	NbD10	NbD30	NbD50	NbD70	NcD10	ΔU_{ma}	NcD30	ΔU_{ma}	NcD50	ΔU_{ma}	NcD70	ΔU_{ma}
U_{ma}	51,3	50,7	47,6	47	55,6	51,4	49,3	47,3	59,7	16%	54,6	8%	51,4	8%	47,6	1%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 66 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Norte

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	NaE10	NaE30	NaE50	NaE70	NbE10	NbE30	NbE50	NbE70	NcE10	ΔU_{ma}	NcE30	ΔU_{ma}	NcE50	ΔU_{ma}	NcE70	ΔU_{ma}
U_{ma}	50,4	47,9	44,9	43,8	44	50,3	44,7	40,8	57,4	13%	49,9	4%	42,5	-5%	36,9	-15%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 67 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Leste

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	LaD10	LaD30	LaD50	LaD70	LbD10	LbD30	LbD50	LbD70	LcD10	ΔU_{ma}	LcD30	ΔU_{ma}	LcD50	ΔU_{ma}	LcD70	ΔU_{ma}
U_{ma}	58,6	65	59,7	56,7	47,3	71,6	68	60,5	39,3	-33%	63,5	-2%	66,9	12%	59,7	5%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 68 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Leste

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔU_{ma} - sistema a e c)							
	LaE10	LaE30	LaE50	LaE70	LbE10	LbE30	LbE50	LbE70	LcE10	ΔU_{ma}	LcE30	ΔU_{ma}	LcE50	ΔU_{ma}	LcE70	ΔU_{ma}
U_{ma}	66,4	59,3	51,9	45,7	57	65,2	53,9	44,1	47,7	-28%	63,8	7%	53,1	2%	43,5	-1%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 69 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Oeste

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔU_{ma} - sistema a e c)							
	OaD10	OaD30	OaD50	OaD70	ObD10	ObD30	ObD50	ObD70	OcD10	ΔU_{ma}	OcD30	ΔU_{ma}	OcD50	ΔU_{ma}	OcD70	ΔU_{ma}
U_{ma}	60,1	65	58,7	55,2	48,7	72,2	65,4	56,9	42,2	-30%	65,7	1%	65,1	1%	55,8	1%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 70 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Oeste

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔU_{ma} - sistema a e c)							
	OaE10	OaE30	OaE50	OaE70	ObE10	ObE30	ObE50	ObE70	OcE10	ΔU_{ma}	OcE30	ΔU_{ma}	OcE50	ΔU_{ma}	OcE70	ΔU_{ma}
U_{ma}	65,4	57,2	48,3	44,3	59,4	61,1	52,1	42,6	50,1	-23%	59,9	5%	49,9	3%	41,5	-6%

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 71 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância difusa entre 10% e 70%. Orientação Sul

MODELOS DIFUSOS	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	SaD10	SaD30	SaD50	SaD70	SbD10	SbD30	SbD50	SbD70	ScD10	ΔU_{ma}	ScD30	ΔU_{ma}	ScD50	ΔU_{ma}	ScD70	ΔU_{ma}
U_{ma}	43	42,1	41,2	40,6	44,7	44	42,9	38,6	46,8	9%	45	7%	44,2	7%	42,3	4%

Fonte: Elaborado pela autora

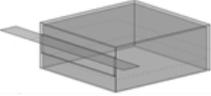
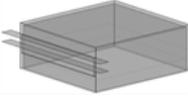
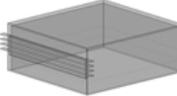
Tabela 72 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento no número de peças. Refletância especular entre 10% e 70%. Orientação Sul

MODELOS ESPEC.	Sistema a				Sistema b				Sistema c (ΔE_{ma} - sistema a e c)							
	SaE10	SaE30	SaE50	SaE70	SbE10	SbE30	SbE50	SbE70	ScE10	ΔU_{ma}	ScE30	ΔU_{ma}	ScE50	ΔU_{ma}	ScE70	ΔU_{ma}
U_{ma}	42,7	46,9	39,8	39,5	44,4	43,1	40,8	38,6	45,6	7%	43,7	-7%	41,1	3%	38,1	-4%

Fonte: Elaborado pela autora

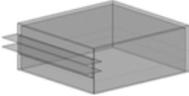
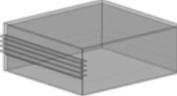
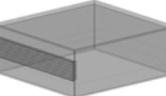
Especificidade dos dispositivos

Tabela 73 – Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Norte

NORTE	Sistema a	MODELOS						
			NaD90E0	NaD60E30	NaD45E45	NaD30E60	NaD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)
		U_{ma}	45,2	43,9	43,3	42,4	42,1	-7%
	Sistema b	MODELOS						
			NbD90E0	NbD60E30	NbD45E45	NbD30E60	NbD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)
		U_{ma}	43,4	41,5	40,9	39,3	36,7	-15%
	Sistema c	MODELOS						
			NcD90E0	NcD60E30	NcD45E45	NcD30E60	NcD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)
		U_{ma}	43,1	39,1	36,2	35,7	31,8	-26%

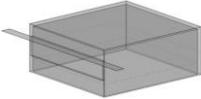
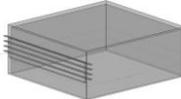
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 74 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Leste

LESTE	Sistema a	MODELOS						
			LaD90E0	LaD60E30	LaD45E45	LaD30E60	LaD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)
		U_{ma}	50,2	47,4	44,8	43,7	39,5	-21%
	Sistema b	MODELOS						
			LbD90E0	LbD60E30	LbD45E45	LbD30E60	LbD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)
		U_{ma}	52,1	47,3	45	42,3	37,2	-29%
	Sistema c	MODELOS						
			LcD90E0	LcD60E30	LcD45E45	LcD30E60	LcD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)
		U_{ma}	51,4	46,5	43,2	40,2	34	-34%

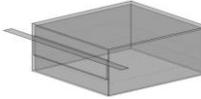
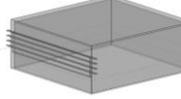
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 75 – Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Oeste

OESTE	Sistema a	MODELOS						
		OaD90E0	OaD60E30	OaD45E45	OaD30E60	OaD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)	
		U_{ma}	49	46,6	43,8	41,7	37,4	-24%
	Sistema b	MODELOS						
		ObD90E0	ObD60E30	ObD45E45	ObD30E60	ObD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)	
		U_{ma}	49,8	46,3	43	40,4	35,2	-29%
	Sistema c	MODELOS						
		OcD90E0	OcD60E30	OcD45E45	OcD30E60	OcD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)	
		U_{ma}	47,9	44,1	40,6	38,1	32,6	-32%

Fonte: Elaborado pela autora

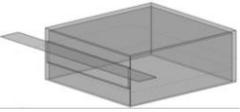
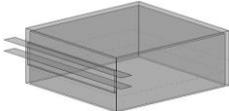
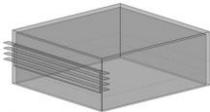
Tabela 76 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da especularidade. Orientação Sul

SUL	Sistema a	MODELOS						
		SaD90E0	SaD60E30	SaD45E45	SaD30E60	SaD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)	
		U_{ma}	40,6	40,2	39,9	37,6	39,1	-4%
	Sistema b	MODELOS						
		SbD90E0	SbD60E30	SbD45E45	SbD30E60	SbD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)	
		U_{ma}	40,3	39,5	40	38,7	38,1	-5%
	Sistema c	MODELOS						
		ScD90E0	ScD60E30	ScD45E45	ScD30E60	ScD0E90	ΔU_{ma} (entre difuso e especular)	
		U_{ma}	40,5	38,8	38,9	38,1	36,6	-10%

Fonte: Elaborado pela autora

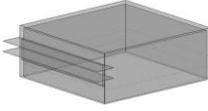
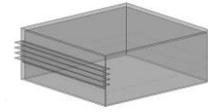
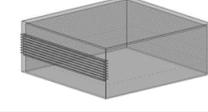
Refletância dos dispositivos

Tabela 77 – Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Norte

NORTE													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		NaD10	NaD30	NaD50	NaD70	NaD90		NaE10	NaE30	NaE50	NaE70	NaE90	
	Uniformidade - U_{ma}	51,3	50,7	47,6	47	45,2	-12%	50,4	47,9	44,9	43,8	42,1	-16%
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		NbD10	NbD30	NbD50	NbD70	NbD90		NbE10	NbE30	NbE50	NbE70	NbE90	
	Uniformidade - U_{ma}	55,6	51,4	49,3	47,3	43,4	-22%	44	50,3	44,7	40,8	36,7	-17%
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		NcD10	NcD30	NcD50	NcD70	NcD90		NcE10	NcE30	NcE50	NcE70	NcE90	
	Uniformidade - U_{ma}	59,7	54,6	51,4	47,6	43,1	-28%	57,4	49,9	42,5	36,9	31,8	-45%

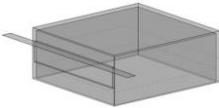
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 78 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Leste

LESTE													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		LaD10	LaD30	LaD50	LaD70	LaD90		LaE10	LaE30	LaE50	LaE70	LaE90	
Uniformidade - U_{ma}	58,6	65	59,7	56,7	50,2	-14%	66,4	59,3	51,9	45,7	39,5	-41%	
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		LbD10	LbD30	LbD50	LbD70	LbD90		LbE10	LbE30	LbE50	LbE70	LbE90	
Uniformidade - U_{ma}	47,3	71,6	68	60,5	52,1	10%	57	65,2	53,9	44,1	37,2	-35%	
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		LcD10	LcD30	LcD50	LcD70	LcD90		LcE10	LcE30	LcE50	LcE70	LcE90	
Uniformidade - U_{ma}	39,3	63,5	66,9	59,7	51,4	31%	47,7	63,8	53,1	43,5	34	-29%	

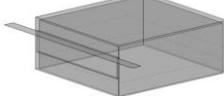
Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 79 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Oeste

OESTE													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		OaD10	OaD30	OaD50	OaD70	OaD90		OaE10	OaE30	OaE50	OaE70	OaE90	
Uniformidade - U_{ma}	60,1	65	58,7	55,2	49	-18%	65,4	57,2	48,3	44,3	37,4	-43%	
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		ObD10	ObD30	ObD50	ObD70	ObD90		ObE10	ObE30	ObE50	ObE70	ObE90	
Uniformidade - U_{ma}	48,7	72,2	65,4	56,9	49,8	2%	59,4	61,1	52,1	42,6	35,2	-41%	
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		OcD10	OcD30	OcD50	OcD70	OcD90		OcE10	OcE30	OcE50	OcE70	OcE90	
Uniformidade - U_{ma}	42,2	65,7	65,1	55,8	47,9	14%	50,1	59,9	49,9	41,5	32,6	-35%	

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 80 - Uniformidade média anual e sua variação em relação ao aumento da refletância dos dispositivos. Orientação Sul

SUL													
SISTEMA a													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		SaD10	SaD30	SaD50	SaD70	SaD90		SaE10	SaE30	SaE50	SaE70	SaE90	
Uniformidade - U_{ma}	43	42,1	41,2	40,6	42,7	-1%	42,7	46,9	39,8	39,5	39,1	-8%	
SISTEMA b													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		SbD10	SbD30	SbD50	SbD70	SbD90		SbE10	SbE30	SbE50	SbE70	SbE90	
Uniformidade - U_{ma}	44,7	44	42,9	38,6	40,3	-10%	44,4	43,1	40,8	38,6	38,1	-14%	
SISTEMA c													
	MODELOS	DIFUSOS					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)	ESPECULARES					ΔU_{ma} (entre 10% e 90%)
		ScD10	ScD30	ScD50	ScD70	ScD90		ScE10	ScE30	ScE50	ScE70	ScE90	
Uniformidade - U_{ma}	46,8	45	44,2	42,3	40,5	-13%	45,6	43,7	41,1	38,1	36,6	-20%	

Fonte: Elaborado pela autora

Dados de simulação da Autonomia de Luz Natural Espacial (ALNE_{500/50%}) para todos os modelos definidos para análise estatística (%).

Tabela 81 – Autonomia de luz natural espacial. Orientação Norte

NORTE								
SISTEMA a			SISTEMA b			SISTEMA c		
Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares
NaD10	NaM10	NaE10	NbD10	NbM10	NbE10	NcD10	NcM10	NcE10
94,4	95,8	95,8	91,6	94,4	75	90,2	90,2	90,2
NaD50	NaM50	NaE50	NbD50	NbM50	NbE50	NcD50	NcM50	NcE50
98,6	98	100	98,6	100	100	100	100	100
NaD90	NaM90	NaE90	NbD90	NbM90	NbE90	NcD90	NcM90	NcE90
100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 82 - Autonomia de luz natural espacial. Orientação Leste

LESTE								
SISTEMA a			SISTEMA b			SISTEMA c		
Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares
LaD10	LaM10	LaE10	LbD10	LbM10	LbE10	LcD10	LcM10	LcE10
51,4	55,5	59,7	51,4	50	54,1	38,8	41,6	54,1
LaD50	LaM50	LaE50	LbD50	LbM50	LbE50	LcD50	LcM50	LcE50
80,5	86,1	95,8	79,1	94,4	100	73,6	90,2	100
LaD90	LaM90	LaE90	LbD90	LbM90	LbE90	LcD90	LcM90	LcE90
95,8	95,8	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 83 - Autonomia de luz natural espacial. Orientação Oeste

OESTE								
SISTEMA a			SISTEMA b			SISTEMA c		
Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares
OaD10	OaM10	OaE10	ObD10	ObM10	ObE10	OcD10	OcM10	OcE10
47,2	53	54	36	41	50	33	44	44
OaD50	OaM50	OaE50	ObD50	ObM50	ObE50	OcD50	OcM50	OcE50
71	82	83	65	73	91	61	70,8	97,2
OaD90	OaM90	OaE90	ObD90	ObM90	ObE90	OcD90	OcM90	OcE90
94	100	100	95	100	100	97	100	100

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 84 - Autonomia de luz natural espacial. Orientação Sul

SUL								
SISTEMA a			SISTEMA b			SISTEMA c		
Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares	Difusos	Mistos	Especulares
SaD10	SaM10	SaE10	SbD10	SbM10	SbE10	ScD10	ScM10	ScE10
91,6	93	95,8	86,1	88,8	88,8	87,5	88,8	90,2
SaD50	SaM50	SaE50	SbD50	SbM50	SbE50	ScD50	ScM50	ScE50
97,2	95,8	97,2	93	97,2	97,2	91,6	98,6	98,6
SaD90	SaM90	SaE90	SbD90	SbM90	SbE90	ScD90	ScM90	ScE90
98,6	97,2	98,6	98,6	100	100	97,2	100	100

Fonte: Elaborado pela autora